



Партнеры конференции
Conference partners:



Сборник тезисов
10-й Международной конференции
«ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ
МИРОВОГО ОКЕАНА»

The 10th International Conference
«MINERAL OF THE OCEAN»
Abstract Book

20—22 июня 2023
ФГБУ «ВНИИОкеангеология»
Санкт-Петербург, Россия

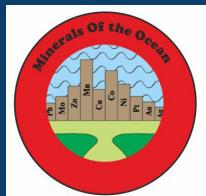
June 20—22, 2023
I. S. Gramberg VNII Okeangeologia
St. Petersburg, Russia

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ
(РОСНЕДРА)

ФГБУ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГЕОЛОГИИ И МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ МИРОВОГО ОКЕАНА
ИМ. АКАДЕМИКА И. С. ГРАМБЕРГА»
(ФГБУ «ВНИИОКЕАНГЕОЛОГИЯ»)

**Сборник тезисов
10-й Международной конференции
«ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ
МИРОВОГО ОКЕАНА»**

**The 10th International Conference
«MINERALS OF THE OCEAN»
Abstract Book**



Партнеры конференции
Conference partners



Санкт-Петербург
2023

УДК 551.35+553(063)

Сборник тезисов докладов 10-й Международной конференции «Полезные ископаемые Мирового океана», 20—22 июня 2023 года. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2023. — 137 с.

ISBN 978-5-88994-137-8

Рациональное и экологически безопасное для глубоководных экосистем освоение океанских полезных ископаемых требует тесного взаимодействия научного сообщества с национальными и международными промышленными организациями. Десятая Международная конференция «Полезные ископаемые Мирового океана» проводится с целью обсуждения новых результатов в области изучения и освоения минеральных ресурсов Мирового океана, гидротермальных сульфидов, железомарганцевых корок и конкреций, а также освещает экологические, технологические, экономические и правовые аспекты текущих морских геологоразведочных и будущих добывающих работ. Конференция дополнительно включает обсуждение геоморфологии, тектоники/геодинамики, магматизма и осадконакопления районов COX.

The 10th International Conference “Minerals of the Ocean”. Abstract Book. June 20—22, 2023. — SPb.: VNIIOkeangeologia, 2023. — 137 p.

Rational and environmentally safe mineral exploration requires a close collaboration of scientific communities with the industry. The 10th International Conference “Minerals of the Ocean” focus on discussion of latest scientific researches related to marine minerals, such as hydrothermal sulfides, ferromanganese crusts and nodules, and REY-rich sediments, as well as engineering, environmental and legal aspects of exploration and expected mining operations. In addition, conference includes discussion of geomorphology, tectonics/geodynamics, magmatism and sedimentation of the Mid-Ocean Ridges.

СОДЕРЖАНИЕ/CONTENTS

Afanasiev A. A., Litovko S. S., Grigorchuk A. V.	
EXTRACTION OF IRON-MANGANESE NODULES WITH THE HELP OF A “SWARM” OF COLLECTOR ROBOTS	7
Amplieva E. E., Bortnikov N. S., Beltenev V. E., Kovalchuk E. V.	
MINERALOGY OF ORES AND CHEMICAL COMPOSITION OF MINERALS OF THE POBEDA-2 HYDROTHERMAL FIELD (MID-ATLANTIC RIDGE, 17°08' N)	9
Chernyshev V. V., Arykantsev V. V., Kalinin Ya. V., Nasari Zadegan A. H., Sharonov N. G.	
TESTS OF A WALKING APPARATUS MOVING ALONG THE BOTTOM IN SUB ICE CONDITIONS	12
Ermakova L.	
EXPLOITATION OF DEEP-SEA MINERALS: CHALLENGES OF LEGAL REGULATION AND ENVIRONMENTAL PROTECTION	16
Firstova A. V., Cherkashov G. A., Stepanova T. V., Sukhanova A. A., Poroshina I.M., Bel'tenev V. E.	
THE INTERNAL STRUCTURE OF SEMENOV-5 (13°31' N, MAR) ULTRAMAFIC HOSTED SEAFLOOR MASSIVE SULFIDE DEPOSIT	19
Huang Mu, Shi Xuefa, Yu Miao, Li Jia, Bi Dongjie, Li Chuanshun, Ren Xiangwen, Zhu Aimei, Liu Jihua	
THE GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF RARE EARTH ELEMENTS IN SURFACE SEDIMENTS OF THE REY-RICH DEEP-SEA SEDIMENTS IN THE CENTRAL INDIAN OCEAN BASIN	23
Jin Liang, Chunhui Tao, Nannan Wang, Xiaohe Liu, Wang Mingxu	
MORPHOLOGY OF SULFIDE STRUCTURES IN THE ACTIVE HYDROTHERMAL FIELDS IN INDIAN OCEAN AND THEIR GEOLOGICAL IMPLICATIONS	24
Konstantinova N., Suzuki K., Kurisu M., Chang Q., Makabe A., Hein J. R., Brekke H., Skolotnev S.	
ENVIRONMENTAL CHANGES IN THE ARCTIC OVER PAST 10 MYR BASED ON OS ISOTOPE STRATIGRAPHY, FE ISOTOPE AND ELEMENTAL COMPOSITIONS OF FERROMANGANESE CRUSTS	26

Li Bing, Zhang Qi, Liu Jihua, Shi Xuefa	
SULFIDE CHARACTERISTICS AND METALLOGENIC SIGNIFICANCE OF THE CHIHU HYDROTHERMAL FIELD IN THE SOUTHERN MID-ATLANTIC RIDGE .....	.29
Li Chuanshun, Li Bing, Ye Jun, Dang Yuan, Shi Xuefa	
A NEW OCC TYPE SEAFLOOR HYDROTHERMAL FIELD DISCOVERED ON THE SOUTH MID-ATLANTIC RIDGE .....	.30
Melekestseva I. Yu.	
THE HEAVY METAL STORY OF THE IRINOVSKOE HYDROTHERMAL SULFIDE FIELD, 13°20' N, MAR .....	.33
Mustafina F. I., Hagspiel V.	
APPROACHES TO THE VALUATION OF DEEP-SEA MINING PROJECTS: INVESTMENT DECISION-MAKING UNDER UNCERTAINTY .....	.38
Pavlyuchenko S. A., Gorlov A. I.	
COMPUTER VISION FOR A FERROMANGANESE NODEL HARVESTING ROBOT .....	.42
Petukhov S.	
METHODS FOR RESOURCE ASSESSMENT OF POLYMETALLIC MASSIVE SULPHIDE DEPOSITS (PMS) .....	.44
Petukhov S., Kolchina N., Seleznev A.	
PREDICTING OF FAVORABLE AREAS OF HYDROTHERMAL OCCURRENCE IN THE NORTHERN AND SOUTHERN SEGMENTS OF THE MAR .....	.48
Ren Xiang-Wen, Li Hao-Nan, Shi Xue-Fa, Zhu Ai-Mei	
STUDIES ON SPECIFIC SURFACE AREA OF POLYMETALLIC NODULES: PRETREATMENT FOR ANALYSIS AND CONTROL FROM GENESIS .....	.52
Shi Xuefa, Huang Mu, Yu Miao, Bi Dongjie, Zhou Tiancheng, Liu Jihua, Ren Xiangwen	
GLOBAL DISTRIBUTION AND METALLOGENY OF DEEP-SEA REY-RICH SEDIMENTS .....	.54
Silantyev S. A.	
INFLUENCE OF INTERACTION OF HYDROTHERMAL AND MAGMATIC SYSTEMS ON THE GEOCHEMICAL SEGMENTATION OF THE MID-ATLANTIC RIDGE .....	.55
Skakovski V.	
PROCESSING OF DEEP-SEA MINERALS: REVIEW OF RUSSIAN STUDIES .....	.60
Sukhanova A. A., Firstova A. V., Stepanova T. V., Cherkashov G. A.	
GEOCHEMICAL FEATURES IN SEAFLOOR MASSIVE SULFIDES ASSOCIATED WITH DIFFERENT TYPES OF HOST ROCKS (RUSSIAN EXPLORATION AREA, MAR) .....	.63
Xue Xin-ru, Shi Xue-Fa	
INTRODUCTION TO SINO-RUSSIAN COOPERATION IN THE FIELD OF OCEAN MINERAL RESOURCES .....	.66

Yakubovich O. V., Konstantinova N. P., Anosova M. O., Mizell K., Hein R. J.	
U-TH/HE DATING OF FE-OXIDES ON THE EXAMPLE OF HYDROTHERMAL MINERALIZATION FROM THE CONTINENTAL SLOPE OF THE CHUKCHI BORDERLAND	68
Алексеев И. А.	
ОЦЕНКА ЗАПАСОВ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОТЧЕТНОСТИ О МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСАХ	71
Бельтенев В. Е.	
РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА ГЛУБОКОВОДНЫЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СУЛЬФИДЫ В РОССИЙСКОМ РАЗВЕДОЧНОМ РАЙОНЕ (САХ)	73
Бурлакова А. А., Смоленский В. В., Вилькин Г. С., Константина Н. П.	
МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ РУДНЫХ ПОЛЕЙ АШАДЗЕ-2 И ПЕТЕРБУРГСКОЕ (САХ)	77
Вилькин Г. С., Константина Н. П., Бурлакова А. А., Бельтенев В. Е., Черкашёв Г. А.	
ГЕОХИМИЯ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ РУДНЫХ ПОЛЕЙ АШАДЗЕ-2 И ПЕТЕРБУРГСКОЕ	81
Вишневская И. А., Михайлик П. Е.	
ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ SR И ND МИНЕРАЛЬНЫХ ФАЗ ГИДРОГЕННЫХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОРОК СЕВЕРНОЙ ПАЦИФИКИ	85
Калиниченко О. В., Остапюк Т. С., Телятникова О. В., Шумейкина Н. Е.	
СОСТОЯНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИЗУЧЕННОСТИ ДНА МИРОВОГО ОКЕАНА НА ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫЕ КОРКИ И КОНКРЕЦИИ	89
Кондратенко А. В., Егоров И. В., Козлов С. А., Бельтенев В. Е., Васильева М. С., Кондратюк Е. М., Павлов А. С.	
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РУДНЫХ ПОЛЕЙ (СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ, РОССИЙСКИЙ РАЗВЕДОЧНЫЙ РАЙОН)	93
Кравчишина М. Д., Кузнецов А. Б., Стародымова Д. П., Дара О. М., Чеботарева В. А., Клювиткин А. А., Баранов Б. В., Леин А. Ю.	
ГЕНЕЗИС ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОРОК ЯН-МАЙЕНСКОЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ, ХРЕБЕТ МОНА	101
Кукса К. А., Бич А. С., Черкашёв Г. А., Фирстова А. В., Кузнецов В. Ю., Бельтенев В. Е., Болтрамович С. Ф.	
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОНОСНЫХ ОСАДКОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО РУДНОГО УЗЛА СЕМЁНОВ	105
Ловчикова Т. Л.	
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ ГЛУБОКОВОДНЫХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СУЛЬФИДОВ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ	109
Лыгина Т. И., Миноранский Д. Е., Папсулесова С. Г., Сапрыйкин С. С.	
ОЦЕНОЧНАЯ И РАЗВЕДОЧНАЯ СТАДИИ ГРР НА АБИССАЛЬНЫЕ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫЕ КОНКРЕЦИИ: МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ	112

Петров В. А., Судариков С. М. ГИДРОГЕОХИМИЯ МЕТАНА И РУДООБРАЗУЮЩИХ МЕТАЛЛОВ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ОРЕОЛАХ РАССЕЯНИЯ (НА ПРИМЕРЕ РУДНЫХ ПОЛЕЙ РОССИЙСКОГО РАЗВЕДОЧНОГО РАЙОНА СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА)	116
Половков В. В., Пен Е. А., Корхов В. В., Белошапко А. Г., Карельский К. В., Черкашёв Г. А., Бич А. С. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ МОРСКОГО ДНА И ГЛУБОКОВОДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ	120
Сержан С. Л. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОПОДЪЕМА В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОВОДНОЙ ДОБЫЧИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МИРОВОГО ОКЕАНА.....	123
Стародымова Д. П., Кравчишина М. Д., Новичкова Е. А., Чеховская М. П., Сломнюк С. В., Мигдисова И. А., Якимова К. В. ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ВУЛКАНИЧЕСКОГО И ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ПРОЦЕССА В ОСАДОЧНОМ ЧЕХЛЕ ХРЕБТА МОНА (НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКИЙ БАССЕЙН)	127
Черкашёв Г. А. НАУЧНЫЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	131
Юнгмейстер Д. А., Исаев А. И., Королёв Р. И., Ефимов Ф. А., Смоленский М. П. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МАШИН КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДОБЫЧИ РАССРЕДОТОЧЕННЫХ ПО МОРСКОМУ ДНУ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	133

EXTRACTION OF IRON-MANGANESE NODULES WITH THE HELP OF A “SWARM” OF COLLECTOR ROBOTS

Afanasiev A. A., Litovko S. S., Grigorchuk A. V.

ocean-minerals.ru, info@ocean-minerals.ru

HYCO Ltd is developing a swarm system of autonomous robots-collectors (Fig. 1), considering it a promising option for the mining of nodules, which ensures, which is very important, a minimal impact on the environment.

The mining project involves the use of special robots — FMN collectors at a depth of 5000 m, which are combined in a swarm. The collector robots are lowered to the bottom in a special container capable of holding 512 units (Fig. 2). After a group of scout robots mark the boundaries of the mining area, the collecting robots begin to collect nodules. After filling a tank, the collecting robots independently travel to the central container for reloading the mined material and return to the collecting of rare earth nodules. The work of the robots in the swarm is completely autonomous, when one of them runs out of battery power, it is automatically sent to the central container for recharging. It remains for the operator to monitor the fullness of the production container or respond to the drone alarms. When the robot fails, it rises by itself to the surface of the water. The robots move in the thickness of the water with the help of servo-driven fins, similar to those of a cuttlefish,

not disturbing the bottom surface and not raising clouds of suspension, which may have a negative effect on the local flora and fauna. Creating the nodule mining system using a swarm of robots-collectors is an innovative tool for the sensible future.

Conclusions. The development of environmentally friendly mining equipment for collecting nodules has become relevant on the background of constant calls to freeze all

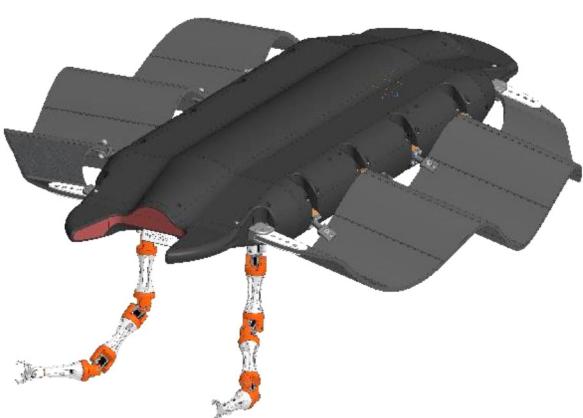


Fig. 1. Robot-collector

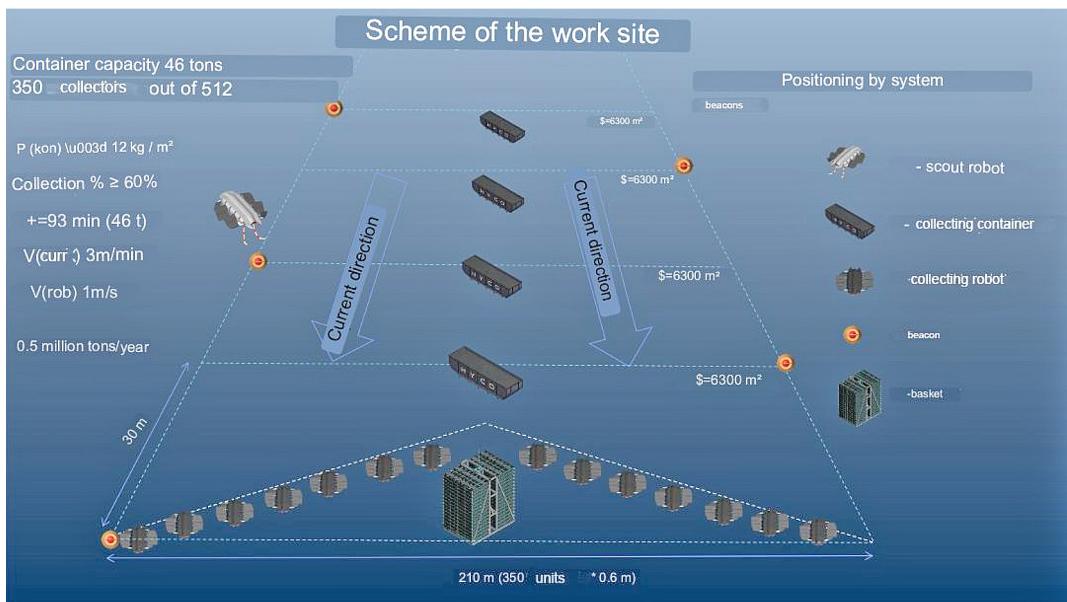


Fig. 2. Nodule mining using a swarm of robots-collectors

projects for the development of solid minerals on the ocean floor. In 2022, the G7 countries announced that they would only agree to seabed mining projects if they did not cause serious harm to the environment.

The nodule extraction system developed by HYCO Ltd specialists is using a swarm of collecting robots is innovative and, what is important, it ensures a minimal damage to the biodiversity of the seabed during its operation.

At the moment, the configuration of a complex for the mining operations has been developed, a computer model of a collecting robot has been built, the driving units have been worked out, the lifting force and the necessary energy supplies have been determined. Today, the work is underway to create a physical model of the collector, which will be tested under the conditions simulating the real ones in an artificial pool filled with nodules. Work has begun on the development and application of artificial intelligence that will be used to identify and collect nodules on the seabed.

MINERALOGY OF ORES AND CHEMICAL COMPOSITION OF MINERALS OF THE POBEDA-2 HYDROTHERMAL FIELD (MID-ATLANTIC RIDGE, 17°08'N)

Amplieva E. E.¹, Bortnikov N. S.¹, Beltenev V. E.², Kovalchuk E. V.^{1,3}

¹ IGEM RAS, Moscow, Russia

² FSBI “VNIIookeangeologia”, St. Petersburg, Russia

³ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting”, Moscow, Russia
Amplieva@igem.ru

The Pobeda sulfide edifice cluster, associated with peridotites, discovered in the 37th cruise (2014—2015) of the Russian R/V Professor Logachev by the Polar Marine Geosurvey Expedition (PMGE) in a collaboration with VNIIookeangeologia, Saint-Petersburg, Russia.

The Pobeda hydrothermal sulfide cluster is located on the eastern flank of the MAR rift valley on the western slope of the OCC massif at a depth between 1950 and 3100 m. The hydrothermal sulfide cluster consists of the Pobeda-1 and the Pobeda-2 hydrothermal fields, and the Pobeda-3 sulfide site.

The active hydrothermal field Pobeda-1 (17°08.7' N, 46°23.44' W) is located in water depths between 1950 m and 2400 m. It consists of four sulfide bodies, some ferriferous deposits, ferriferous crusts, and metalliferous sediments. Sulfide bodies are sulfide mounds about 10 m in height, some of them with sulfides chimneys, and fragments of sulfide sites and chimneys. The active Pobeda-2 hydrothermal field (17°07.45' N, 46°24.5' W) is situated in 4 km South-West from the Pobeda-1 in water depths between 2800 m and 3100 m. As well as the Pobeda-1, the Pobeda-2 is associated with peridotites and gabbronorites. The Pobeda-3 sulfide site (17°08.3' N, 46°25.2' W) is located at the depth of 2500 to 2700 m and largely covered by metalliferous sediments with Fe-Mn crusts, pyrite and barite grains [3—5, 7, 10]. The ²³⁰Th/U ages obtained for both the bulk samples and monomineral separates combined with data published earlier show the oldest age ca. 52 kyr within Pobeda-1 and ca. 107 kyr within Pobeda-2 fields [9].

Samples 37L107d Fe-Cu and 37L107d Py-Wur were taken from the hydrothermal field Pobeda-2. All samples collected during the 37th (2014—2015) cruise of the R/V Professor Logachev. Mineral analyses were performed with JXA-8200 electron microprobe (JEOL Ltd., Japan) with five wavelength-dispersive spectrometers at the IGEM RAS. Mineral phases were analysed by SEM TESCAN MIRA (Czech Republic) at the TESCAN Russia.

The hydrothermal field Pobeda-2. The hydrothermal ore consists of porous, fine-grained isocubanite + chalcopyrite-pyrite-sphalerite and isocubanite + chalcopyrite-secondary Cu sulfides-pyrite-sphalerite seafloor massive sulfides. Pyrite, marcasite, isocubanite are the major ore minerals; sphalerite and chalcopyrite are less abundant. Pyrrhotite, glaucodot, clauthalite, galena and cotunnite (?) are rare minerals. Gangue minerals are Fe oxides, barite and anhydrite [1, 7].

Uranium and uranium minerals have been found in sulfide ores of several modern hydrothermal fields of the Mid-Atlantic Ridge. Uraninite was found in sample of Logache-2 is variously ball-shaped, concentrically zoned, found in chains in opal, and found coating the external boundaries of sphalerite, chalcopyrite, and chalcocite [12]. In gossans from the Ashadze-2 hydrothermal sulfide field, rare isometric anhedral uraninite grains (up to 2 μm) with outer P- and Ca-rich rims, and numerous smaller ($<1 \mu\text{m}$) grains, occur in Fe-oxyhydroxides and sepiolite, associated with pyrite, isocubanite, chalcopyrite, galena, atacamite and halite [2]. Also, uranium oxides were found in sulfide aggregates of the Pobeda-1 and the Semenov-2 hydrothermal fields [11]. Uranium was found in sulfide ores and metalliferous sediments of Ashadze-1, Ashadze-2, Irinovskoye, Semenov-2, Semenov-4, Logachev-1, Krasnov, Peterburgskoye, Zenit-Victoria, Yubileynoye, Puy des Folles hydrothermal fields [7, 8, 10, 11].

U minerals were found in isocubanite+chalcopyrite-sphalerite aggregates (sample 37L107d Py-Wur) of copper-zinc ores of the Pobeda-2 field. The size of xenomorphic grains does not exceed 1—2 μm . All U minerals are in pores, fractures, intergranular space in sulfide aggregates, which indicates a later deposition of uranium phases.

The main source of uranium in modern sulfide ores of the hydrothermal fields of the Mid-Atlantic Ridge is considered to be sea water [2, 6, 10—12]. U minerals of the Pobeda-2 field, in contradistinction to other hydrothermal fields, were discovered in Cu and Zn sulfide aggregates.

The studies were carried out with the financial support for a project № 121041500220-0 “Structural-chemical heterogeneities and paragenetic assemblages of minerals as a reflection of the processes of petro- and ore genesis” provided by IGEM RAS. Authors thank the crew and the scientific team of the R/V Professor Logachev and Polar Marine Geosurvey Expedition.

References

1. Amplieva E. E., Bortnikov N. S., Kovalchuk E. V., Beltenev V. E. The Pobeda modern submarine hydrothermal sulfide edifice cluster (Mid-Atlantic Ridge, 17°08'N): mineralogy and chemical composition // Proceeding of the 14th SGA Biennial Meeting, 20—23 August 2017, Quebec City, Canada. P. 649—652.
2. Ayupova N. R., Melekestseva I. Y., Maslennikov V. V. et al. Uranium accumulation in modern and ancient Fe-oxide sediments: Examples from the Ashadze-2 hydrothermal sulfide field (Mid-Atlantic Ridge) and Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals. Russia) // Sediment. Geol. 2018. Vol. 367. P. 164—174. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.02.009>.

3. *Beltenev V. E., Narkevsky E. V., Dobretsova I. G.* et al. The results of Professor Logatchev-37 cruise, MAR. In Proceedings of the XXI International Scientific Conference (school) on Marine Geology // Moscow. Russia. 16—20 November 2015. GEOS: Moscow, Russia. 2015. P. 126—128. (In Russian).
4. *Beltenev V.* et al. Polar Marine Geosurvey Expedition (PMGE) report on exploration work on the Russian exploration area in Atlantic Ocean with an estimate forecast resources of PMS of categories P2–P3 in blocks 31–45: Polar Marine Geosurvey Expedition (PMGE), Lomonosov — St. Petersburg. Unpublished Report. 2016. 266 p. (In Russian).
5. *Cherkashov G., Kuznetsov V., Kuksa K.* et al. Sulfide geochronology along the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge // Ore Geol. Rev. 2017. Vol. 87. P. 147—154.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.015>.
6. *Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J.* et al. Geodiversity of hydrothermal processes along the Mid-Atlantic Ridge and ultramafic-hosted mineralization: A new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposit // Diversity of hydrothermal systems on slow spreading ocean ridges. AGU Geophysical Monograph. 2010. P. 321—368.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.02.009>.
7. *Gablina I. F., Dobretzova I. G., Laiba A. A.* et al. Specific Features of Sulfide Ores in the Pobeda Hydrothermal Cluster, Mid-Atlantic Rise 17°07'—17°08' N // Lithology and Mineral Resources. 2018. Vol. 53, N 6. P. 431—454. DOI: 10.1134/S0024490218060020.
8. *Kuksa K., Bich A., Cherkashov G., Firstova A., Kuznetsov V., Bel'tenev V.* Mass-wasting processes input in proximal metalliferous sediments: A case study of the Pobeda hydrothermal fields // Mar. Geol. 2021. Vol. 438. 106517. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106517>.
9. *Kuznetsov V., Cherkashov G., Kuksa K.* et al. Chronology of seafloor massive sulfides formation within the Pobeda hydrothermal cluster (Mid-Atlantic Ridge) // Geochronometria. 2020. Vol. 47. P. 63—70. DOI: 10.2478/geochr-2020-0019.
10. *Maslennikov V. V., Cherkashov G. A., Firstova A. V.* et al. Trace Element Assemblages of Pseudomorphic Iron Oxyhydroxides of the Pobeda-1 Hydrothermal Field, 17°08.7' N, Mid-Atlantic Ridge: The Development of a Halmyrolysis Model from LA-ICP-MS Data // Minerals. 2023. Vol. 13 (1). P. 4. <https://doi.org/10.3390/min13010004>.
11. *Sukhanova A. A., Firstova A. V., Stepanova T. V.* Peculiarities of uranium distribution in hydrothermal sulfide ores of the Mid-Atlantic Ridge // Metallogeny of ancient and modern oceans. Miass. 2020. Vol. 1. P. 78—82. (In Russian).
12. *Torokhov M. P., Cherkashev G. A., Stepanova T. V., Zhirnov E. A.* Uranium, its minerals and parageneses in massive sulfides of the Logatchev-2 MAR ore field // InterRidge News. 2002. Vol. 11 (2). P. 32—33.

TESTS OF A WALKING APPARATUS MOVING ALONG THE BOTTOM IN SUB ICE CONDITIONS

Chernyshev V. V.¹, Arykantsev V. V.^{1, 2}, Kalinin Ya. V.²,
Nasari Zadegan A. H.¹, Sharonov N. G.¹

¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, Россия

² Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Россия

vad.chernyshev@mail.ru

In conditions of increasing scarcity of minerals, there is an increased interest in the development of underwater deposits. In Russia, the Arctic shelf zones are characterized by the most significant mineral resource potential. At the same time, the development of mineral deposits of the Arctic shelf is still difficult, due to the lack of effective technologies for their extraction. Deposits in the permanent ice zone remain completely unexplored.

The report discusses the results of under-ice tests of the underwater walking robot MAK-1 (Fig. 1). The device has already been tested in the summer on the White Sea and Lake Baikal [1—3]. The project “MAK” is aimed at creating deep-sea uninhabited bottom walking robotic systems (self-propelled technological and mining modules) that have certain capabilities for self-adaptation to the unorganized bottom surface and for performing typical technological operations (leveling sites on the bottom, hydro-mechanical erosion of bottom sediments, crushing and selection of ore material, etc.) in the absence



Fig. 1. Underwater walking vehicle (modular hardware complex) MAK-1

of external control influences. Currently, the most advanced industrial technologies for the development of seabed resources, in terms of financial and labor costs, include new technologies based on robotic modules moving along the bottom. In a number of countries, the practical implementation of such projects is carried out on the basis of bottom tracked technological and mining modules. However, the experience of underwater technical work shows that tracked vehicles can work underwater only on relatively flat and fairly dense soils with small bottom slopes [4]. Moreover, even here they can move only at the limit of adhesion. To increase the useful traction force realized by coupling, it is necessary to significantly increase their coupling weight (negative buoyancy). For this reason, most of the known bottom tracked vehicles belong to the “heavy” weight category — their mass is tens or even hundreds of tons. Walking machines, in comparison with tracked ones, have higher ground and profile patency capabilities. Also, a walking mover can provide higher traction properties. At the same time, walking machines are significantly more difficult to control in comparison with tracked and wheeled ones — coordinated control of walking mechanisms in each cycle (step) is required. Underwater conditions — specific properties of low-bearing bottom soils and poor visibility complicate management.

Ice tests were carried out on Lake Baikal on the basis of the underwater walking apparatus MAK-1 (Fig. 2). Walking robot (modular hardware complex) MAK-1 is a reduced-size prototype of a multipurpose walking chassis for underwater technical works. Structurally, the 6-legged walking robot MAK-1 includes walking modules (supports) of the right and left sides connected by a frame [5]. Various technological equipment can be placed on the frame. The walking modules are equipped with an onboard power drive, made in the form of power units housed in watertight housings. Electric drive — asynchronous type

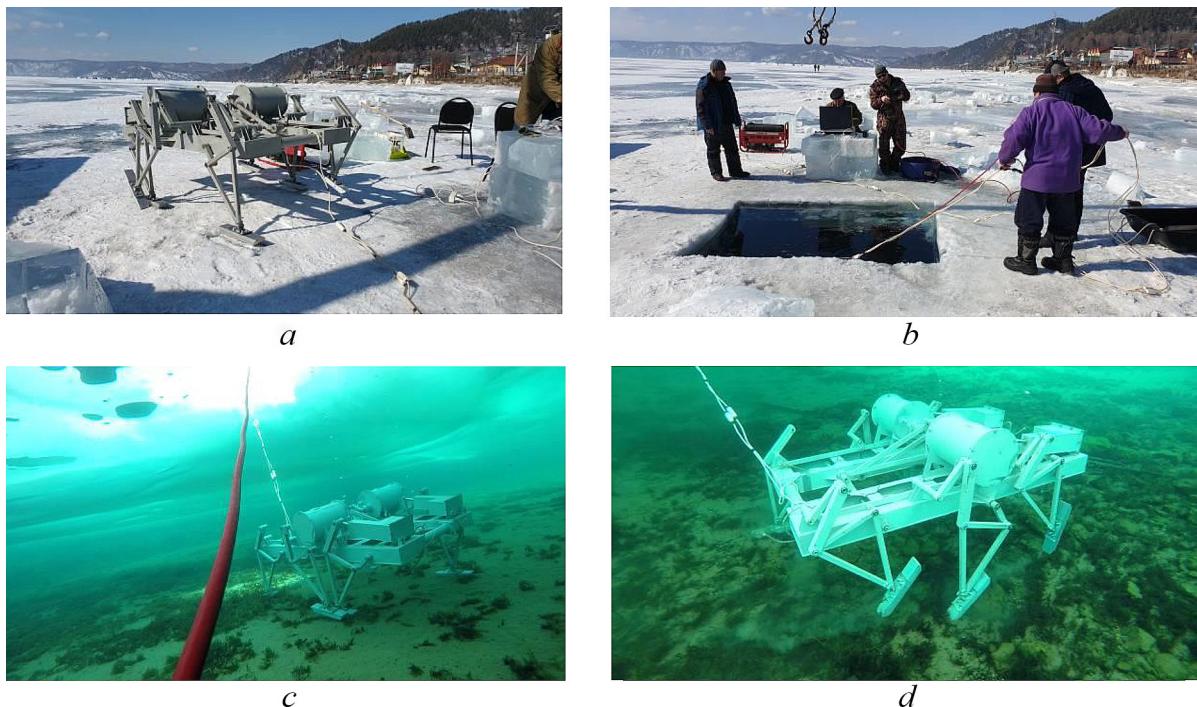


Fig. 2. Ice tests of the walking apparatus MAK-1 on the lake. Baikal

with frequency control of rotation speed. Power supply and control is carried out by cable from the shore or from the escort vessel. The total power of the on-board drives is about 2 kW. The weight of the entire device is about 200 kg, with dimensions of 1.8×1.8×0.9 m. The maximum speed under water is 3—5 km/h, depending on movement conditions. The walking mover of cyclic type was used in the robot. Mover consists of 3 kinematically connected walking mechanisms of cyclic type, arranged along the board. The supporting links of the walking mechanisms are equipped with hinged interchangeable feet. Outer walking mechanisms works in inphase, middle one — in antiphase. As a result, in each moment of time at least one of legs of the mover is in support phase. Movers of each board of the machine have independent electric engines. The robot has just 2 controlled degrees of freedom. Limbs of the robot Crabster CR200 with movers of adaptive type, for comparison, has more than 30 controlled actuators [6]. Usage of cyclic movers allows not to care about safety of the gait and makes stability providing easier. Therefore MAK-1 has a minimal number of controlled actuators and significantly simpler, more reliable and cheaper than analogues with adaptive control. For full realization of abilities of cyclic mover on adaptability and shape passableness in walking mechanisms of the MAK-1 was realized an ability to correct the trajectory of support points [7]. It was achieved by implementation of the additional rotary link in mechanism. Changing of its angular position leads to shifting of arm point of support of the walking mechanism and to transformation of straight movement base trajectory, which provides movement with lower energy costs, into obstacles passage mode with increased height and length of step. Thereby, control of supporting points trajectory of the MAK-1 robot is achieved in quite wide range.

During the ice tests, experimental testing of the developed methods of self-organization of the legs of the walking drive of the cyclic type was carried out. In conditions of limited visibility, by the nature of self-adaptation of the foot to an unorganized support surface and the relative movement of walking mechanisms, the nature of which is completely determined by internal information sensors, an assumed characteristic of the external workspace and the current situation was obtained, which were then compared with reality. The development of fuzzy control algorithms autonomously performed by an underwater walking robot in typical operational situations was carried out. The stability of the walking apparatus to overturning and sliding when overcoming slopes in underwater conditions was studied. The possibility of controlling the position of the hull by separately regulating the clearance of the stepping mechanisms was tested. The efficiency of the robot's information and measurement systems in subglacial conditions was evaluated. Some attention is paid to the development of the technology of ice diving and evacuation (rescue) of the device in case of failure of its systems or capsizing.

The conducted experimental verification of the efficiency of the robot's information-measuring and navigation systems in ice conditions revealed a number of technical problems. Tests have shown that the sensor and navigation capabilities of the MAK-1 robot are significantly inferior to the best foreign analogues and their significant strengthening is

necessary. The robot's control system is constantly being improved. Currently, an optimal solution is being sought for the distribution of modules of information-measuring and control systems between a walking robot moving along the bottom and a surface control unit. The results obtained during the tests will be taken into account when choosing the final solution.

The results of the project may be in demand when creating "heavy" underwater robots moving along the bottom, designed for various types of underwater technical work and for new industrial technologies for the development of seabed resources.

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-29-00720, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00720/>.

References

1. Underwater tests of the walking robot MAK-1 / V. V. Chernyshev, V. V. Arykantsev, Y. V. Kalinin // Human-Centric Robotics — Proceedings of the 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2017. Porto, 2018. P. 571—578.
2. Research of the walking type of movement in underwater conditions / V. V. Chernyshev, I. P. Vershinina, V. V. Arykantsev [et al.] // OCEANS 2019. Marseille, 2019. P. 8867233.
3. Methods of engineering and experimental tests of walking crawlers moving on the seafloor / V. V. Chernyshev, V. V. Arykantsev, Y. V. Kalinin [et al.] // OCEANS 2021. San Diego, CA, 2021.
4. *Hong S., Kim H. W., Choi J. S.* Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil // The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. 2002. P. 100—107.
5. Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1 / V. V. Chernyshev, V. V. Arykantsev, A. E. Gavrilov [et al.] // Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering — OMAE: ASME 2016. 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2016. Busan, 2016. P. 54440.
6. *Yoo S. Y., Jun B. H., Shim H.* Design of Static Gait Algorithm for Hexapod Subsea Walking Robot: Crabster // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A. 2014. Vol. 38. P. 989—997.
7. *Chernyshev V. V.* Algorithms of Self-control of the Underwater Walking Device According to Information on a Collision of Feet with an Unorganized Support Surface / V. V. Chernyshev, V. V. Arykantsev, V. E. Pryanichnikov // Communications in Computer and Information Science. 2021. Vol. 1426. P. 177—191.

EXPLOITATION OF DEEP-SEA MINERALS: CHALLENGES OF LEGAL REGULATION AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Ermakova L.

FSBI “VNII Okeangeologia”, St. Petersburg, Russia
livia77@inbox.ru

Exploitation of deep-sea minerals can become a reality in the foreseeable future.

Draft Regulations on Exploitation of Mineral Resources in the Area (the “Mining Code”; hereinafter — the draft Regulations) will be the legal basis for exploitation along with the United Nations Convention on the Law of the Sea of 1982 and the Agreement of 1994 relating to the implementation of Part XI of the United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 December 1992.

The International Seabed Authority (ISA) started development of the draft Regulations at 2014. During this time, the draft has evolved greatly from a very voluminous document to a set of the Regulations themselves and a number of accompanying standards and guidelines.

The problem of the need to adopt the Regulations on exploitation at an early date became even more acute in 2021 after the activation of the so-called “two-years rule” because of the statement of the President of Nauru that NORI (Nauru Ocean Resources, Inc.) was ready to apply for a contract on exploitation in 2 years.

Despite a lot of work done, many unresolved issues remain. System of payments (including a mechanism for the implementation of the concept of the common heritage of mankind), inspections (their mechanism and supervising), environmental protection, development of standards and guidelines are among such unresolved issues.

The exploitation of deep-sea minerals will entail environmental risks, part of which are similar for all three types of ecosystems associated with three types of mineral resources, and other are specific for each type of ecosystems. The exploitation will inevitably affect the all zones of life in the ocean: the surface, the water column and the bottom. In case of polymetallic nodules, the specific risks will be due to such features of ecosystems as

the structuring role of a hard substrate in the deep-sea communities of the abyssal plains. In case of ferromanganese crusts, they will be due to significant spatial heterogeneity, mosaic and small extent of populations on underwater mountains, as well as their role as local centers of biological diversity. And in the case of polymetallic sulphides — due to uniqueness of hydrothermal communities and the role of hard substrate in ecosystems of inactive hydrothermal fields.

A specificity of environmental risks is their uncertainty, due to the lack of knowledge and information about the marine ecosystems functioning (especially, the benthic ones) and the living organisms inhabiting them, as well as about impacts and effects of exploitation and their degree, including with regard the lack of complete information about mining technologies at this stage.

In this context, the results of equipment tests and accompanying environmental monitoring are of great importance. Sea trials of a pre-prototype manganese nodule collector vehicle Patania II (performed by the Belgian company DEME-GSR and the German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources), test of an integrated collector and riser and lift system done by NORI, trials of collectors' prototypes carried out by China Ocean Mineral Resources Research and Development Association, China Minmetals Corporation, Beijing Pioneer High-Tech Development Co., Ltd, Indian National Institute of Ocean Technology, the Japanese company JOGMEC, trials of Apollo II (the "Blue Nodules" project) and few more can be named in this regard.

Mining can only be allowed if an appropriate level of protection of the marine environment (effective protection in terms of the Article 145 of the UNCLOS) is ensured. Development and approval of binding environmental threshold values will be an important step on this way. It is expected that this work will begin in the near future under the leadership of the LTC (Legal and Technical Commission of the Council of the ISA).

Another important issue is an assessment of the possibility and timing of restoration of the environment and development of measures to mitigate and restore the environment as well. As example, the experiments with creation and deployment of artificial nodules can be named.

Amid uncertainty of environmental risks, in the international community there are voices about the need for a moratorium or for a so-called precautionary pause in relation to deep-sea mining. A number of states supported this initiative.

They are countered by arguments that at this time it is premature to speak of excessively harmful effects on the environment of deep seabed exploitation. In particular, the results of the equipment tests performed show that the distance of plume dispersion, which is expected to be one of the strongest impacts of mining on the marine environment, will be rather small (up to 5 km). Moreover, fine and colloidal particles that form plumes are of natural origin and are characteristic of the metabolism of the Earth, unlike, for example,

plastic, the pollution of the World Ocean with which has already assumed the character of a global catastrophe. In addition, the areas of deep-sea mining will be significantly smaller than areas of mining operations on land, the useful components in the mineral resources of the seabed are concentrated much more densely over smaller areas, and a much smaller impact on the Earth's crust will be created.

It is also important to bear in mind the principle of the common heritage of mankind and the mandate given by the UNCLOS for the ISA to organize and control activities in the Area, especially for the management of its resources.

Achieving a balance between exploitation of deep-sea minerals for the benefit of mankind and ensuring effective protection of the marine environment is the main task for today.

Named challenges, requiring further consideration in the professional community, will be discussed in more detail in the presentation.

THE INTERNAL STRUCTURE OF SEMENOV-5 (13°31' N, MAR) ULTRAMAFIC HOSTED SEAFLOOR MASSIVE SULFIDE DEPOSIT

Firstova A. V.¹, Cherkashov G. A.^{1, 2}, Stepanova T. V.¹,
Sukhanova A. A.¹, Poroshina I.M.¹, Bel'tenev V. E.¹

¹ FSBI “VNIIookeangeologia”, St. Petersburg, Russia

² Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

anetfirst@gmail.com

One of the most complicated issues in the study of seafloor massive sulfides (SMS) is the modeling of the internal structure of ore bodies. The structure of the hydrothermal ore system is determined by the geological setting that involves the structural and tectonic characteristics of the area and the composition of host rocks. A knowledge of the internal structure of SMS deposits is based mainly on drilling results and is scarce compared to investigations of the internal structure of land deposits. Mass wasting landslides can offer an exceptional opportunity to observe the surface part of an ore body that is composed of seafloor massive sulfides and the subsurface zone as well. The Semenov-5 hydrothermal field is a unique area where mass wasting on the slope of the oceanic core complex (OCC) structure exposes the subsurface portion of the deposit and offers an exceptional opportunity to observe massive sulfides that have formed not only on the seafloor but in sub-seafloor zones as well [1, 2] (Fig. 1).

The Semenov-5 (S-5) hydrothermal field lies on the northern slope of the dome structure at depths of 2200—2250 m and is hosted by hydrothermally altered (serpentized) gabbro-peridotites and fresh basalts [3, 4] (Fig. 1, 2).

Three zones of a hydrothermal ore-forming system have been described: 1) massive sulfides precipitated from hot vents on the surface of the seafloor (seafloor massive sulfide); 2) massive sulfides formed due to the replacement of ultramafics below the seafloor (sub-seafloor massive sulfide); 3) disseminated sulfide mineralization-filled cracks in hosted rocks, and the stockwork formed around sub-seafloor massive sulfides (Fig. 2). Sub-seafloor mineralization includes disseminated and massive sulfides, which differ from surface ones.

The mineralogical indicator of the replacement process could be relict Cr-spinel grains in different degrees of alteration identified in sulfide samples. In terms of geochemistry, the chemical composition of subseafloor massive sulfides also gives evidence of metasomatic

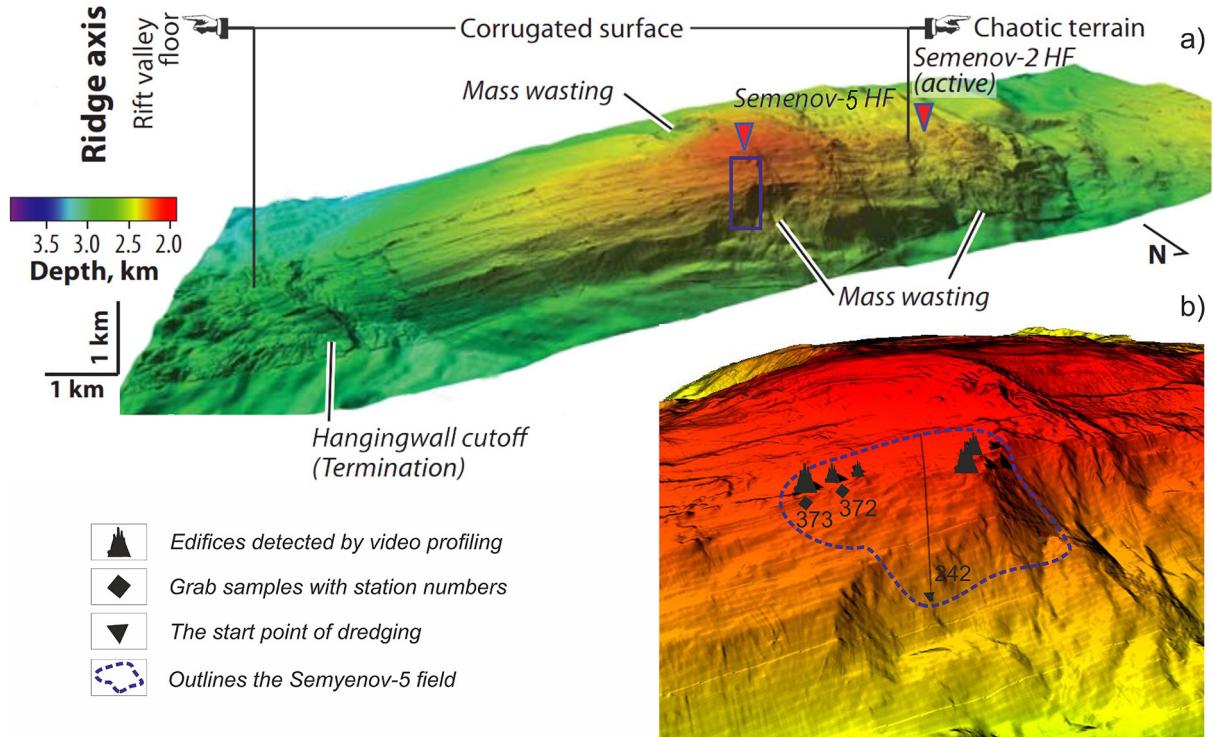


Fig. 1. The 13°30' N OCC detachment surface: a — three-dimensional views of the 13°30' N OCC microbathymetry showing the different structural domains together with other morphologic features according to ODEMAR data [2], the box corresponds to the area of (b); b — location of the Semenov-5 field at the northern slope of OCC and position of TV-Grab and dredge stations

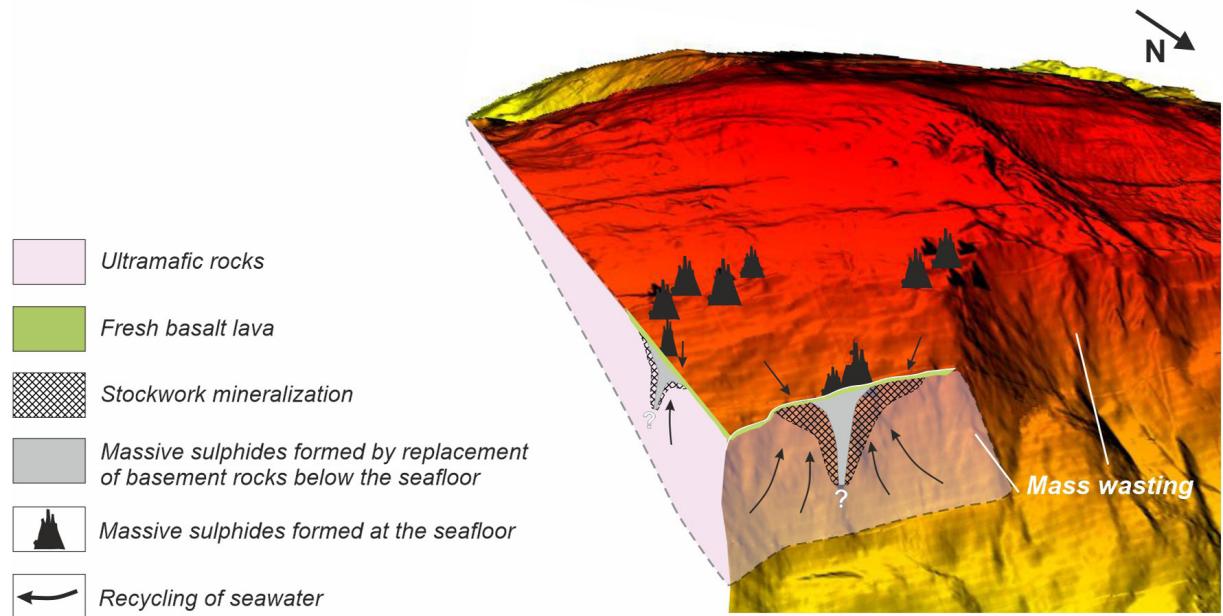


Fig. 2. The model of inner structure of the Semenov-5 hydrothermal field. The bathymetry data is from [2]

processes. Elevated Cu, Co and Ni are typical for ***ultramafic-hosted*** SMS and are related to the recycling process that leaches these metals from the host rocks. However, Cr concentration in the studied samples is significantly higher than the average Cr content in ultramafic hosted SMS. In comparison with the mean value for the ultramafic hosted SMS (37 ppm), the content of Cr sub-seafloor sulfides samples (984 ppm) is 26 times higher. Such extremely high Cr content in seafloor massive sulfides is recorded for the first time and could be related to the presence of relict Cr-spinels.

Seafloor massive sulfide were sampled at the surface of ***basalt lava flows*** which cover ultramafics close to the top of a OCC structure. The chemical composition of seafloor and sub-seafloor sulfides differs considerably. The seafloor massive sulfides are relatively enriched in Fe, Se and Te as well as in Ba, Pb, Mo, As and U and depleted by Cu, Co and Ni. Differences in composition are, in fact, related to the redox parameters and temperature of the fluid. The fluid alters and replaces the rocks below the surface and, after discharge, forms massive sulfides on the seafloor. It is possible that the same fluid, forming high-copper sulfides under the bottom, discharged mainly iron on the surface where low temperature minerals formed iron sulfides (marcasite) that were enriched in trace elements from recharged seawater. Therefore, we presume a greater influence of ultramafic rocks and mixing of hydrothermal fluid and seawater on the composition of massive sulfides on the surface of the seafloor than basalts. It is proposed that basalts do not effect sulfide composition because of a small volume of lava erupted on the giant massif of ultramafic rocks [1].

Summarizing data obtained, it is concluded that:

- a) the significant differences of composition between Semenov-5's (1) sub-seafloor and (2) seafloor mineralization are most likely connected with altering the physical and chemical parameters of the hydrothermal system and a difference in the mode of formation: (1) metasomatically within hosted rocks and (2) from the discharged fluid on the seafloor surface;
- b) sub-seafloor and seafloor massive sulfides have a common history of formation from the hydrothermal fluids which have been circulated within the ultramafic rocks and discharged on the surface;
- c) distribution of fresh, thin basalt lava flowing within the studied area does not significantly affect seafloor massive sulfide composition.

The suggested model of inner structure allows not only for a better understanding of the sub-seafloor hydrothermal process but could be applied to more reliable resource assessments of ultramafic-hosted SMS deposits as well. Continuation of massive sulfides below the surface of the seafloor could considerably increase the resource estimation of SMS deposits because of the presently calculated volume of ore bodies that concribe the limits of the paleo-seafloor boundary. However, this consideration should be demonstrated by the drilling of ultramafic-hosted SMS deposits.

References

1. Firstova A., Cherkashov G., Stepanova, T., Sukhanova, Poroshina A. I., Bel'tenev V. New Data for the Internal Structure of Ultramafic Hosted Seafloor Massive Sulfides (SMS) Deposits: Case Study of the Semenov-5 Hydrothermal Field (13°31' N, MAR) // *Minerals*. 2022. Vol. 12. P. 1593. <https://doi.org/10.3390/min12121593>.
2. Escartín J., Mevel C., Petersen S., Bonnemains D., Cannat M., Andreani M., Godard M. Tectonic structure, evolution and the nature of oceanic core complexes and their detachment fault zones (13°20' N and 13°30' N, Mid Atlantic Ridge) // *Geochem. Geophys. Geosystems*. 2017. Vol. 18. P. 1451—1482.
3. Pertsev A. N., Bortnikov N. S., Vlasov E. A., Beltenev V. E., Dobretsova I. G., Ageeva O. A. Recent massive sulphide deposits of the Semenov ore district, Mid-Atlantic Ridge, 13°31' N: Associated rocks of the oceanic core complex and their hydrothermal alteration // *Geol. Ore Depos.* 2012. Vol. 54. P. 334—346.
4. Beltenev V., Ivanov V., Rozhdestvenskaya I., Cherkashov G., Stepanova T., Shilov V., Pertsev A. et al. A new hydrothermal field at 13°30' N on the Mid-Atlantic Ridge // *InterRidge News*. 2007. Vol. 16. P. 9—10.

THE GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF RARE EARTH ELEMENTS IN SURFACE SEDIMENTS OF THE REY-RICH DEEP-SEA SEDIMENTS IN THE CENTRAL INDIAN OCEAN BASIN

Huang Mu^{1, 2}, Shi Xuefa^{1, 2}, Yu Miao^{1, 2}, Li Jia¹, Bi Dongjie^{1, 2},
Li Chuanshun^{1, 2}, Ren Xiangwen^{1, 2}, Zhu Aimei¹, Liu Jihua^{1, 2}

¹ Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography,
Ministry of Natural Resource, Qingdao 266061, China

² Laboratory for Marine Geology, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China
huangmu@fio.org.cn

Abstract: As one of the four deep-sea rare earth elements (REY) mineralization zones had been discovered recently, the zone in the Central Indian Ocean Basin was independently predicted and firstly discovered by the team of Chinese scientists led by professor SHI Xuefa. With the continuous funding of China Ocean Mineral Resources R&D Association (COMRA for short), the team led by professor SHI had predicted the existence of REY-rich deep-sea sediments in the Central Indian Ocean Basin in 2012. In December 2013, the REY-rich sediment core sample was obtained successfully in the area. And in June 2015, a large area of REY-rich deposits was firstly discovered in the Central Indian Ocean basin by the team. Based on the study of 14 stations of surface sediments in the area, the geochemical characteristics of REYs mainly follow:

(1) REYs are mainly enriched in zeolite clay and pelagic clay in the sediments. The samples are significantly enriched in HREY (from Gd to Lu, and Y), with an enrichment coefficient of 11.60. The highest enrichment degree was Yttrium, with an enrichment coefficient up to 14.06.

(2) Samples with REYs enrichment exhibit strong depletion of Ce and weak positive of Eu anomalies. The correlation coefficient between Σ REY and P_2O_5 is 0.99, indicating that biological apatite is an important enrichment mineral or host mineral of REYs in the REY-rich sediments.

(3) The characteristics of the Σ Ce- Σ Eu- Σ Y triangular diagram and δ Ce- δ Eu scatter plot of the samples indicate that deep-sea REY-rich sediment is a new type of REY-rich deposits that is different from terrestrial rare earth deposits.

(4) REY-rich sediments are mainly developed in the oxygenated environments with low sedimentation rates, water depths greater than CCD, and stable structures environments.

Key words: Central Indian Ocean Basin; REY-rich deep-sea sediments; rare earth elements; geochemical characteristics.

Acknowledgments: This study is jointly supported by the NSFC (No. 91858209, No. 92262304), and the COMRA (No. DY135-R2-1-01, No. DY135-R2-1-02).

MORPHOLOGY OF SULFIDE STRUCTURES IN THE ACTIVE HYDROTHERMAL FIELDS IN INDIAN OCEAN AND THEIR GEOLOGICAL IMPLICATIONS

Jin Liang^{1, 2}, Chunhui Tao^{1, 2, 3}, Nannan Wang^{1, 5}, Xiaohe Liu^{1, 5}, Wang Mingxu^{1, 3}

¹ Key Laboratory of Submarine Geosciences, Ministry of Natural Resources,
Hangzhou 310012, China

² Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

³ School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

⁴ School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

⁵ Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, 316021, China

The Indian Ocean ridges are up to approximately 18.000 km in length, with various full spreading rates (<12—80 mm/yr), including the Carlsberg, the Central, the Southeast, and the Southwest Indian Ridges. A total of 15 active hydrothermal fields have been reported at these ridges, ranging from high to low temperatures to nearly extinct ones (Fig. 1). The distribution of hydrothermal vents and their morphology in these hydrothermal fields are still not well studied. These hydrothermal areas are hosted by either ultramafic rocks or basalts, even both. However, studies have shown that host rock are not the sole factor controlling the morphology of hydrothermal structures. For example, in Daxi and Tianxiu field at Carlsberg Ridge, which are hosted by different rocks, both exhibit feature of large beehive chimneys. However, their beehive chimneys are significantly different from those in the Edmond and Kairei fields at Central Indian Ridge. The former two have larger individual beehive chimneys, while the latter two have smaller individual chimneys but larger groups. Additionally, large chimney structures more than 10 meters in height have been observed in the Longqi, Daxi, Tianxiu, Edmond, Kairei, and Pelagia fields, indicating relatively stable tectonic environments in these regions. On the other hand, hydrothermal areas like Dodo and Solitaire only exhibit small, short chimneys, suggesting relatively weaker material supply. Nevertheless, these characteristics alone are not sufficient to demonstrate significant differences in sulfide structure morphology between the hydrothermal fields of Indian Ocean and the slow-spreading Mid-Atlantic Ridge. The Longqi field on SWIR is unique in the entire Indian Ocean for hosting large flanges (from ~1 to ~5 m across) on the sulfide edifices, which contrasts with most hydrothermal vent fields, particularly in the sediment-starved areas. Despite being in different stages of activity, a locally long-term stable tectonic setting, and a continuous heat source supply are necessary foundations for the formation of large hydrothermal sulfide structures. Our results expand previous studies on metal resource evaluation along the Indian Ocean ridges and further enhance our understanding of the formation of modern seafloor hydrothermal systems.

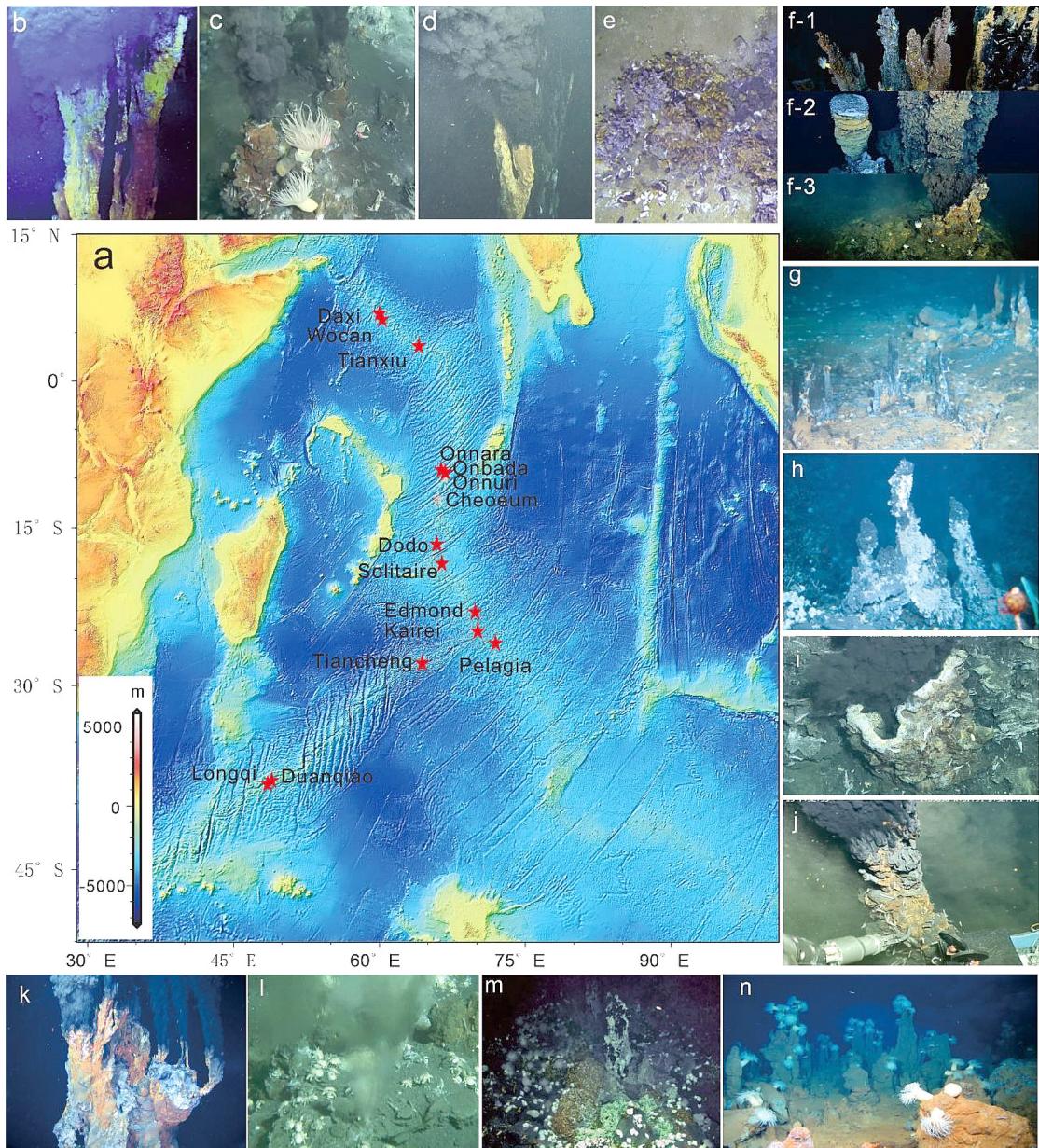


Fig. 1. Active hydrothermal fields in the Indian Ocean: a — location of 15 active vent fields; b — vigorous venting tall chimney in Daxi (Wang et al., 2020); c — vigorous venting short chimneys in Wocan (Qiu et al., 2021); d — vigorous venting tall chimney in Tianxiu (Liang et al., 2023); e — low temperature diffuse flow in Onnuri (Lim et al., 2022); f-1—f-3 — Beehive diffusers and vigorous venting chimneys in Onnara and Onbada¹; g — beehive chimneys in Dodo (Nakamura et al., 2012); h — beehive chimneys in Solitaire (Nakamura et al., 2012); i — vigorous venting chimney in Edmond (photo by Shenhaiyongshi in 2019); j — vigorous venting chimney in Kairei (photo by Shenhaiyongshi in 2019); k — vigorous venting chimney in Longqi (photo by Jiaolong in 2015); l — white fluids venting in Duanqiao (photo by Shenhaiyongshi in 2019); m — beehive chimneys in Tancheng (Sun et al., 2020); n — chimney jungle in fields of SEIR²

¹ <https://www.ropos.com/index.php/news-and-media/46-ropos-kiost-isabu-2021>.

² https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/MarineRohstoffforschung/Bilder/schwarze-raucher_g_en.html?nn=1548238.

ENVIRONMENTAL CHANGES IN THE ARCTIC OVER PAST 10 MYR BASED ON OS ISOTOPE STRATIGRAPHY, FE ISOTOPE AND ELEMENTAL COMPOSITIONS OF FERROMANGANESE CRUSTS

Konstantinova N.^{1, 2, 3}, Suzuki K.², Kurisu M.², Chang Q.²,
Makabe A.², Hein J. R.³, Brekke H.⁴, Skolotnev S.⁵

¹ FSBI “VNII Okeangeologia”, St. Petersburg, Russia

² Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japan

³ Institute of Precambrian Geology and Geochronology (IPGG) Russian Academy of Sciences,
Russia

⁴ U.S. Geological Survey, PCMSC, USA

⁵ Norwegian Petroleum Directorate, Norway Geological Institute, Russian Academy of Sciences,
Russia

NPKonstantinova@gmail.com

Hydrogenetic ferromanganese (Fe-Mn) crusts develop by precipitation from ambient bottom waters and accretion of colloids onto rock surfaces. Due to their slow growth rate and layered structure Fe-Mn crusts are the useful tool and paleoenvironmental archive for studying the climatic, oceanographic, and geologic evolution of the oceans on long (millions of years) time scales, especially of the Arctic Ocean, which remains a poorly explored region. However, precise age determinations using Fe-Mn crust is still a challenging task. The marine Os isotopes composition is well preserved in Fe-Mn crust, which allow to determine their age by comparison with the seawater Os isotope curve, reconstructed from pelagic marine sediments (e. g. [1]). The $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ composition of present-day seawater is nominally homogenous ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 1.06 \pm 0.04$; e. g. [5]). The $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ composition of seawater reflects a balance of riverine inputs of continental Os with a radiogenic value ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} \sim 1.4$), relative to inputs of mantle-derived and extraterrestrial Os with a non-radiogenic value ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} \sim 0.12$) (e.g. [2]).

For the first time the Os isotope data of four ferromanganese crusts from Arctic Ocean is presented. The hydrogenetic crusts being studied were collected from the Amerasia basin (Mendeleev Ridge and Chukchi Borderland) and Norwegian basin (Voring Spur and Knipovich Ridge) of the Arctic Ocean within a depth range from 3851 to 1300 mbs (Fig. 1). The Os concentration and $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio are provided together with major and trace-element compositions of sublayers (2—5 mm) to show temporal variations in elemental behavior. Twenty samples of sublayers of Fe-Mn crusts were chosen for Fe isotope analyses based on Fe contents and $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio values and presented firstly for Fe-Mn crusts from the Arctic Ocean.

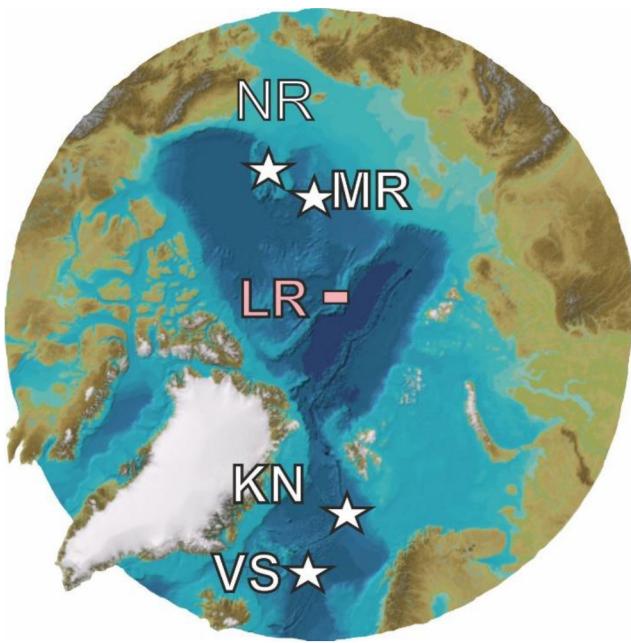
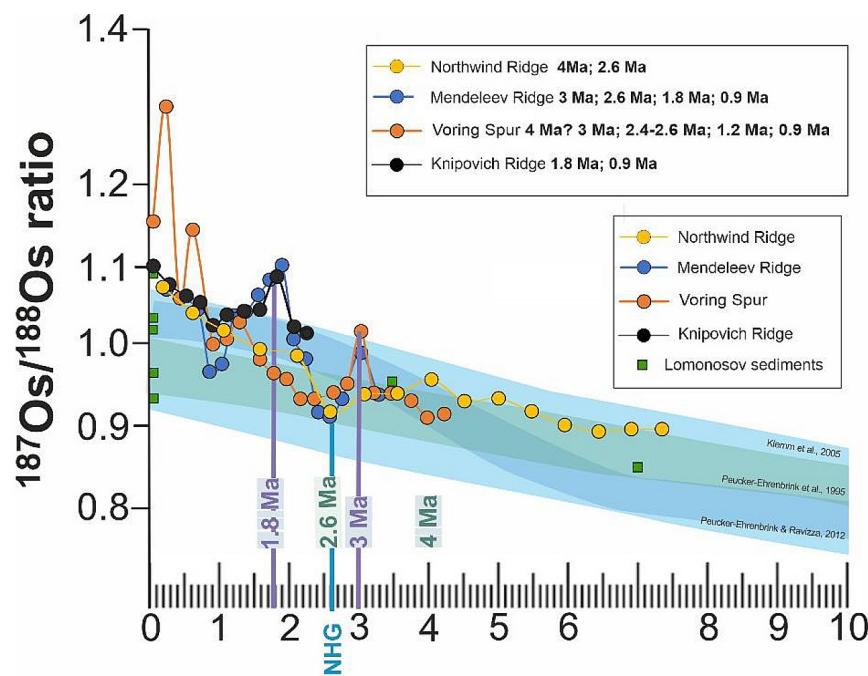


Fig. 1. Regional settings of Chukchi Borderland (CB), Mendeleev Ridge (MR), Knipovich Ridge (KR), Voring Spur (VS), where Fe-Mn samples of this research were obtained (white stars). Pink square mark the location of 15 cm Fe-Mn crust from 2500–3500 m water depth at Lomonosov Ridge (Knudsen et al., 2017)

chemical and mechanical erosion to predominantly mechanical erosion, which is confirmed by maximum value of detrital grains in sublayers and was caused by decreased of temperature and cover the continents by thick ice.

3 Ma and 1.8 Ma peaks are characterized by more radiogenic Os ratio, although they are typical only for MR, VS and KnR crusts reflecting more local influence of these events in the Arctic and significant differences of environment condition of ChB crust (Fig. 2).



In contrast to seawater Os isotope curve of last 10 Myr $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio of the Arctic crusts show significant variations reflect the unique characteristics of the Arctic Ocean (Fig. 2), especially the significant influence of the glacial/interglacial regimes on depositional type. $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio of the Arctic crusts reflect several events that influenced on composition of all or several crusts. The main one is characterized by minimum of $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio that reflect decreased fluxes of radiogenic Os. It is dated as 2.6 Ma and coincide with Intensification of the Northern Hemisphere glaciations (INHG), the period of increased glacial weathering and mechanical erosion. We suggest the supply of dissolved Os in hydrogenetic phase from old continent decreased at that period due to changes of

Fig. 2. Age models of Fe-Mn crusts from the Arctic Ocean using Os isotope stratigraphy. The global seawater composition reconstructed from marine sediments (Klemm et al., 2005; Peucker-Ehrenbrink et al., 1995; Peucker-Ehrenbrink and Ravizza, 2012) are shown by light blue colors. Green squares represents the leachate of ACEX core sediments from Lomonosov Ridge (Poirier and Hillaire-Marcel, 2009)

The results and exploration of Fe isotopes and major and trace element compositions of sublayers will be discuss during the conference.

Funding: The study was funded by JSPS postdoctoral program and the RSF, project no. 22-77-10088.

References

1. Klemm V., Sylvain Levasseur, Martin Frank, James R. Hein, Alex N. Halliday. Osmium isotope stratigraphy of a marine ferromanganese crust // Earth and Planetary Science Letters. 2005. Vol. 238, Issue 1—2. P. 42—48.
2. Peucker-Ehrenbrink B., Ravizza G. Os isotope stratigraphy. In: Gradstein F. M., Ogg J. G., Schmitz M., Ogg G. (eds). The geologic time scale 2012. Elsevier, Amsterdam, 2012. P. 145—166.
3. Poirier A., Hillaire-Marcel C. Os-isotope insights into major environmental changes of the Arctic Ocean during the Cenozoic // Geophys. Res. Lett. 2009. Vol. 36. L11602. DOI: 10.1029/2009GL037422.
4. Tokumaru A., Tatsuo Nozaki, Katsuhiko Suzuki, Kosuke T. Goto, Qing Chang, Jun-ichi Kimura et al. Re—Os isotope geochemistry in the surface layers of ferromanganese crusts from the Takuyo Daigo Seamount, northwestern Pacific Ocean // Geochemical Journal. 2015. Vol. 49, Issue 3. P. 233—241.
5. Woodhouse O. B., Ravizza G., Kenison Falkner K., Statham P. J., Peucker-Ehrenbrink B. Osmium in seawater: vertical profiles of concentration and isotopic composition in the eastern Pacific Ocean // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. Vol. 173. P. 223—233.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00233-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00233-2).

SULFIDE CHARACTERISTICS AND METALLOGENIC SIGNIFICANCE OF THE CHIHU HYDROTHERMAL FIELD IN THE SOUTHERN MID-ATLANTIC RIDGE

Li Bing, Zhang Qi, Liu Jihua, Shi Xuefa

Key Laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology,
First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China
bli@fio.org.cn

Abstract: The Chihu hydrothermal field is the first discovered detachment fault-controlled hydrothermal field in the Southern Atlantic Ridge. From a tectonic perspective, it is located on the footwall of the detachment fault with the surrounding rock being basalts. However, the previously discovered hydrothermal fields on the footwall of detachments were mainly surrounded by ultramafic rocks. In Our studies, mineralogical and geochemical studies of sulfides from two sites (T13 and T20) in the hydrothermal field were carried out: (1) The main sulfide mineral at station T13 is massive sulfide, while at station T20, sulfides occur mainly as brecciated and impregnated forms. The main elements in the hydrothermal fluids are similar to those in mafic-type hydrothermal fields, indicating the influence of mafic rocks in the hydrothermal field. (2) The anomalously low sulfur isotope values at station T20 may be related to the modification of surface processes and the activity of reducing sulfur bacteria, and the absence of massive sulfides at this station may be related to later weathering and erosion.

Key words: Southern Mid-Atlantic Ridge; Chihu hydrothermal field; Hydrothermal sulfides; Detachment fault.

A NEW OCC TYPE SEAFLOOR HYDROTHERMAL FIELD DISCOVERED ON THE SOUTH MID-ATLANTIC RIDGE

Li Chuanshun^{1, 2}, Li Bing^{1, 2}, Ye Jun^{1, 2}, Dang Yuan^{1, 2}, Shi Xuefa^{1, 2}

¹ Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography,
Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

² Shandong Key Laboratory of Deep Sea Mineral Resources Development,
Qingdao 266061, China
lichuanshun@fio.org.cn

Abstract: A ripple-shaped seafloor highland composed of mixed rocks at 23.7° S, South Mid-Atlantic Ridge (SMAR) was discovered during the Chinese DY 22nd cruise in 2011, and named “Chihu Hill”. The seamount is 16.6 km long and 8.6 km wide, with its long axis parallel to the trend of the mid-ocean ridge. The shallowest point at the top of the seamount is about 2380 m deep, while the foot of the mountain with a water depth of about 3300 m. There are significant “ripples” on the seamount’s surface that extend vertically to the mid-ocean ridge. The western side of the seamount is adjacent to the east wall of the central valley, and it is connected to the central valley at the foot of the mountain. The Chihu Hill extends to the Heiwu Hill on the east side. The Heiwu Hill is an early product of OCC at the same latitude.

The Chihu Hill and the Heiwu Hill together constitute a composite nuclear ophiolite. The ridge segment where the Chihu Hill is located extends nearly NNW, and the overall shape of the ridge is symmetrical in spreading, but the ridge segment (about 20 km) corresponding to the seamount has undergone a small westward shift and shows an asymmetric spreading structure, indicating the development of detachment faults on the east side of this small section of the ridge. Based on the eastward offset of the ridge at the north and south ends of the seamount, it is speculated that the north and south boundaries of the detachment fault correspond to the north and south boundaries of the seamount.

Hydrothermal activity was discovered at the junction of western slope foot of the Chihu Hill and the east wall of the central valley during the Chinese DY 52nd cruise in 2019. We speculate that this hydrothermal field is located at the exposed location of the detachment plane on the seafloor. Basalts, hydrothermal sediments and sulfides, including sulfide chimney fragments and sulfides debris, were collected by using a television grab. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ value of sulfides ranged from 7.87‰ to 11.29‰, with an average of 9.59‰.

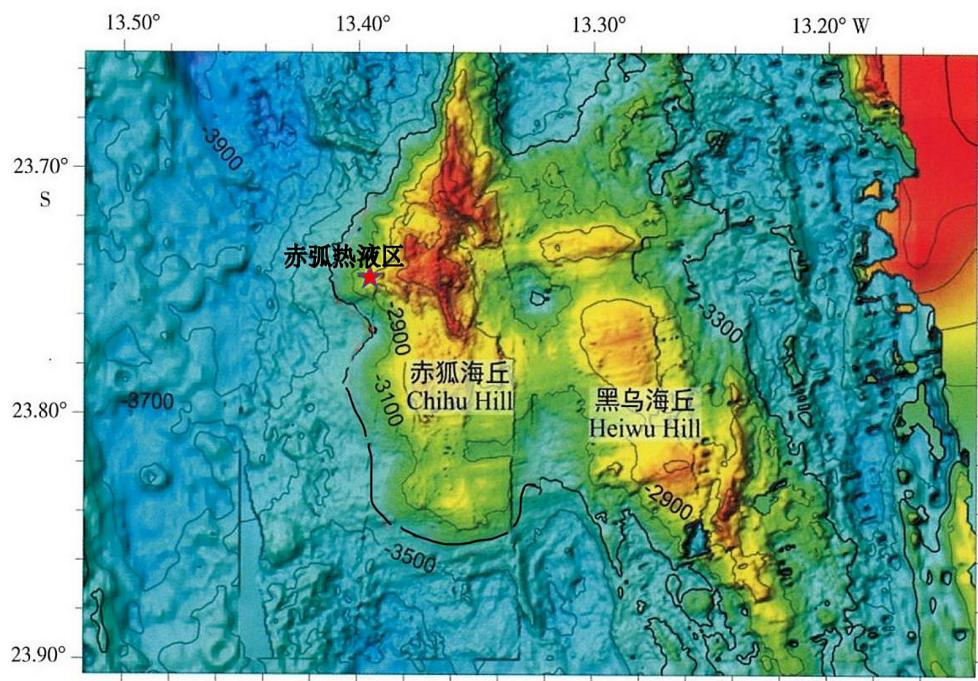


Fig. 1. Location of Chihu Hydrothermal Area

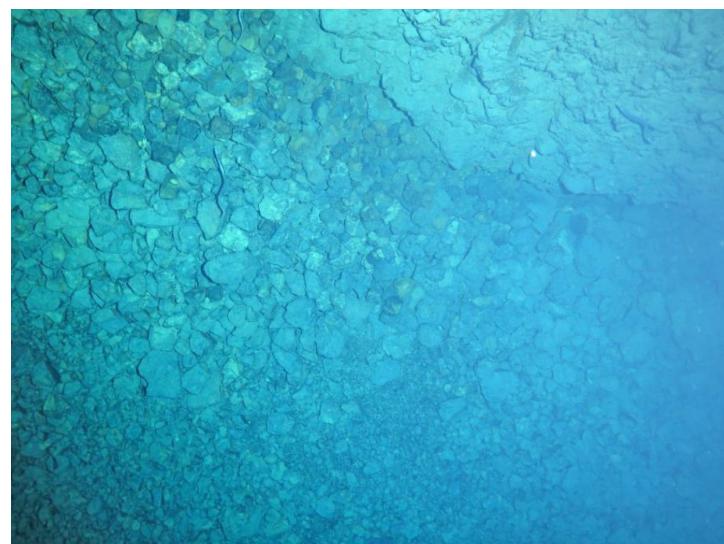


Fig. 2. Hydrothermal products captured by deep-sea photography



Fig. 3. Hydrothermal sulfide and sediment samples obtained from television grab

Compared with the other mafic-hosted hydrothermal fields on the Mid-Atlantic Ridge, the values of Chihu sulfur isotope are higher, but they are much closer to that of ultramafic-hosted hydrothermal field, indicating the Chihu hydrothermal field is controlled by ultramafic rocks. The higher values of sulfur isotope indicate that a high proportion of seawater sulfate involved in the strong reducing hydrothermal fluid. Two stages of high-temperature hydrothermal activity were revealed in the Chihu hydrothermal field. The hydrothermal products formed during the first period of hydrothermal activity underwent landslides and displacement due to seafloor weathering, gravitational and structural processes, forming landslide deposits. During the second period of hydrothermal activity, which was reactivated by the detachment structure, the hydrothermal fluid ascended and infiltrated the landslide sediment of the first period, and underwent siliceous precipitation under the influence of seawater mixing or conductive cooling, cementing the landslide sediment debris into rocks.

Key words: South Mid-Atlantic Ridge, OCC, Seafloor Hydrothermal Field.

THE HEAVY METAL STORY OF THE IRINOVSKOE HYDROTHERMAL SULFIDE FIELD, 13°20' N, MAR

Melekestseva I. Yu.

Institute of Mineralogy, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology
UB RAS, Miass, Russia
melekestseva-irina@yandex.ru

A specific association of “low-temperature” [1] heavy metals (Cd, Pb, Ag, Sb±As) is typical of Zn-rich ores of various seafloor hydrothermal sulfide fields (HSFs), a considerable enrichment in which is generally characteristic of felsic-dominated island-arc environments [2—9]. In the Mid-Atlantic Ridge (MAR), seafloor HSFs occur within mafic- or ultramafic-related ridge segments and their Zn-rich massive sulfides could locally be enriched in (on average) Pb (2%) (Rainbow-2 HSF), Sb (229 ppm) (TAG HSF), Ag (489 ppm) (Semenov-2 HSF), Cd (700 ppm) and As (522 ppm) (Logatchev-2 HSF) [3, 10]. Minerals of the above heavy metals in the MAR HSFs are dominated by galena (a main host of Pb) and acanthite/native silver (main hosts of Ag) [3]. Rare Sb and As minerals include tennantite, tetrahedrite, a Cu₃Pb₂(Sb,As)S₄ phase, luzonite, jordanite, cobaltite, skutterudite, aurostibite, stibnite, boulangerite and realgar [3, 11—15]. In this work, we describe the finding of Cd-, Pb-, Ag- and Sb(±As)-bearing minerals in Zn-rich smoker chimneys of the Irinovskoe HSF, MAR.

The Irinovskoe HSF (13°20'0" N, 44°55'6" W) was discovered in 2011 during the 34th cruise of R/V Professor Logatchev by the Polar Marine Geosurvey Expedition (PMGE, St. Petersburg, Russia) in collaboration with VNIIIOkeangeologia (St. Petersburg, Russia) [16]. The field is located between the Marathon and 15°20' fracture zones in a summit area of the southeastern slope of seamount 13°20' N (oceanic core complex, OCC) at a water depth of 2700—2850 m. The seamount is characterized by a dominant in situ lithology of serpentized peridotite, partially covered by basaltic scree with minor amounts of greenschist facies dolerite dikes. The rugged and elevated western part of the OCC is dominated by basalt, greenschist dolerite and minor amounts of gabbro. The Irinovskoe HSF 350×380 m in size includes two massive sulfide bodies 3—5 m high, which consist of sulfide edifices with smoker chimneys and products of their erosion and metalliferous sediments.

Samples for the study were collected during the 34th cruise of the R/V Professor Logatchev at TV-grab station 34L241 ($13^{\circ}19.957' N$, $44^{\circ}54.679' W$) (unpublished PMGE report, 2011) in the NW part of ore body I. The station grabbed a large fragment of an extinct sulfide structure weighing more than 100 kg. The sulfide edifice consisted of coalesced Cu-rich chimneys in the central part/basement and Zn-rich chimneys at the margins/top.

The Zn-rich samples were light, sooty, porous and friable. They locally contained small (1 cm max) unsealed channels, but most Zn-rich chimneys exhibited no channels or clear zonation. Some chimney fragments up to 10 cm across had (i) a central more porous zone ~1 cm thick (a former channel?), (ii) a surrounding more compact opal–Zn sulfide zone up to 1.5 cm thick rimmed by an almost continuous dense opal–Zn sulfide layer up to 1 mm thick and (iii) a zone of porous opal–Zn sulfide aggregates up to 4 cm thick with a small amount of granular pyrite. More massive Zn-rich sulfide samples are characterized by a higher amount of opal.

Macroscopically, only Zn sulfides (~65%), silica (~20%), Fe-oxyhydroxides (~10%) and, locally, pyrite and chalcopyrite (~5% in total) can be recognized in samples. Rare crystals of barite and secondary Cu sulfides are observed under a binocular microscope. According to the X-ray diffractometry, the mineral composition is dominated by wurtzite (3—65 wt %) and sphalerite (5—30 wt %), which are accompanied by pyrite, chalcopyrite, amorphous silica and, locally, native sulfur. SEM studies revealed the presence of accessory galena, a CdS phase, pyrrhotite, isocubanite, acanthite, various Ag–Cu–Sb(\pm As)-bearing minerals, covellite, yarrowite, native gold, native sulfur, anglesite, gypsum, smectites, naumannite and lollingite [17].

The Cd sulfide occurs as several morphological and geochemical types. The smallest (<1—10 μm) anhedral grains, subhedral crystals or microcrystalline intergrowths are found on top of sphalerite or opal aggregates. This CdS type contains Zn (0.81—2.25 wt %), Fe (max 2.05 wt %), Cu (0.42—6.73 wt %) and Ag (2.09—21.01 wt %). In samples with native sulfur, the CdS phase pseudomorphically replaces acicular pyrrhotite and granular sphalerite. It has higher Zn contents (13.76—23.07 wt %) and a variable amount of Fe (0.00—10.81 wt %), but is free from Cu and Ag. The CdS phase locally forms spongy aggregates, which replace sphalerite and are associated with an Ag sulfide. This CdS phase exhibits the highest Zn (21.24—25.27 wt %) and Ag (0.00—7.04 wt %) and the lowest Fe (0.47—1.47 wt %) contents.

The Pb sulfides include galena and its As-bearing variety. Galena forms small euhedral to subhedral crystals and their aggregates around Zn sulfides, inclusions in opal and anhedral aggregates with anhedral sphalerite. In samples with native sulfur, galena pseudomorphically replaces acicular CdS crystals. The As-bearing (up to 8.20 wt % As) galena forms spongy anhedral grains, which occur in opal and, locally, replaces As-free galena or sphalerite. These galena grains are replaced by an As_2O_3 phase from the rims.

Acanthite is observed between opal, sulfides or Fe-oxyhydroxides as (i) anhedral knobby aggregates, which are locally associated with Ag-bearing covellite and replace sphalerite together with covellite, (ii) crystalline aggregates, (iii) spherulitic aggregates together with Ag- and Cd-bearing covellite and CdS phase and (iv) spherulitic aggregates and fine-acicular crystals in assemblage with interstitial Ag- and Sb-bearing. Two geochemical types of acanthite are recognized: (i) Cu-, Zn- and Fe-bearing associated with Ag-bearing covellite and (ii) Sb-, Cu- and Zn-bearing associated with Ag- and Sb-bearing covellite.

The Ag-rich Cu–Sb-bearing grains occur as smallest (max 5 µm) grains on top of opal or are also associated with Ag–Sb-bearing covellite in reniform aggregates, where they replace covellite. Some SEM analyses can be recalculated to formulas of argentotetrahedrite-Zn, miargyrite, pyrargyrite and stephanite. Those, which cannot adequately be recalculated to a particular mineral species, most likely represent extremely fine mixtures of associated Cu sulfides, Cu-bearing Ag–Sb sulfosalts and acanthite. One small (max 3 µm) naumannite grain was found on top of covellite and opal around sulfides.

The heavy metal minerals formed during a late low-temperature stage, an upper boundary of which (120 °C) is set by the instability of a solid form of native sulfur [18]. This stage was characterized by a reduced activity of S and an enhanced activity of other easily volatilized elements (Cd, Sb, As, Se) leading to the formation of S-deficient mineral assemblages including pyrrhotite, Cd-bearing sphalerite, a CdS phase, As-bearing galena, acanthite, naumannite, lollingite, Ag–Sb–Cd-bearing covellite and various Ag–Sb–Cu sulfosalts.

The presence of Ag–Sb–Cu sulfosalts, acanthite, Ag-rich native gold, naumannite, barite, Al-rich opal, native sulfur and mixed-layered kaolinite–smectite phase exhibit certain similarities with both continental and oceanic epithermal-style mineralization (e.g., [6–8, 19, 20]).

The Zn-rich smoker chimneys of the Irinovskoe HSF formed due to lower flow velocity of relatively lower temperature fluids and restricted mixing of fluid and seawater. The high Cd content of sphalerite reaching up to 41.38 wt % and the presence of a CdS phase (most likely, hawleyite) are the most remarkable features of Zn-rich chimneys.

The presence of native sulfur, Al-rich opal and mixed-layered kaolinite–smectite phase also points to acidic formation conditions. The finding of pyrrhotite, lollingite and As-bearing galena also indicates low S activity and increasing As activity. The occurrence of Sb minerals exclusively within the MAR OCC-related hydrothermal sulfide fields reflects a possible genetic link to these geological settings and could be a new proxy for the OCC-related massive sulfides. The finding of the Cd-rich sphalerite and CdS phase in low-temperature mineral assemblage significantly expands the temperature boundaries of possible formation of Cd sulfides. The high Cd contents of easily soluble sphalerite and the presence of the CdS phase should be taken into account in possible future mining seafloor hydrothermal sulfide fields and further processing of their sulfides.

References

1. *Fouquet Y., Henry K., Knott R., Cambon P.* Geochemical section of the TAG hydrothermal mound. In: Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results; Herzig P. M., Humphris S. E., Miller D. J., Zierenberg R. A. (eds). Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1998. Vol. 158. P. 363—387.
2. *Fouquet Y., Wafik A., Cambon P., Mevel C.* et al. Tectonic setting and mineralogical and geochemical zonation in the Snake Pit sulfide deposit (Mid-Atlantic Ridge at 23° N) // Economic Geology. 1993. Vol. 88. P. 2018—2036.
3. *Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J.* et al. Geodiversity of hydrothermal processes along the Mid-Atlantic Ridge and ultramafic-hosted mineralization: A new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposits. In: Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges. Rona P. A., Devey C. W., Dyment J., Murton B. J. (eds). AGU Geophys. Monograph. Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 2010. P. 321—368.
4. *Halbach P., Pracejus B., Marten A.* Geology and mineralogy of massive sulphide ores from the Central Okinawa Trough, Japan // Economic Geology. 1993. Vol. 88. P. 2210—2225.
5. *Herzig P. M., Hannington M. D., Fouquet Y.* et al. Gold-rich polymetallic sulfides from the Lau back arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the Southwest Pacific // Economic Geology. 1993. Vol. 88. P. 2182—2209.
6. *Petersen S., Herzig P. M., Hannington M. D.* et al. Submarine gold mineralization near Lihir Island, New Ireland fore-arc, Papua New Guinea // Economic Geology. 2002. Vol. 97. P. 1795—1813.
7. *Petersen S., Herzig P. M., Schwarz-Schampera U.* et al. Hydrothermal precipitates associated with bimodal volcanism in the Central Bransfield Strait, Antarctica // Mineralium Deposita. 2004. Vol. 39. P. 358—379.
8. *Petersen S., Monecke T., Westhues A.* et al. Drilling shallow-water massive sulfides at the Palinuro volcanic complex, Aeolian island arc, Italy // Economic Geology. 2014. Vol. 109. P. 2129—2157.
9. *De Ronde C. E. J., Massoth G. J., Butterfield D. A.* et al. Submarine hydrothermal activity and gold-rich mineralization at Brothers Volcano, Kermadec Arc, New Zealand // Mineralium Deposita. 2011. Vol. 46. P. 541—584.
10. *Melekestseva I. Yu., Maslennikov V. V., Tret'yakov G. A.* et al. Gold- and silver-rich massive sulfides from the Semenov-2 hydrothermal field, 13°31.13' N, Mid-Atlantic Ridge: A case of magmatic contribution? // Economic Geology. 2017. Vol. 112. P. 741—773.
11. *Lein A. Yu., Cherkashov G. A., Ul'yanov A. A.* et al. Mineralogy and geochemistry of sulfide ores from the Logachev-2 and Rainbow fields: Similar and distinctive features // Geokhimiya. 2003. Vol. 41. P. 271—294. (In Russian.)
12. *Bogdanov Y. A., Lein A. Yu., Sagalevich A. M.* et al. Hydrothermal sulfide deposits of the Lucky Strike vent field, Mid-Atlantic Ridge // Geochemistry International. 2006. Vol. 44. P. 403—418.
13. *Bogdanov Y. A., Lein A. Yu., Maslennikov V. V.* et al. Mineralogical-geochemical features of sulfide ores from the Broken Spur hydrothermal vent field // Oceanology. 2008. Vol. 48. P. 679—700.
14. *Firstova A., Stepanova T., Cherkashov G.* et al. Composition and formation of gabbro-peridotite hosted seafloor massive sulfide deposits from the Ashadze-1 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge // Minerals. 2016. Vol. 6. P. 19.
15. *Firstova A., Stepanova T., Sukhanova A.* et al. Au and Te minerals in seafloor massive sulphides from Semyenov-2 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge // Minerals. 2019. Vol. 9. P. 294.

16. *Beltenev V. B., Ivanov V. N., Sergeev M. B.* et al. Results of prospecting works for base metal sulfides in the Atlantic Ocean in 2011 in the light of submitting the Russian application in ISA // *Razvedka i Okhrana Nedr.* 2012. Vol. 8. P. 50—55. (In Russian.)
17. *Melekestseva I., Kotlyarov V., Tret'yakov G.* et al. The heavy-metal fingerprint of the Irinovskoe hydrothermal sulfide field, 13°20' N, Mid-Atlantic Ridge // *Minerals.* 2022. Vol. 12. P. 1626.
18. *Balić-Žunić T., Garavelli A., Jakobsson S. P.* et al. Fumarolic minerals: An overview of active European volcanoes. In: *Updates in Volcanology — From Volcano Modelling to Volcano Geology;* Nemeth K. (ed.). InTech Open Access Publishers: London, UK, 2016. P. 267—322.
19. *Fanlo I., Subías I., Mateo E.* Supergene enrichment of primary Cu-Ag assemblages in Ag at the Pardos deposit, Iberian Range, Spain // *The Canadian Mineralogist.* 2010. Vol. 48. P. 415—430.
20. *Pažout R., Sejkora J., Šrein V.* Ag-Pb-Sb sulfosalts and Se-rich mineralization of Anthony of Padua Mine near Poličany — Model example of the mineralization of silver lodes in the historic Kutná Hora Ag-Pb ore district, Czech Republic // *Minerals.* 2019. Vol. 9. P. 430.

APPROACHES TO THE VALUATION OF DEEP-SEA MINING PROJECTS: INVESTMENT DECISION-MAKING UNDER UNCERTAINTY

Mustafina F. I., Hagspiel V.

Department of Industrial Economics and Technology Management,
Norwegian University of Science and Technology (NTNU),
Trondheim, Norwayfarida.
mustafina@ntnu.no

One of the essential tasks of the current generation is creating a sustainable global economy for future generations. Given the increasing demand for minerals and decreasing ore grades in land-based deposits, deep-sea mineral deposits are considered a potential source of critical minerals. The question is whether deep-sea mining can contribute to the new economy in a socially acceptable, economically viable, and ecologically sustainable manner. Answering this question is the main task of the “The Deep Dilemmas: Deep Sea Mining for the new Deep Transition? (TripleDeep)” project at the Norwegian University of Science and Technology (NTNU). As a part of this project, we aim to consider the economic issues of deep-sea mining activities with a particular interest in decision-making under uncertainty.

Investment is the act of incurring an immediate cost in the expectation of future rewards. Investment decisions have three important characteristics. First of all, investments are irreversible because they cannot be recovered. Second, future rewards which are mentioned in the definition of the investment are uncertain. Third, there is a flexibility in the timing of investment. These three main characteristics determine the optimal investment decision-making [7].

Traditionally, investments in the mining industry are assessed using a classic discounted cash flow (DCF) analysis under the condition of definite cash flow, the method that was advocated by Fisher [8]. Within such an analysis a net present value (NPV) is calculated by discounting the cash flows using a risk-adjusted discount rate. Surveys by Bartrop and White [4], Bhappu and Guzman [5], and Smith [21] indicate that the DCF method is the most commonly used project valuation technique in the mining industry. Most existing studies considering deep-sea mineral resources and the valuation of deep-sea mining (DSM) projects are to a large extent based on a traditional DCF analysis as well (e. g., Ham [9], Johnson & Otto [10], Martino & Parson [13], Nyhart et al. [16], Volkmann et al. [22]).

While the traditional DCF approach is appropriate for valuing rather predictable assets, it is not suitable in case of highly volatile, uncertain, and capital-intensive investments [11, 12, 15, 18, 20]. Relying on the DCF approach might lead to wrong decision-making and undervaluation of resources. It is important to consider managerial flexibility and uncertainty correctly in the assessment of mining projects, where the main value drivers may be highly volatile.

A growing body of literature regarding other natural resources projects applies a real options approach (ROA) in order to better account for uncertainties and managerial flexibility. This approach is based on an idea that a company with an opportunity to invest is holding an option analogous to a financial call option. This option gives a company the right but not the obligation to invest at some future time of its choosing [7]. The ROA takes into account all three abovementioned characteristics of investment decisions and allows to analyze the effect of risk and uncertainties on investment decision making.

We are planning to extend the ROA to the deep-sea mineral resources sector, particularly to the part on investment decision-making for deep-sea minerals exploration activities. Technological and geological uncertainties are scarcely addressed in existing DSM-related literature taking rather the classic DCF approach to solving problems. Besides, these uncertainties had been discussed little with regard to other natural resources as well. For this reason, we are adding these uncertainties into consideration for our project. In addition, as managerial flexibility and decision making could be strongly affected by external factors, such as regulatory policies, we would like to analyze such effects with regard to DSM activities.

From the corporate perspective, mining companies aim to maximize their profits. Companies engaged in DSM activities will face huge risks caused by, for instance, regulatory uncertainty, large capital expenses, and a longstanding mining project life cycle. The establishment of a new value chain will require significant investment in technology and infrastructure before the start of commercial production. As for today, proven technology and necessary infrastructure are in an early stage. Under such uncertain circumstances, investors may prefer to wait until new information is gained during the exploration phase of a DSM project. Companies entering the DSM industry most probably will not have detailed information about the area and deposits there. We are interested in how information acquisition revealing uncertainty about the resource potential of the area and deposit characteristics can create additional value and reduce the risks of the mining project. Additionally, another interesting problem for us is a problem of uncertain future regulatory regimes with a particular focus on how different tax regimes and other regulatory measures can affect a company's decision-making.

From the regulatory perspective, governments should strive to maximize social welfare. Deep-sea mineral deposits are a potential source of critical minerals necessary to create a sustainable global green economy in the future. However, given low levels of

technology readiness, lots of risks, and high sunk costs during exploration activities, companies' willingness to invest in DSM ventures is expected to be low. Therefore, DSM companies will need additional support. Potentially, governments could be interested in the development of that industry to secure the state's critical metals supply. Cooperation of companies with regulators could help to develop new techniques for mineral exploration, like in the case of the European Union's Blue Mining initiative for deep-sea mineral deposits [2]. We are interested in what are the optimal measures to incentivize companies' investments in DSM activities, at the same time ensuring that society will be better off.

This difference in objectives of companies and governments creates a dynamic investment coordination problem that was discussed by, for instance, Barbosa et al. [3], Moretto et al. [14], Rodrik [19], Zwart [24]. This requires governmental regulation, which can be implemented in the form of incentive measures (e. g., subsidies). Using such measures, the regulator can influence the company's investment decisions with the aim to reach a socially optimal goal. Several scientific papers reveal that incentive measures positively affect companies' investment decision-making and the speed of investments (e. g., [17, 23]). However, uncertainties related to future demand and policy measures can negatively affect the investment decisions of the companies, resulting in changes in the size or the timing of investments [6].

Thus, we consider the ROA as an optimal tool for addressing the abovementioned questions of interest. It will help us to focus on some of the main uncertainties of DSM projects like those regarding deposit characteristics and regulatory decisions. We believe that using the ROA we will be able to provide important insights for policy and decision-makers with regard to sustainable and responsible future of DSM activities.

References

1. Абдрахманов И. А. Физико-химическое моделирование условий формирования магматического гранулита (оазис Бангера, Восточная Антарктида) // Вестник Геонаук. 2021. № 2 (314). С. 14—18.
2. Ali S. H., Giurco D., Arndt N., Nickless E., Brown G., Demetriadis D. et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance // Nature. 2017. Vol. 543. P. 367—372.
3. Barbosa L., Rodrigues A., Sardinha A. Optimal price subsidies under uncertainty // European Journal of Operational Research. 2022. Vol. 303, Issue 1. P. 471—479.
4. Bartrop S., White A. Spade work — how miners value resources // JASSA. 1995. Vol. 1. P. 7—13.
5. Bhappu R. R., Guzman J. Mineral investment decision making: study of practices // Engineering & Mining Journal. 1995. P. 36—38.
6. Bigerna S., Wen X., Hagpiel V., Kort P. M. Green electricity investments: Environmental target and the optimal subsidy // European Journal of Operational Research. 2019. Vol. 279, Issue 2. P. 635—644.
7. Dixit A. K., Pindyck R. S. Investment under Uncertainty. 1st edition. Princeton University Press, 1994. 488 p.

8. Fisher I. *The Rate of Interest: Its Nature, Determination, and Relation to Economic Phenomena*. New York: The Macmillan Company, 1907. 442 p.
9. Ham K.-S. A Study on Economics of Development of Deep-Seabed Manganese Nodules // Proceedings of the Second Ocean Mining Symposium. Seoul, Korea, 1997. 7 p.
10. Johnson C. J., Otto J. M. Manganese nodule project economics: Factors relating to the Pacific region // Resources Policy. 1986. Vol. 12, Issue 1. P. 17—28.
11. Kim K., Park H., Kim H. Real options analysis for renewable energy investment decisions in developing countries // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 75. P. 918—926.
12. Mardones L. J. Option valuation of real assets: application to a copper mine with operating flexibility // Resources Policy. 1993. Vol. 19, Issue 1. P. 51—65.
13. Martino S., Parson L. M. A comparison between manganese nodules and cobalt crust economics in a scenario of mutual exclusivity // Marine Policy. 2012. Vol. 36, Issue 3. P. 790—800.
14. Moretto M., Panteghini P. M., Scarpa C. Profit sharing and investment by regulated utilities: A welfare analysis // Review of Financial Economics. 2008. Vol. 17, Issue 4. P. 315—337.
15. Mun J. *Real Options Analysis: Tools and techniques for valuing strategic investments and decisions*. 2nd edition. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006. 415 p.
16. Nyhart J. D., Antrim L., Capstaff A. E., Kohler A. D., Leshaw D. *A Cost Model of Deep Ocean Mining and Associated Regulatory Issues* // Massachusetts Institute of Technology. 1978. P. 370.
17. Özdemir O., Hobbs B. F., van Hout M., Koutstaal P. R. Capacity vs energy subsidies for promoting renewable investment: Benefits and costs for the EU power market // Energy Policy. 2020. Vol. 137. P. 111—166.
18. Rigby D. Management tools and techniques: a survey // California Management Review. 2001. Vol. 43, Issue 2. P. 139—160.
19. Rodrik D. Political economy and development policy // European Economic Review. 1992. Vol. 36, Issue 2. P. 329—336.
20. Sinan E. S., Erzurumlu Y. O. Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis // Resources Policy. 2014. Vol. 46, Part 1. P. 6—14.
21. Smith L. D. Discounted cash flow analysis: Methodology and discount rates: Light metals // CIM bulletin. 2002. Vol. 95, N 1062. P. 101—108.
22. Volkmann S. E., Lehnen F., Kukla P. A. Estimating the economics of a mining project on seafloor manganese nodules // Mineral Economics. 2019. Vol. 32. P. 287—306.
23. Yang X., He L., Xia Y., Chen Y. Effect of government subsidies on renewable energy investments: The threshold effect // Energy Policy. 2019. Vol. 132. P. 156—166.
24. Zwart G. Optimal regulation of energy network expansion when costs are stochastic // Journal of Economic Dynamics and Control. 2021. Vol. 126. 103945. P. 11.

COMPUTER VISION FOR A FERROMANGANESE NODULE HARVESTING ROBOT

Pavlyuchenko S. A., Gorlov A. I.

<https://devstars.ru/>

Inline LLC accomplishes R&D of the computer vision system for a ferromanganese nodule harvesting robot commissioned by HYCO Ltd.

The robot is a small unit made in bio-style.

The robot, like a stingray, moves a short distance above the bottom surface using its side fins, stops and collects nodules.

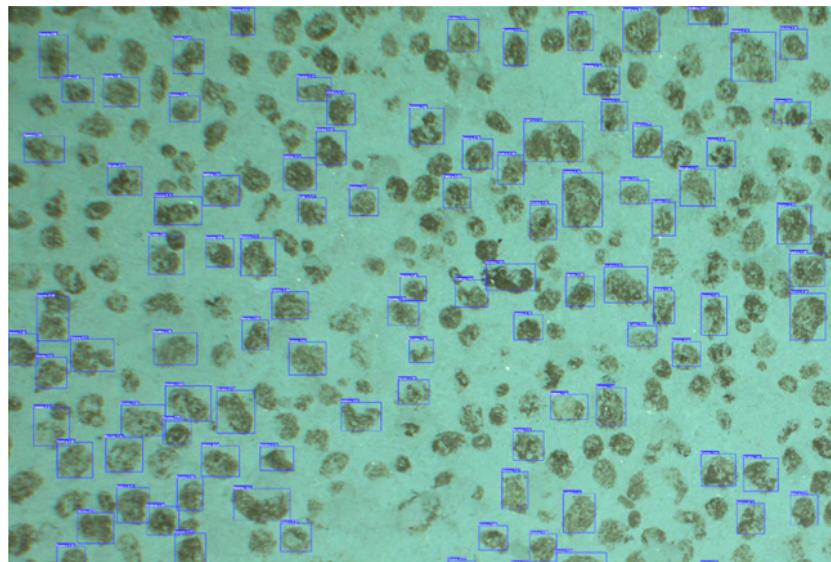
At the moment, we are developing a computer vision system for a collection mode, when the robot is in the appointed area of the bottom. The robot will be equipped with multiple cameras and lights.

The first stage of our development is aimed at identifying nodules in a picture, and determining its position. Then we choose a hardware platform for this task, to be performed and tested.

Neural network technologies are now becoming available for wide engineering practice, a large number of tools and information on their application are available, which creates favourable conditions for the development of autonomous systems. Both software and compact hardware platforms are available.

In our project, we have created a neural network model, using the YOLOv8 architecture and its Python realization, which allows us to detect objects in a photograph (Fig.). To train the model, we were provided with photographs of the bottom surface covered by FMN, though the angle and distance differ from the position of the robot when collecting nodules (Fig.).

To test the model under real shooting conditions, we have modeled the bottom surface using 3DSMax software.



The results of FMN detection in a photograph from the test sample

Preparing the data, photos, their markup and training takes more time than assembling a neural network or choosing its architecture.

To capture the FMN, you need to determine its coordinates, for this we are considering several options for using ready-made devices — 3D cameras calibrated for underwater use, and also developing our own algorithm that builds a depth map by analyzing the images from the cameras.

We note that now there is an obvious trend towards the creation of various types of chips for mass computing on embedded devices, including cellular phones. Technologies such as GPU/NPU/TPU are already built into many consumer devices and are quite compact and energy efficient. We have selected several options for embedded computers that have a built-in GPU. Next year, we are planning to use reinforcement learning methods and modeling environments to develop an algorithm for collecting FMN.

Conclusions. Artificial intelligence technologies are integrated in engineering practice in many areas of technology. Our efforts are aimed at implementing them to create an autonomous underwater unit.

The first positive results of FMN detection were obtained, at this angle the model was trained. The model performed well at all angles, which proves its versatility. We made the training on one class, the architecture allows to recognize many classes (fish and other fauna). The equipment for the integration of the neural network into the hardware was selected, which will be used in the unit prototype. We have started experiments to measure the distances and determine position of FMN relative to the robot.

METHODS FOR RESOURCE ASSESSMENT OF POLYMETALLIC MASSIVE SULPHIDE DEPOSITS (PMS)

Petukhov S.

FSBI "VNIIookeangeologia", St. Petersburg, Russia
Petukhovsi@mail.ru

To date, more than 300 deposits of massive sulfides containing a significant number of metals have been discovered in the World Ocean; however, there is a serious lack of information on their size, composition and occurrence. Nevertheless, at the present time the assessment of the ore potential of PMS deposits is a necessary condition of demonstrating the effectiveness of their exploration, and allows identifying future production sites. In this report we discuss the methods used to conduct resource assessment in the conditions of limited geological information and high geological uncertainty.

THE METHODS

Geostatistical Triple System (GTS) Resource Estimation — NTNU, AD, Norway:

- 1) determination of the probable number of possible deposits;
- 2) estimation of tonnage and grades of well-studied deposits, which are the base for building different models of inferred deposits;
- 3) probabilistic evaluation of the tonnage and content of unexplored (inferred) deposits, and their number.

The assessments are given in the form of a degree of probability of the distribution of metal resources along the ridge. The calculations use the Monte Carlo method implemented in the GeoX program (Schlumberger). C. Juliani, S. Love Ellefmo, 2018.

The Exploration Potential Estimation (EPE) method is based on a limited amount of geological information and is expressed as a range, to reflect different interpretations at a significant geological uncertainty.

Resource range analysis (RRA) to assess the results of exploration — Nautilus Minerals

At the first stage, the influence diagrams are constructed; these characterize the factors that control the size, physical and chemical properties of ore targets and the continuity

of mineralization in situ, a certain number of defining cases are modelled (Min — the minimum or most pessimistic estimate, Mid — the most realistic estimate and Max — maximum or the most optimistic estimate), which allows to demonstrate the full range of possible results. The calculations use the Monte Carlo method implemented in the Crystal Ball program on the Excel platform.

The Inventory Range Analysis (IRA) method is a formalized process for assessing potential mineralization. The method can be applied at the stage of work which is related, according to the classification of the International Authority, to category a) — estimation of the results of exploration [ISBA/21/LTC/15].

As in the previous method (GTS) the exploration potential is estimated using the IRA method on the basis of a limited scope of geological information and is expressed as a range, to reflect various interpretations with significant geological uncertainty.

Mineral Resource Estimation Using ArcGis “Surface-Volume” and “Cut and Fill” tools — Ifremer, France.

The volume of a hydrothermal mound identified using ROV data is being calculated. The volumes of the hydrothermal mounds are thought to be solid ore, as no information is yet available on the continuity of the deposit at depth.

Ifremer, 2021.

In their calculations, Ifremer contractor estimates the volume of each ore mound identified using video data from submersible vehicles.

At the first stage, the spatial boundaries of a hydrothermal hill are determined on the basis of geological and morphostructural criteria. Next, two methods for calculating the volumes of the ore hill, “Cut and Fill” and “Surface-Volume”, are used, which are implemented in the ArcGIS package.

The “Cut and Fill” calculation method is more conservative than the “Surface-Volume” method and is considered more reliable because it includes the height changes at the base of the hills. The “Surface-Volume” method contains more uncertainties in the case when the base of the hill is not horizontal. Ifremer contractor thinks that the results available at present do not allow to present an estimate of mineral resources classified in accordance with the international standards (e. g. NI 43-101, JORC) and recommendations of the Authority (ISBA/21/LTC/15)

Resource estimation using geoblocks — PMGRE, Russia; COMRA, China.

A calculation of ore reserves of individual ore bodies is carried out for selected blocks with subsequent summing up. The block must satisfy the basic provisions for the reserve blocking, i. e., it has to be geologically homogeneous, the ores must have similar technological properties, have homogeneous mining conditions; the block dimensions

have to be large enough to allow its selective extraction during production and to reduce the measurement error.

When assessing the resources, the volume of an ore body was calculated using the method of summing the volumes of the geoblocks included, calculated by the formula $V = S \times h$. The assessment of the resources of the deposits was carried out according to the formula: $Q = vd$, where: Q — ore reserves, t ; V — is the volume of the block being estimated, m^3 ; d — ore density, g/cm^3 .

COMRA are of the opinion that the PMS deposits generally have a distinct conical shape. Therefore, the conical volume ($V = 1/3 S \times h$) (Zhu et al. 2020, COMRA, China).

Resource estimation using block modeling of ore bodies — VNIIOkeangeologia, Russia.

Geological services of the mining companies in Russia are widely using the technologies for assessing mineral resources with the help of modern information systems. Among them, one of the most adapted to Russian conditions is the Mining and Geological Information System (MGIS) Micromine. The system provides a complete geostatistical analysis, the construction of three-dimensional models, with resource estimation. MGIS Micromine performs the reserve estimation using the polygonal and block methods. All work on the modeling of the ore targets and the assessment of their resources in the MGIS Micromine are based on geological and geophysical data.

Resource assessment is carried out in two stages:

1. The tabular data received from the database is converted into a graphical form, which allows one to regard them as three-dimensional objects. As a result of interpretation of this data, the sections are drawn, with their help a framework of the ore body is modeled.
2. At the final stage, an empty block model is created, limited by previously built frames and filled with elementary blocks for a more detailed description of mineralization zones within the designed volume. The result is a block model in which each elementary block has its own quantitative and qualitative characteristics. The MGIS Micromine makes it possible to assess the PMS resources more in line with reality than previously given methods.

CONCLUSIONS

Depending on the degree of knowledge of the ore fields of PMS, various methods of resource estimation are used. They vary from resource estimation methods that give the results in a probabilistic range, to resource estimation by building a block model of an ore deposit.

It should be noted that the data available to date is not sufficient to allow any assessment other than in the form of an “assessment statement” of the exploration potential of a deposit under certain geological conditions.

When the obtained data becomes sufficient to make an assessment in the category of “inferred mineral resources”*, it is advisable to carry out three-dimensional modeling of deposits with the resource assessment based on the Micromine MGIS.

* *The category of “inferred resources” suggests that the sampling and study of the concentration of a mineral are limited and insufficient for a confident interpretation of the degree of consistency of geological or qualitative characteristics [ISBA/21/LTC/15].*

PREDICTING OF FAVORABLE AREAS OF HYDROTHERMAL OCCURRENCE IN THE NORTHERN AND SOUTHERN SEGMENTS OF THE MAR

Petukhov S., Kolchina N., Seleznev A.

FSBI "VNIIookeangeologia", St. Petersburg, Russia
Petukhovsi@mail.ru

The authors study the possibility of prospecting a hydrothermal zone based on the analysis of a geomechanical (deformation) model built to study the stress — strained state of sections of the earth's crust and further analysis using the maximum entropy method (MEM) [1, 2]. The information basis for the geomechanical computer model is the data on the relief of the ocean floor.

METHODS

The prediction is based on modelling the deformation conditions favourable for hydrothermal events on the MAR, followed by the analysis of the results by the maximum entropy method. Thus, the stages of the work are as follows:

1. Modelling the distribution of shear stresses in the sea bed relief by the finite element method to identify the areas which are in the deformation conditions favourable for the hydrothermal venting.
2. Application of the method of maximum entropy to determine the areas with the highest probability of detecting PMS.

1. Modelling the deformation conditions (compression, tension) favourable for hydrothermal venting includes:

- searching for hydrothermal venting zones based on the analysis of the geomechanical (deformation) model of the earth's crust — revealing the nature of distribution of shear stresses (τ_t) in the upper layer of the earth's crust;
- selecting the sections of the earth's crust where the type of shear stresses ("tension/compression") changes, that is, when ($\tau_t = 0$).

These areas are in the "released" conditions and are thought to be the most promising.

The influence of shear strains (τ_t) on the cross-section of a fluid-conducting channel: the conductance is optimal when the cross-section of a channel is circular, which is achieved when the shear stresses are equal to zero [2].

The modelling is based on the bathymetry data loaded into a specialized program running in the Maple Software environment.

2. The obtained distribution of shear stresses is used in further analytical processing using the maximum entropy method (MME).

The concept of entropy defines the measure of probability distribution. It is believed that a distribution with a higher entropy is more likely than with a lower one. This statement comes from the fact that natural processes always tend to bring the system into a balanced state, in which entropy is maximal.

The maximum entropy method is based on the use of the data on the presence of an event of interest (hydrothermal event) in combination with various sets of relevant information or thematic layers.

Using a set of thematic coverings and coordinates with the already known manifestations of PMS, the model calculates the distribution of probability of their occurrence over the grid cells surrounding the area. In each grid cell, the value of predicted suitability of conditions for the possible formation of a deposit is determined. Here we are using a specialized program MaxEnt [1].

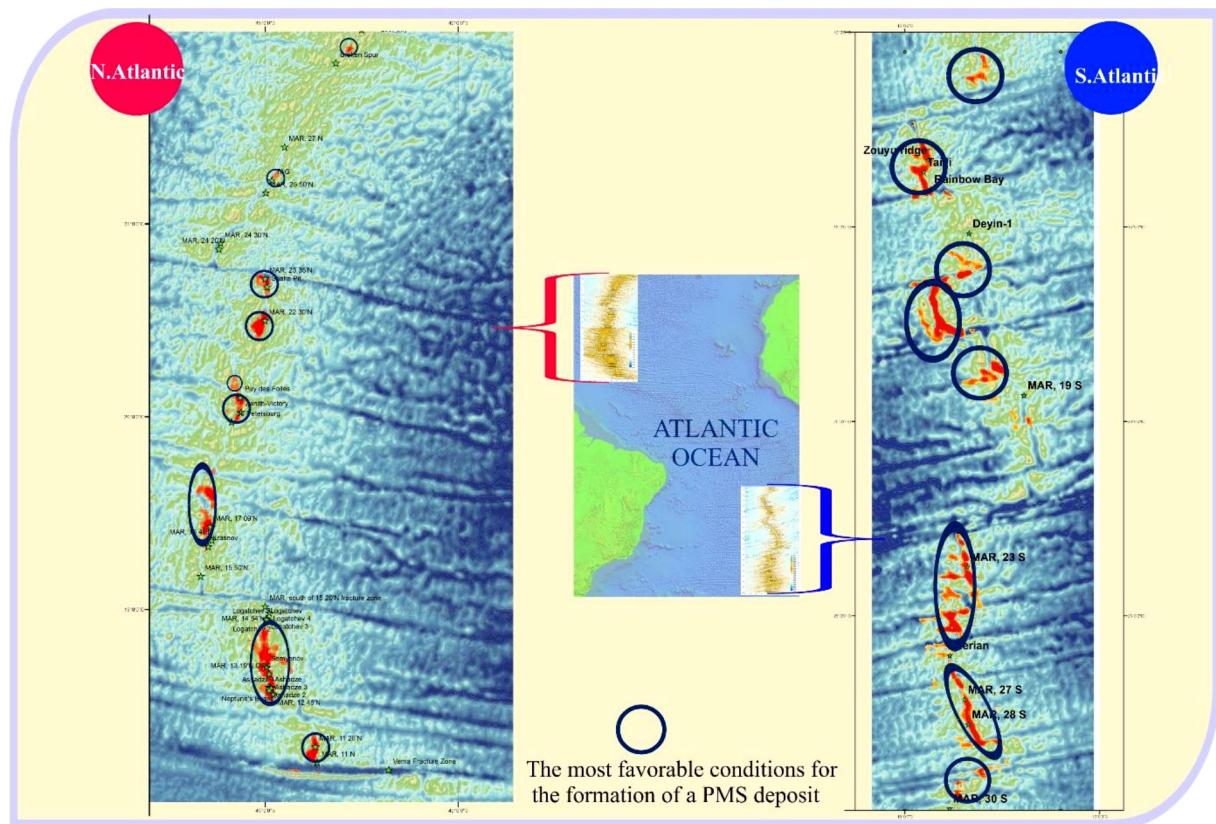
Comparison of the northern and southern parts of the MAR

The figures present a statistical model of the MAR section created by the ME method using an array of thematic layers, taking into account locations of the known PMS deposits (Fig.).

When building the models, for the clarity of comparison, similar data were used for the northern and southern parts of the MAR; no additional information available only for one part of the MAR (the northern one) was used.

The northern part is much better studied than the southern one, and it is possible that after the southern part of the MAR is further explored, the number of discovered hydrothermal events there will increase (Fig.).

In any case, the number of favourable areas identified by the modelling is almost the same.



The result of the modeling of the northern and southern parts of the MAR

Conclusions of the simulation

1. Modeling the distribution of shear stresses makes it possible to identify the promising areas for the detection of PMS.
2. To refine the prediction, it is wise to use the maximum entropy method (MEM), which creates a statistical model of the MAR area.

The statistical model, revealing the relationship between the thematic features (variables) characterizing the region, allows to adjust the location of “promising” and “not promising” zones of hydrothermal venting (Fig.).

In our opinion, the application of the maximum entropy modeling provides an additional opportunity when choosing the “perspective areas” of PMS at design stage of the works.

The works on the modeling of deformation in the parts of the mid-ocean ridges and detecting the areas favorable for finding PMS, have been conducted at VNIOkeangeologia for over 15 years. In this period we built a model of the MAR areas 10° to 40° N, the Mohns and Knipovich Ridges and 10° to 30° S. In addition, we have made modeling of areas in the South-Western and Central parts of the Indian Ridge (red rectangles). The data available to the authors confirm the effectiveness of the proposed method.

References

1. Petukhov S. I., Kolchina N. L., Seleznev A. V. Search Forthe Zones Of Hydrothermal Sulphide Mineralization Of Mid-Ocean Ridges Proceedings of the Joint International Conference on Minerals of the Ocean 9 (p. 136). SPb.: VNIIOkeangeologia, 2018.
2. Steinar L. Ellefmo, Fredrik Søreide, Georgy Cherkashov, Cyril Juliani, Krishna Kanta Panthi, Sergey Petukhov, Irina Poroshina, Richard Sinding-Larsen, Ben Snook. Quantifying the Unknown // Marine Mineral Resource Potential on the Norwegian Extended Continental Shelf. 2019. DOI: <https://doi.org/10.23865/noasp.81>.
3. “Mid-Ocean Ridge Polymetallic Sulphide Exploration Method and Technology” (Tao Chunhui et al. Beijing: Science Press, 2018.11). ISBN 978-7-03-059026-8.

《洋中脊多金属硫化物勘查方法与技术》(陶春辉等著. 北京：科学出版社, 2018.11.)

STUDIES ON SPECIFIC SURFACE AREA OF POLYMETALLIC NODULES: PRETREATMENT FOR ANALYSIS AND CONTROL FROM GENESIS

Ren Xiang-Wen^{1,2}, Li Hao-Nan³, Shi Xue-Fa^{1,2}, Zhu Ai-Mei^{1,2}

¹ Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

² Laboratory for Marine Geology, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

³ College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

renxiangwen@163.com

Abstract: Polymetallic nodules (nodules) are predominant deep-sea mineral resources due to the enrichment of critical metals such as Co, Ni, Cu, and REEs. Nodules are loose and porous in texture, which is the fundamental feature that contributes the adsorption and then enrichment and mineralization of trace metals from seawater and porewater. Furthermore, this feature has potential to be utilized in industrial water purification by adsorption. Therefore, specific surface area (SSA) is one of key factors deserved further study. At present, the technology and methods for analyzing SSA are well-developed. However, it is less applied in the analysis of the specific surface of polymetallic nodules, and the pretreatment conditions are various according to various research targets. Consequently, the researches on controls of SSA of nodules are still needs to be investigated. In order to achieve the SSA of nodules and to investigate controls, this study explored the pretreatment conditions for the BET SSA analysis of polymetallic nodules, and analyzed the mineralogy and geochemistry of nodules from various areas in deep oceans.

The polymetallic nodules from the Atlantic, Indian, and Pacific oceans were recovered for this study. The pretreatment conditions including temperature, duration, and particle size for BET SSA analysis of polymetallic nodules were studies by applying temperature programming, heating accumulating, and particle size comparing methods. Mineralogical compositions of nodules were analyzed by XRD, and geochemical concentrations were determined by ICP-MS and ICP-OES. The results show that the analysis values of SSA reach plateau when the heating temperature is above 210 °C till 350 °C; The analysis values of SSA keep constant after heating for 3 hours by a step of 1 hour at 210 °C. The SSA values of samples with a size of several millimeters are 1.027~28.535 m²/g higher compared with those of the same samples crushed into hundreds of microns.

The SSA of nodules correlated positively with Co, δ Ce, and LREEs, and negatively with intensity of XRD 10Å peak, Ni, and Cu. The SSA of nodules from the western Pacific is 329.440~418.711 m²/g, comparable to the SSA of Co-rich crusts. We suggest that constant BET SSA values can be obtained when the polymetallic nodules with sizes of several millimeters are heated in vacuum system for 3 hours at 210 °C, which is the pretreatment condition to analyze BET SSA of polymetallic nodules for the research of the mineralization. We proposed that SSA of nodules is controlled by its genesis, and hydrogenetic nodules have higher SSA.

Key words: Specific surface area, polymetallic nodules, controls, Atlantic, Indian, and Pacific oceans, genesis.

Acknowledgments: This study is financially supported by the Marine S&T Fund of Shandong Province for Laoshan Laboratory (No. 2021QNLM020003-2), and the COMRA (No. DY135-N2-1-04).

GLOBAL DISTRIBUTION AND METALLOGENY OF DEEP-SEA REY-RICH SEDIMENTS

Shi Xuefa^{1, 2}, Huang Mu^{1, 2}, Yu Miao^{1, 2}, Bi Dongjie^{1, 2},
Zhou Tiancheng^{1, 2}, Liu Jihua^{1, 2}, Ren Xiangwen^{1, 2}

¹ Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography,
Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

² Laboratory for Marine Geology, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China
xfshi@fio.org.cn

Abstract: In recent years, the REY-rich (including rare earth elements (REE) and Yttrium (Y)) sediment discovered in the deep-sea is widely regarded as a new type of marine mineral resource, which is characterized by considerably higher contents of middle and heavy rare-earth elements. The estimated quantity of deep-sea REY resource is far more than the terrestrial REY reserves, which makes it highly important as a potential resource for future exploitation. Since 2011, large areas of REY-rich sediments have been sequentially discovered by Chinese scientists in the central India Basin, the southeastern Pacific Basin, and the western Pacific Basin. In general, four metallogenic belts are preliminarily identified in the Open Ocean, including the western Pacific Ocean metallogenic belt, the central and eastern Pacific Ocean metallogenic belt, the southeastern Pacific Ocean metallogenic belt, and the central Indian Ocean-Wharton basin metallogenic belt. The REY-rich sediments are mainly zeolite clay and pelagic clay developed in the deep-sea basin, and the REY enrichment was mainly caused by authigenic process. Moreover, the REY-rich sediments deposited near the mid-ocean ridge were also affected by the hydrothermal processes. Previous studies have shown that bioapatite is the most important host phase of REY in the deep-sea sediments, which takes up the REY from ambient seawater and porewater. The redistribution of REY happened in the early diagenesis process, and REY was transferred from its original binding phase to the bioapatite, eventually. It is suggested that the deep waterdepth (beneath the carbonate compensation depth), low sedimentation rate, and active bottom currents are principal controlling factors leading to large-scale enrichment of the REY in deep-sea sediments. Considering the similar water depth and ecological environment, deep-sea REY-rich sediments would be mined together with polymetallic nodules as the first commercially-exploited deep sea minerals.

Key words: deep-sea REY-rich sediments; global distribution; metallogeny; controlling factors.

Acknowledgments: This study is jointly supported by the NSFC (No. 91858209), the COMRA (No. DY135-R2-1-01), and the Taishan Scholar Project Funding (tspd20181216).

INFLUENCE OF INTERACTION OF HYDROTHERMAL AND MAGMATIC SYSTEMS ON THE GEOCHEMICAL SEGMENTATION OF THE MID-ATLANTIC RIDGE

Silantyev S. A.

Vernadsky Institution of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
silantyev@geokhi.ru

The discovery of signs of geochemical segmentation in the basaltic layer of the MAR Axial Zone [2, 5, 14, 17] stimulated research aimed at elucidation of the nature of mantle reservoirs generating MORB. The character of the distribution of geochemical parameters in MORB chilled glasses along the strike of the MAR axis (e. g. K_2O/TiO_2) reflects the alternation of its geochemically enriched segments (composed of E-MORB) with segments of the development of predominantly N-MORB (depleted MORB). At the same time, the distribution along the MAR axis of the petrological and geochemical parameters of mantle peridotites associated with basalts (e. g. Cr# in Spinel) is consistent with the segmentation manifested in MORB [18]. Another fundamental feature of the Axial Zone of the MAR is the wide distribution of signs of hydrothermal activity here, which contributes to the formation of large hydrothermal ore occurrences. The nature of the observed correlations between signs of rheological and geochemical segmentation of the MAR [21] indicates that two main geodynamic scenarios are realized in the axial zone of this spreading center: 1) Formation in “hot” segments MAR of normal basalt crust (“Penrose type”); and 2) Formation of a crust in the “cold” segments of the MAR, in structure of which mainly residual peridotites and minor gabbro take a part and manifestation of basaltic magmatism are reduced or absent (“Hess type”). In accordance with this pattern, the hydrothermal fields and ore occurrences of the MAR form two families: 1) located in the basaltic substrate — e. g. Broken Spur, Snake Pit, TAG, Lucky Strike, Surprise, Yubileinoye, Zenit-Victoria; and 2) occurred in serpentinite (ultramafic) substrate — e. g. Ashadze, Semenov, Logachev, Rainbow. Thus, there is an undoubted relationship between MAR hydrothermalism and its geochemical segmentation [1, 7, 9, 10]. From this feature of the distribution of two different types of hydrothermal fields along MAR axis an important conclusion follows that the formation of basalt hosted hydrothermal systems occurs in a cooling lithosphere setting while serpentinite hosted ones are formed during heating of a cold lithosphere.

The purpose of this study was to compare the geochemical features of MORB chilled glasses sampled in the areas of the MAR Rift Valley with different structure of the crustal section (basaltic or serpentinite). Thus the data on geochemical parameters of the studied samples make it possible to obtain information not only on the composition of their parental melts but also to evaluate possible geochemical effects reflecting the interaction of magmatic and hydrothermal systems of the MAR. The samples examined were taken in six regions of the MAR Axial Zone located between 30° and 12°N. According to [12, 21] these areas are characterized by a different structure of the oceanic crust: One of them includes segments of the MAR composed of basalts predominantly (30°—31°N, 26°N, 20°—21°N and 16°—18°N); another group includes segments within which serpentinites outcrops are prevailing (12°—14° and 14°—15°N) (Fig. 1a). Variations in the composition of studied chilled glasses shown in Fig. 1b demonstrate that samples examined correspond to the entire spectrum of MORB geochemical types and include glasses formed at different degrees of fractionation of tholeiitic melts. Data on REE geochemistry indicates that samples of glasses taken in the MAR segments between 31°N and 12°N belong to two main groups: one of them includes samples characterized by $(La/Sm)_{cn} \leq 1$; and another — $(La/Sm)_{cn} \geq 1$. It is remarkable that almost all glasses with signs of LREE enrichment were sampled in MAR segments between 12°N and 15°N where located massive serpentinites outcrops.

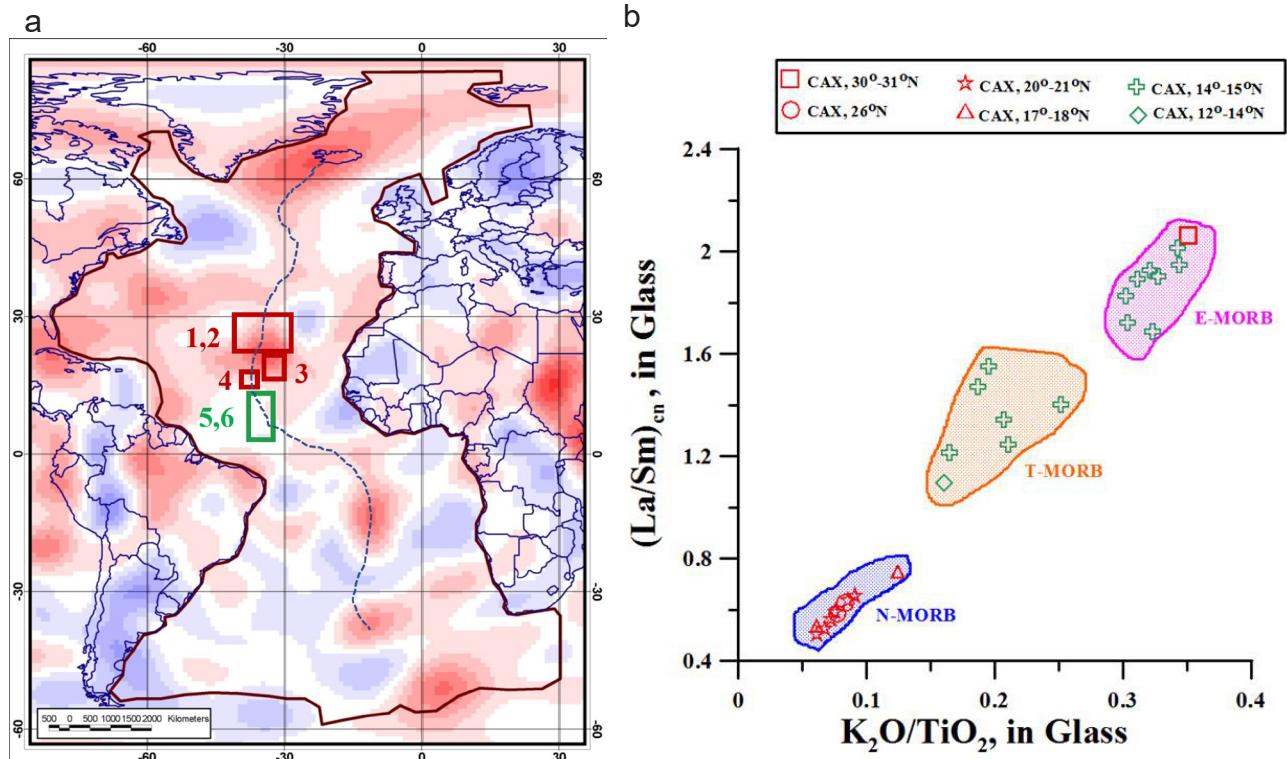


Fig. 1. a — Horizontal section of variations in seismic S-wave propagation velocities along axis of the MAR at the depth of 300 km [3, 11]. Sampling areas of basaltic glasses examined shown as in [20] Red contours corresponds to basaltic segments of the MAR; green ones — to segments in which the oceanic crust composed mainly of serpentinites. Numbers indicate groups of samples belonging to different regions of the MAR axial zone; b — Variations in K_2O/TiO_2 and $(La/Sm)_{cn}$ ratio in the studied glasses; green crosses shown after data for glasses from MAR between 13° N and 14° N studied in [15]; filled red circles corresponding glasses from 12° N and 34° N studied in [19]

Some authors have reported evidence of contamination of MORB parental melts with volatile components of marine or atmospheric origin under conditions of a magma chamber or during their quenching during an outcropping on the seafloor [6, 8, 13]. To assess the possible impact of such contamination on the composition of studied glasses data by content of Cl and U have been used. These elements are most mobile in the process of interaction of the oceanic crust substrate with sea water and its hydrothermal derivates. The absence of a correlations between the contents of Cl and U with contents of Sr and MgO in the samples from the MAR segments composed of basalts may indicate that the contents of Cl and U in N-MORB glasses do not show significant variations and do not depend on the fractionation process of the parental melt. In contrast, wide variations in the content of Cl and U and its positive correlations with the content of Sr have been established in chilled glasses obtained from the MAR segments where serpentinites are widespread. It should be noted that since U and Sr are characterized by sharply different mineral/melt distribution coefficient mentioned above correlation is not associated with the effect of fraction crystallization and possibly reflects the contamination of the melt with hydrothermal fluid of sea water origin.

If we consider the above data in the context of existing knowledge on the structure and composition of the lithosphere of the MAR axial zone between 12°N and 31°N we can conclude that almost all chilled glasses belonging to the E-MORB family were sampled in “cold” segments, the crustal section of which composed mainly serpentinites (Fig. 2a). It is in these segments that signs of contamination of the parental melts for MORB by the hydrothermal component were established (Fig. 2b). It should be emphasized that all

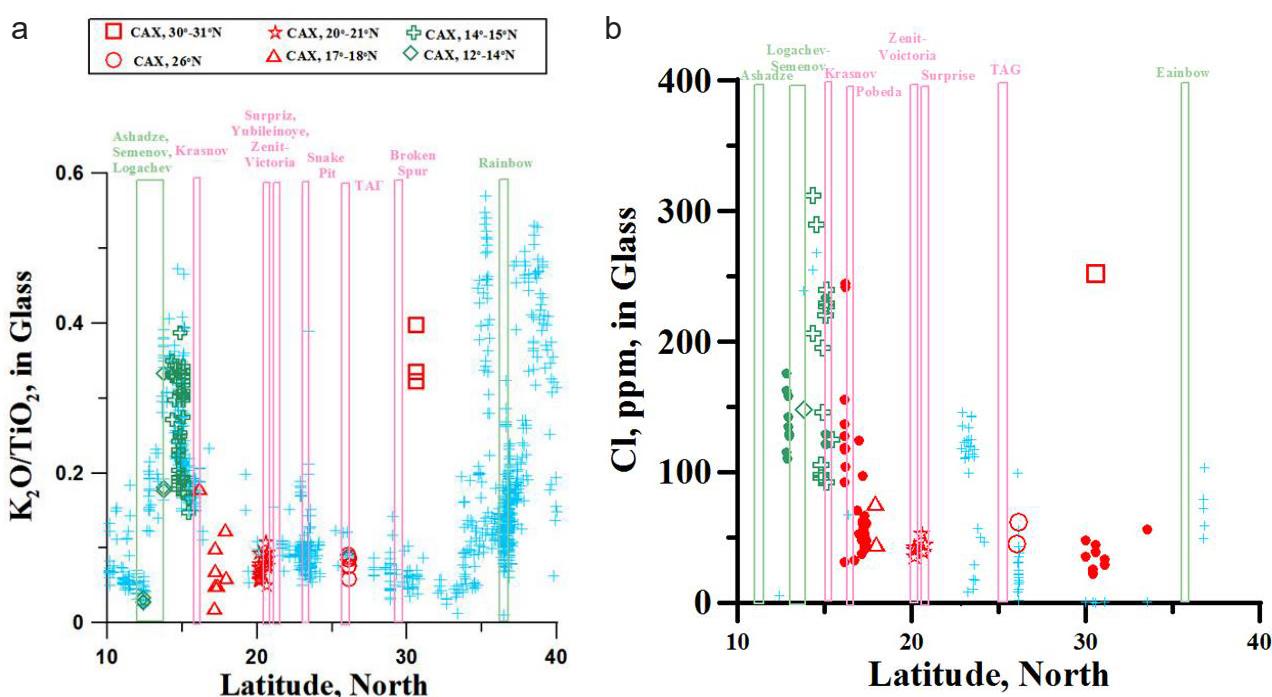


Fig. 2. The nature of the distribution along MAR axis between 10° N and 40° N values of the K_2O/TiO_2 parameter (a) and Cl content (b) in MORB chilled glasses. Blue crosses correspond to data borrowed from [16]. Localities of serpentinite hosted hydrothermal fields shown in green, and basalt hosted ones in red

currently known geochemical types of MORBs are closely associated in some areas of the MAR axial zone. This phenomenon reflects a fundamental feature of the MAR which is manifested in two types of its segmentation: large scale and small scale. The first type reflects the thermal and the rheological state of the mantle substrate that generates parental melts for MORB. Small scale segmentation is related with processes occurring within the crustal section of the MAR axial zone and associated with interaction of magmatic and hydrothermal systems. Precisely such processes possibly can provide the appearance of geochemical characteristics in Rift Valley basalts which are interpreted in many works as a consequence of recycling (e. g. [12]).

At last time, due to numerous finds of Zircon with very old age in plutonic rocks sampled at MAR axial zone, a number of authors suggest that relics of ancient continental lithosphere preserved under the axial zone of the ridge and involved in processes of partial melting of the shallow mantle (e.g. [4]). It can be assumed that the participation of relics of the ancient continental lithosphere in magmatism of MAR Rift Valley can provide the formation of geochemical signatures in some MORB that are indicative of enriched basalts belonging to E-MORB family. Perhaps “cold” segments of MAR are favorable for formation of long lived magma chamber inside the oceanic crust. This style of magmatism in the Slow-Spreading Centers that is the MAR contributes to the contamination of basalt melts with components borrowed either from host serpentinites or from aqueous-saline fluids circulating in serpentinite hosted hydrothermal systems.

This study was made in the framework of government financed project no. 0137-2019-0012 “Petrology, Geochemistry, and Geodynamics of Formation and Evolution of Lithosphere of Oceans and Continents” and supported by grant of RSF N 22-27-00815.

References

1. Andreani M., Escartin J., Delacour A., Ildefonse B., Godard M., Dymant J. et al. Tectonic structure, lithology, and hydrothermal signature of the Rainbow massif (Mid-Atlantic Ridge 36° N) // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2014. Vol. 15. P. 3543—3571.
2. Dmitriev L. D. Variation of composition of the Mid-Ocean Ridge basalts as function of geodynamic setting of their formation // *Petrology*. 1998. Vol. 6 (4). P. 269—286.
3. Dmitriev L. V., Sokolov S. Yu. Geodynamics of three contrasting type of oceanic magmatism and its reflection in data of seismic tomography // *Petrology*. 2003. Vol. 11 (6). P. 655—672.
4. Bortnikov N. S., Silantyev S. A., Bea F., Montero P., Zinger T. F., Skolotnev S. G., Sharkov E. V. Multiple Melting of a Heterogeneous Mantle and Episodic Accretion of Oceanic Crust in a Spreading Zone: Zircon U-Pb Age and Hf-O Isotope Evidence from an Oceanic Core Complex of the Mid-Atlantic Ridge // *Petrology*. 2022. Vol. 30 (1). P. 1—24.
5. Bougault H., Dmitriev L., Schilling J.-G. et al. Mantle heterogeneity from trace elements: MAR triple junction near 14° N // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1988. Vol. 88. P. 27—36.
6. Broadley M. W., Burgess R., Kumagai H., Curran N.M., Ballentine C. J. Halogen variations through the quenched margin of a MORB lava: Evidence for direct assimilation of seawater during eruption // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2017. Vol. 18. P. 2413—2428.
7. Bogdanov Yu. A., Lisitsyn A. P., Sagalevich A. M., Gurevich E. G. Hydrothermal Ore Formation on the Seafloor. M.: Nauka, 2006. 527 p.

8. *Buikin A. I., Silantyev S. A., Verchovsky A. B.* N-Ar-He-CO₂ systematics combined with H₂O, Cl, K abundances in MORB glasses demonstrate interaction of magmatic and hydrothermal systems: a case for MAR at 16°07'—17°11'N // *Geochem Int.* 2022. Vol. 60 (11). P. 1068—1086.
9. *Cherkashov G., Poroshina I., Stepanova T.* et al. Seafloor Massive Sulfides from the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge: New Discoveries and Perspectives // *Marine Georesources and Geotechnology*. 2010. Vol. 28 (3). P. 222—239.
10. *Firstova A., Stepanova T., Cherkashov G., Goncharov A., Babaeva S.* Composition and Formation of Gabbro-Peridotite Hosted Seafloor Massive Sulfide Deposits from the Ashadze-1 Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge // *Minerals*. 2016. Vol. 6, N 19. DOI: 10.3390/min6010019.
11. *Grand S. P.* Mantle Shear-Wave Tomography and the Fate of Subducted Slabs // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 2002. Vol. 360. P. 2475—2491.
12. *Hemond C., Hofmann A. W., Vlastelic I., Nauret F.* Origin of MORB enrichment and relative trace element compatibilities along the Mid-Atlantic Ridge between 10° and 24° N // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2006. Vol. 7 (12). Q12010.
13. *Kendrick M. A., Kamenetsky V. S., Phillips D., Honda M.* Halogen systematics (Cl, Br, I) in Mid-Ocean Ridge Basalts: A Macquarie Island case study // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012. Vol. 81. P. 82—93.
14. *Klein E. M., Langmuir C. H.* Global correlations of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness // *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. P. 8089—8115.
15. *Pertsev A. N., Aranovich L. Ya., Prokofiev V. Y.* et al. Potassium-rich granite melt inclusions in zircon from gabbro-hosted felsic stringers, Mid-Atlantic Ridge at 13°34'N: E-MORB connection // *Lithos*. 2021. P. 400—401.106300.
16. RIDGE Petrological Data Base, LGEO, 1999.
17. *Schilling J.-G., Zajac M., Evans R.* et al. Petrologic and geochemical variations along the Mid-Atlantic Ridge from 27°N and 73°N // *Amer. J. Sci.* 1983. Vol. 283. P. 510—586.
18. *Silantyev S. A.* Variations in the Geochemical and Isotopic Characteristics of Residual Peridotites along the Mid-Atlantic Ridge as a Function of the Nature of the Mantle Magmatic Sources // *Petrology*. 2003. Vol. 11 (4). P. 305—326.
19. *Silantyev S. A., Danyushevsky L. V., Plechova A. A., Dosso L., Bazylev B. A., Beltenev V. E.* Geochemical and Isotopic Signatures of Magmatic Products in the MAR Rift Valley at 12°49'—17°23'N and 29°59'—33°41'N: Evidence of two contrasting Sources of the Parental Melts // *Petrology*. 2008. Vol. 16 (1). P. 36—62.
20. *Silantyev S. A., Buikin A. I., Tshovrebova A. R., Shabykova V. V., Beltenev V. E.* Composition variations of MORB chilled glasses 12°—31°N : An Reflection of evolution of parental melts and influence of hydrothermal component // *Petrology*. 2023. In press.
21. *Sokolov S. Yu., Chamov N. P., Khutorskoy M. D., Silantyev S. A.* Intensity indicators of geodynamic processes along the Atlantic-Arctic Rift System // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020. Vol. 11 (2). P. 302—319.
22. *Sun S.-S., McDonough W. F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in Ocean Basins*. Eds. Saunders A. D., Norry M. J. // *Geol. Soc. Spec. Publ.* London. 1989. Vol. 42. P. 313—345.

PROCESSING OF DEEP-SEA MINERALS: REVIEW OF RUSSIAN STUDIES

Skakovski V.

FSBI “VNIIookeangeologia”, St. Petersburg, Russia
v.skakovski@vniio.ru

In accordance with the requirements of the Contract for the exploration of deep-sea minerals, concluded between the International Seabed Authority (ISA) and the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, one of the most important stages of work is their metallurgical processing. As a result of appropriate studies, one or two of the most promising schemes for metallurgical processing should be identified, specifically tied to the areas of distribution of certain deep-sea minerals.

Obviously, the accompanying task of this report is acquaintance the listeners with the main results of Russian studies in this field, whose active phase began in the USSR, in the 80s of the XX century. Since the 90s, research has been continued on the basis of several enterprises and institutions of the Russian Federation, and many technological schemes have been improved.

The processing issues under consideration relate to three main types of minerals — *polymetallic sulphides* (PMS), *polymetallic nodules* (PMN) and *cobalt-rich ferromanganese crusts* (CFC).

The main technological schemes used for the *separate* processing of deep-sea minerals are divided into:

- *combined pyro-hydrometallurgical*;
- *hydrometallurgical*.

Pyro-hydrometallurgical schemes generally involve roasting or melting of the raw material with further its leaching processing, while *hydrometallurgical* schemes involve leaching the raw material without prior heat treatment. At the same time, it should be noted that for CFC, due to certain features of the chemical composition, only hydrometallurgical processing models are suitable, while for PMS and PMN, on the contrary, both options are possible, with their own advantages and disadvantages.

In addition to separate processing of raw materials, there are promising theoretical models for their co-processing — on the example of PMN and PMS, which showed significant cost savings on the chemical leaching line.

The logic and mechanisms of hydrometallurgical operations of both types of technological schemes of processing, in essence, differ slightly, however, there is a variety in the chemical leaching agents used for these purposes and the physical conditions of the technological process — in strict dependence on the type of raw material, its structural and mineralogical features.

As a result of the work carried out to collect, analyze and evaluate the results of national studies, an attempt was made to identify new areas of research and possible adjustment of existing models — taking into account the readiness of the Russian industry for the technical feasibility of these works on an industrial scale and in accordance with the latest achievements in the development of technology deep-sea minerals processing.

References

1. *Romanchuk A. I., Maniaf A. B., Kobotsev V. M. et al. (1991) Razrabotat' tekhnologiyu izvlecheniya tsennykh komponentov iz kobal'to-margantsevykh korok Tikhogo okeana [Develop a technology for extracting valuable components from the cobalt-manganese crusts of the Pacific Ocean]. Report: Moscow, TSNIGRI.*
2. *VIMS (2009). Mineralogo-geokhimicheskie metody izucheniya zhelezomargantsevykh rud Mirovogo okeana [Mineralogical and geochemical methods for studying the ferromanganese ores of the World Ocean]. Moscow.*
3. *Romanchuk A. I., Ermolov V. M. et al. (1989) Pererabotka zhelezomargantsevykh konkretsii Mirovogo okeana [Processing of ferromanganese nodules of the World Ocean]. Report: Moscow, TSNIGRI.*
4. *Abramowski T., Cabello M. Marante Identification and determination of factors encountered in marine minerals processing, influencing world metal markets. ISA — IOM Workshop, Warsaw, Sept 3—5, 2018.*
5. *Romanchuk A. I., Ivanovskaya V. P. (2004) Sposob pererabotki podvodnykh zhelezomargantsevykh rud [Method for processing deep-sea ferromanganese ores]. Patent RF № 2231569.*
6. *Romanchuk A. I., Koshel' D. Ya., Kareva A. V. (2015) Tekhnologicheskie issledovaniya laboratornoi proby ZHMK s tsel'yu utochneniya perechnya poleznykh poputnykh komponentov [Technological studies of a laboratory sample of FMN in order to clarify the list of useful associated components]. Report: Moscow, TSNIGRI.*
7. *Romanchuk A. I., Koshel' D. Ya., Kareva A. V., Yubko V. M., Ponomareva I. N. Izvlechenie poputnykh komponentov iz okeanicheskikh zhelezomargantsevykh konkretsii (ZHMK) [Extraction of associated components from oceanic ferromanganese nodules (FMN)]. Rudy i metally // Ores and metals. 2016. N 3. P. 72—78.*
8. *Romanchuk A. I., Ivanovskaya V. P., Korolev A. B. et al. (2002) Otchet po NIR "Issledovat' otdel'nye elementy tekhnologii dobychi i pererabotki ZHMK". Etap "Razrabotat' tekhnologicheskii reglament selektivnogo vyshchelachivaniya poleznykh komponentov iz ZHMK". [Research report "Investigate individual elements of the technology for the extraction and processing of FMN". Stage "Develop technological regulations for the selective leaching of useful components from FMN"].*

9. *Romanchuk A. I., Ivanovskaya V. P., Korolev A. B. et al.* (2003) Otchet po NIR "Issledovat' otdel'nye elementy tekhnologii dobychi i pererabotki ZHMK". Etap "Razrabotka i optimizatsiya tekhnologii polucheniya kontsentratov tsvetnykh metallov iz produktivnykh rastvorov vyshchelachivaniya ZHMK". [Research report "Investigate individual elements of the technology for the extraction and processing of FMN". Stage "Development and optimization of the technology for obtaining non-ferrous metal concentrates from productive solutions of FMN leaching"].
10. *Romanchuk A. I., Ivanovskaya V. P., Korolev A. B. et al.* (2003) Otchet po NIR "Issledovat' otdel'nye elementy tekhnologii dobychi i pererabotki ZHMK". Etap "Razrabotka sposobov polucheniya margantsevykh produktov razlichnogo sostava i naznacheniya iz produktivnykh rastvorov vyshchelachivaniya ZHMK". [Research report "Investigate individual elements of the technology for the extraction and processing of FMN". Stage "Development of methods for obtaining manganese products of various composition and purpose from productive solutions of FMN leaching"].
11. *Romanchuk A. I., Ivanovskaya V. P., Korolev A. B. et al.* (2004) Otchet po NIR "Issledovat' otdel'nye elementy tekhnologii dobychi i pererabotki ZHMK". [Research report "Investigate individual elements of the technology for the extraction and processing of FMN"]. Kniga 1. Vol. 1.
12. *Romanchuk A. I., Ivanovskaya V. P.* (2002) Sposob pererabotki podvodnykh zhelezomargantsevykh rud. [Method for processing deepsea ferromanganese ores]. Patent RF N 2184163. C22B47/00.
13. *Samovarov M. L. et al.* (nov. 2015) Poiskovye raboty na ploshchadi Rossiiskogo razvedochnogo raiona v Atlanticheskem okeane s otsenoi prognoznykh resursov GPS kategorii R2 v blokakh 13—14, 18—30. [Exploration work at the Russian Exploration Area in the Atlantic Ocean with an assessment of the predicted resources of the SMS category P2 in blocks 13—14, 18—30]. FGUNPP PMGRE — FSURPE PMGE. Lomonosov.
14. *Bel'tenev V. E. et al.* (2014) Regional'nye raboty mashtaba 1:500 000—1 000 000 na glubokovodnye polimetallichесkie sul'fidy (GPS) v osevoi zone SAKH i poiskovye raboty na rudnom uze Ashadze-2. [Regional works on a scale of 1:500 000—1 000 000 on deep-sea seafloor polymetallic massive sulfides (SMS) in the axial zone of the MAR and prospecting at the Ashadze-2 ore cluster]. Fondy AO PMGRE — SV PMGE's Stocks. Lomonosov.
15. *Rozhdestvenskaya I. I. et al.* (2014) Poiskovye raboty na ploshchadi Rossiiskogo razvedochnogo raiona v Atlanticheskem okeane s otsenoi prognoznykh resursov GPS kategorii R2 v blokakh 1—12, 15—17. [Exploration works at the Russian Exploration Area in the Atlantic Ocean with an assessment of the predicted resources of the SMS category P2 in blocks 1—12, 15—17]. Fondy AO PMGRE — SV PMGE's Stocks. Lomonosov.
16. *Romanchuk A. I., Ivanovskaya V. P. et al.* (2005) Tekhnologicheskie ispytaniya proby glubokovodnykh sul'fidov rudoproyavleniya 12°58' s.sh. (Ashadze). [Technological testing of a sample of deep-sea sulfides of the ore occurrence 12°58'N (Ashadze)]. Report: Moscow, TSNIGRI.
17. *Romanchuk A. I., Koshel'D. Ya.* (2018) Sovmestnaya kompleksnaya pererabotka glubokovodnykh polimetallichесkikh sul'fidov i zhelezomargantsevykh obrazovanii Mirovogo okeana. Rol' tekhnologicheskoi mineralogii v ratsional'nom nedropol'zovanii // Materialy Rossiiskogo soveshchaniya s mezhdunarodnym uchastiem 15—16 maya 2018. [Complex co-processing of deep-sea polymetallic sulphides and ferromanganese formations of the World Ocean. The role of technological mineralogy in rational subsoil use. Materials of the Russian meeting with international participation May 15—16, 2018].

GEOCHEMICAL FEATURES IN SEAFLOOR MASSIVE SULFIDES ASSOCIATED WITH DIFFERENT TYPES OF HOST ROCKS (RUSSIAN EXPLORATION AREA, MAR)

Sukhanova A. A., Firstova A. V., Stepanova T. V., Cherkashov G. A.

FSBI “VNIIookeangeologia”, St. Petersburg, Russia
sukhanova.anna.ru@gmail.com

Seafloor massive sulfides (SMS) of Russian Exploration Area (REA) within Mid-Atlantic Ridge (MAR) are represented by massive sulfides, sulfide breccias and stockwork mineralization, where the major minerals are pyrite, chalcopyrite, sphalerite; the minor — isocubanite, marcasite, covellite, bornite with different geochemical enrichment: Fe-rich, Cu-rich, Cu-Zn-rich, Cu-Fe-rich.

SMS at MAR are associated with different types of host rock: rocks of ultramafic gabbro-peridotite complex (Logatchev-1, Irinovskoye, Ashadze-1, Ashadze-2, Semenov-1), mafic (basalts) (Jubileynoye, Zenith-Victoria, Krasnov, Semenov-4), and, rarely, both ultramafic and mafic rocks (the Semenov-5 and Semenov-2 hydrothermal fields).

Seafloor massive sulfides associated with ultramafic-hosted rocks are primarily composed of chalcopyrite, isocubanite, sphalerite, and pyrrhotite. They characterized by high concentrations of copper (22.05%), zinc (9.01%), and enriched by trace elements (Fig. 1, 2). Compared to other types of SMS, the massive sulfides of REA MAR associated with gabbro-peridotites are enriched in Co (1293 ppm), Sn (215 ppm), Cd (159 ppm), As (219 ppm), Mn (315 ppm), V (139 ppm) and In (7.14 ppm).

Seafloor massive sulfides associated with mafic-hosted rocks are primarily composed of pyrite and has low Cu + Zn concentrations (<2%). Compared to the massive sulfides associated with gabbro-peridotites, the massive sulfides located on basalts have lower contents of major and trace elements (Fig. 1, 2).

Semenov-2 and Semenov-5 hydrothermal fields related to both types of host rocks — basalts and gabbro-peridotites. SMS from these hydrothermal fields are enriched in Ni (221 ppm), Se (321 ppm), Ag (113 ppm), Cr (165 ppm), Mo (135 ppm), Bi (10.7 ppm), Ga (22.6 ppm), Ge (199 ppm), Au (15 ppm) and Te (13 ppm).

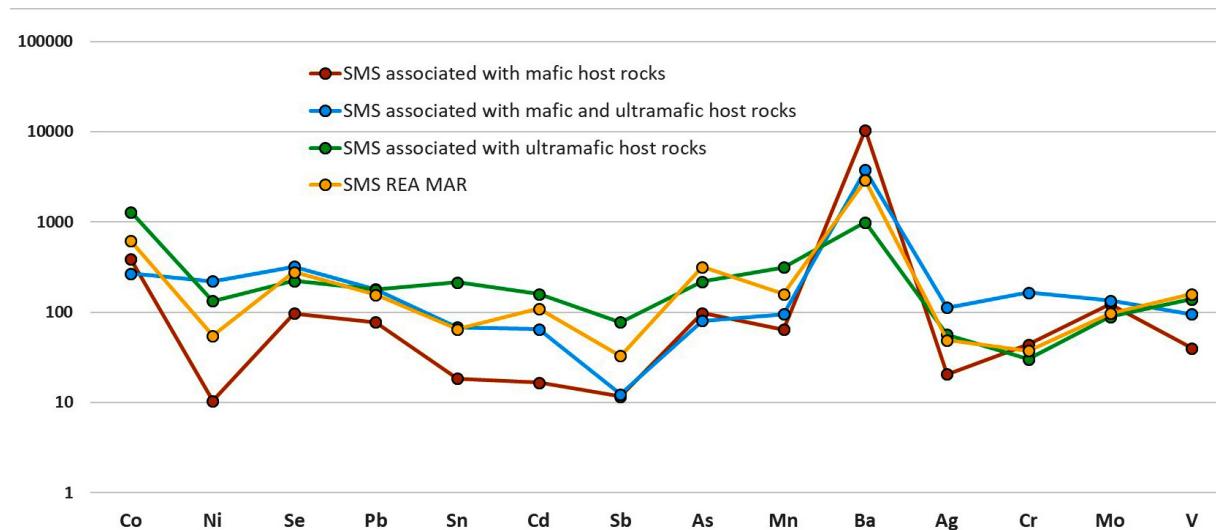


Fig. 1 Major and trace elements of the massive sulfides associated with basalts, gabbro-peridotites, basalts + gabbro-peridotites in comparison with the average contents in the massive sulfides from the REA MAR (DB REA-PMS IAS “Oceangeoresources”)

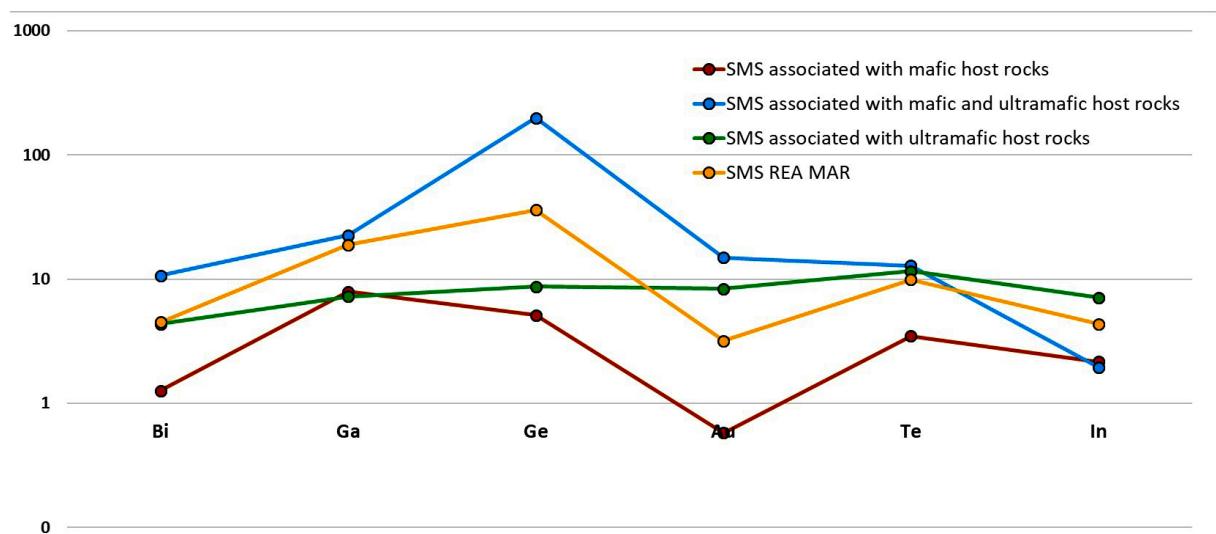


Fig. 2. Trace elements of the massive sulfides associated with basalts, gabbro-peridotites, basalts + gabbro-peridotites in comparison with the average contents in the massive sulfides from the REA MAR (DB REA-PMS IAS “Oceangeoresources”)

Semenov-2 hydrothermal field is unique hydrothermal field in Russian Exploration Area, which is located on mafic, ultramafic, and felsic rocks within OCC [1—3]. Previous studies discovered significant Au (up to 188 ppm) and Te (up to 96 ppm) enrichment in SMS from the Semenov-2 hydrothermal field [1]. Such a unique enrichment of Au and Te could be associated with input from different source rocks (mafic, ultramafic, and felsic) and favourable environments for Au and Te precipitation (temperature of the fluid, mixing with seawater and the mechanism of deposition) [1].

References

1. Firstova A., Stepanova T., Sukhanova A., Cherkashov G., Poroshina I. Au and Te Minerals in Seafloor Massive Sulphides from Semyenov-2 Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge // Minerals. 2019. Vol. 9. P. 294.
2. Escartín J., Mevel C., Petersen S., Bonnemains D., Cannat M., Andreani M., Godard M. Tectonic structure, evolution and the nature of oceanic core complexes and their detachment fault zones (13°20'N and 13°30'N, Mid Atlantic Ridge) // Geochem. Geophys. Geosystems. 2017. Vol. 18. P. 1451—1482.
3. Pertsev A. N., Bortnikov N. S., Vlasov E. A., Beltenev V. E., Dobretsova I. G., Ageeva O. A. Recent massive sulphide deposits of the Semenov ore district, Mid-Atlantic Ridge, 13°31'N: Associated rocks of the oceanic core complex and their hydrothermal alteration // Geol. Ore Depos. 2012. Vol. 54. P. 334—346.

INTRODUCTION TO SINO-RUSSIAN COOPERATION IN THE FIELD OF OCEAN MINERAL RESOURCES

Xue Xin-ru¹, Shi Xue-Fa^{1,2}

¹ Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography,
Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

² Laboratory of Marine Geology, Laoshan Laboratory, Qingdao, 266237, China
scorpioru@fio.org.cn

Abstract: Russia is a big costal country and one of the arctic countries, has a strong strength in the field of marine and polar research and an important influence on international marine affairs. The Arctic Ocean and the subarctic marginal sea have great significance to the future waterway, trade, energy and military security of China. Therefore, the cooperation with Russia on the marine and polar research has been listed as a key plan for cooperation between the two governments.

For more than a decade, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, China (FIO) has cooperated with All-Russian Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean (VNIIO) in the field of deep-sea mineralization and exploration of resource. The main results are as follows. 1. The cobalt-rich crust evaluation technology has been introduced. We have mastered the method of camping cobalt-rich crust and have obtained the idea of using GIS to establish the geological model of cobalt-rich crust. 2. We have conducted a comparative study of the mid-oceanic ridge in the North Atlantic through cooperation, have presented the potential investigation area of sulfide in the South Atlantic and have found a new hydrothermal zone in the South Atlantic. 3. We have obtained the technique of predicting the distribution of sulfide by using the structural analysis method of seabed topography. It is worth mentioning that the Russian partner of the project, Mr. Andreyev, was awarded the prize for outstanding contribution to the 60th anniversary of Chinese-Russian relations (issued by President Hu Jintao) in 2009. In recent years, FIO has made efforts to expand scientific research cooperation with Russia, and jointly organized several academic seminars on marine geology and mineral resources with VNIIO. The meetings were themed on the mineralization process of seafloor resources, and exchanges and discussions were held on major seafloor resources such as ferromanganese nodules, cobalt-rich crusts, offshore sands

and hydrothermal sulphides, etc. It is strongly recommended to continue to strengthen cooperation between the two sides in the field of oceanic mineral resources and organize joint scientific research cruises in the Arctic Ocean and the Kara Sea and Barents Sea as soon as possible.

In the future, FIO will cooperate with the VNIIO to carry out research on the process of mineralization of cobalt-rich crusts and the evaluation of polymetallic sulphides resources and mineral control elements.

Key words: cooperation, ocean mineral resources, deep-sea mineralization, exploration of resource/

U-TH/HE DATING OF FE-OXIDES ON THE EXAMPLE OF HYDROTHERMAL MINERALIZATION FROM THE CONTINENTAL SLOPE OF THE CHUKCHI BORDERLAND

Yakubovich O. V.^{1,2}, Konstantinova N. P.³, Anosova M. O.⁴, Mizell K.⁵, Hein R. J.⁵

¹ St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

² Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, St. Petersburg, Russia

³ FSBI “VNIIookeangeologia”, St. Petersburg, Russia

⁴ Vernadskiy institute of geochemistry and analytical chemistry, Moscow, Russia

⁵ U.S. Geological Survey, PCMSC, USA

olya.v.yakubovich@gmail.com

U-Th/He dating technique is based on the alpha-decay of U and Th. Based on the amount of ⁴He accumulated by the mineral it is possible to determine the age. Traditionally isotope systems based on radiogenic ⁴He were used in the field of low-temperature thermochronology [1], but recent advances in understanding the He behavior in various minerals allows to apply the method for geochronological studies [2, 5, 6].

Fe-oxides, such as goethite and hematite, tend to have trace amounts of U and Th. Given that they typically precipitate at relatively low temperatures, which implies limited He diffusion lost, they are considered as promising U-Th/He geochronometers [7]. Nowadays U-Th/He dating of Fe-oxides is widely applied to estimate the timing of weathering processes and ore-forming hydrothermal events [2].

Object of study. Hydrothermally altered Fe- and Mn-oxide rocks occur among the numerous hydrogenetic Fe-Mn crusts in several of the dredge hauls (DS3, DR3, DR7, KD12-03) (Fig. 1A) collected from the Amerasia Arctic Ocean by the U.S. and Russian research programs [3, 4]. Herein we applied U-Th/He method to goethite from the hydrothermally altered rocks from the DR7 collection site in order to estimate the timing of mineralization event.

Methods. Fe-oxides grains were manually extracted from three different parts of the HLY 0805 DR-7-001 sample (Fig. 1B). Eight fragments were selected for analysis by U-Th/He technique. Subsamples, which represent either the vein material or fragments of the one of the dark grains, were treated as separate samples. Fragments of Fe-oxide grains with weight of ~1—3 mg were placed in a quartz ampoule (~1 cm long) and sealed under 10⁻³ torr vacuum conditions. The sealed ampoule via a special gateway was placed in a high temperature high vacuum furnace of the high sensitivity magnetic sector MSU-G-01-M

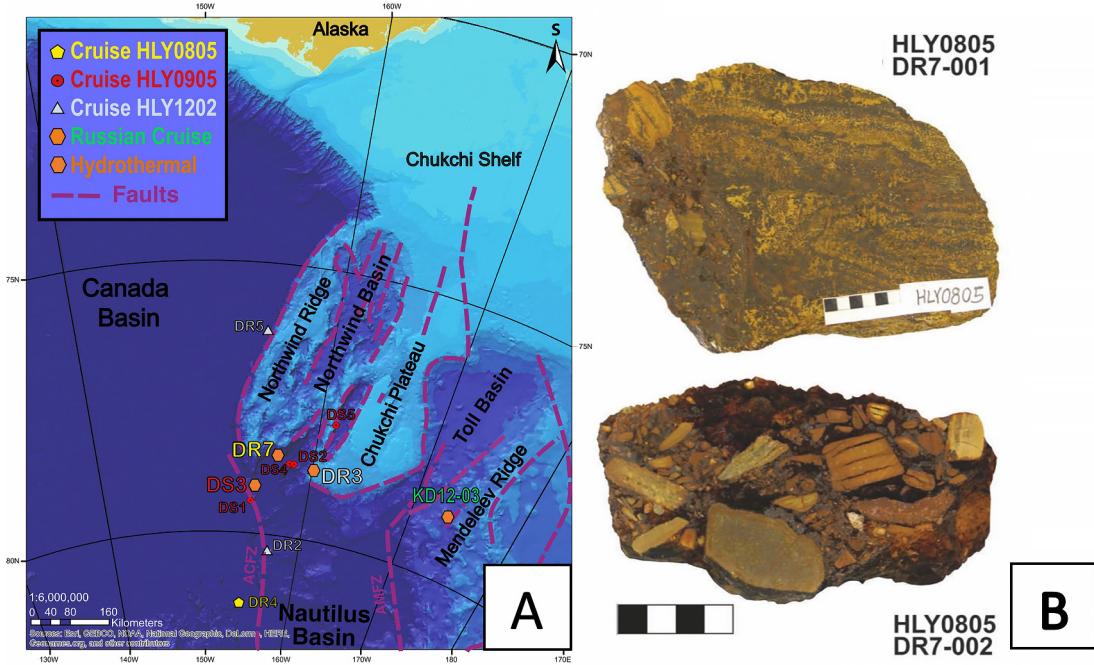


Fig. 1. A — map of the Chukchi Borderland north of Alaska, and Mendeleev Ridge, Amerasia Basin, Arctic Ocean, with 10 dredge sites from three USCGC *Healy* cruises and one Russian cruise within the *Arktika-2012* project; B — images of the analyzed samples

mass-spectrometer (IPGG RAS; [5, 6]). During heating He easily diffuse through the thin quartz walls, when U and other products of sample decomposition remain within the ampoule. Calibration of the mass spectrometer was done using the Knyahinya meteorite standard ($1.24 \pm 0.02 \times 10^{-5}$ cm³ STP g⁻¹ of ⁴He). The total procedural blank, determined by heating the empty quartz ampoules to 1100 °C, corresponds to $4.4 \pm 1.6 \times 10^{-10}$ cm³ at STP. Following the extraction of He, the ampoule was removed from the mass spectrometer for subsequent separation of U and Th.

The quartz ampoule with degassed samples was spiked with a ²³⁰Th-²³⁵U tracer and dissolved in a mixture of an aqua regia (0.4 mL), concentrated hydrofluoric acid (0.5 mL), and perchloric acid (0.05 mL) in closed Teflon vials for 2 hours at 200 °C on a hot plate followed by 15 h at 110 °C in a thermostat. The solution was dried on a hot plate at 200 °C. The remaining precipitate was dissolved in 1.5 mL of 5% nitric acid and heated up to 80 °C into ultrasonic bath for 15 min prior the measurement of U and Th content. ²³⁵U/²³⁸U and ²³⁰Th/²³²Th isotope ratios were measured on an ELEMENT XR ICP mass-spectrometer at the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS. The total chemical procedure blank, determined by dissolution of the empty quartz ampoules (n=4) in the same settings corresponds to 1.30 ± 1.26 and $5.8 \pm 4.4 \times 10^{10}$ atoms of ²³⁸U and ²³²Th, respectively.

The U-Th/He ages were calculated using IsoplotR software [8]. The combined analytical uncertainty was estimated based on the U, Th, and He measurement uncertainties and uncertainty of the blank determinations. Given that analyzed samples were fragments of a large grains, alpha-recoil corrections were not applied.

Results. The U-Th/He ages for eight fragments of Fe-oxides from the HLY 0805 DR-7-001 sample included fragments of 2 sets of dark grains and one set of yellowish vein samples were obtained. For all samples signals of He, U and Th were strongly above the background level (empty quartz ampoule). The concentrations of U in the dark grains range from 2.2—2.8 ppm, with Th/U ratios of 0.3—0.8. The concentration of U in the two vein subsamples is lower (1.36 and 1.8 ppm) and Th prevails over U (Th/U 2.4—2.7). The U-Th/He age of the dark grains is consistent within the uncertainty of the measurements with a weighted mean value of 8.6 ± 0.3 Ma (2σ). The two yellowish vein samples had reproducible, significantly younger ages, with a mean of 4.8 ± 0.4 Ma (2σ).

Discussion. Given the hydrothermal nature of goethite we can propose that Fe-oxides was formed during a mineralization event at Neogene time. The younger age of the yellowish vein material can be explained by an episode of later-stage mineralization and/or recrystallization. Alternatively, the small number of dated samples and distribution of samples may preclude being able to detect continuous Neogene mineralization from 8.5 Ma to 4.8 Ma throughout the region. The age of Mn-oxide hydrothermal mineralization is not known.

Funding: RSF-22-77-10088

References

1. Farley K., Stockli D. F. (U-Th)/He Dating of Phosphates: Apatite, Monazite, and Xenotime // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. Vol. 48 (1). P. 559—577.
2. Flowers R. M., Zeitler P. K., Danišík M., Reiners P. W., Gautheron C., Ketcham R. A. et al. (U-Th)/He Chronology : Part 1. Data, Uncertainty, and Reporting // GSA Bulletin. 2022. April. P. 1—33.
3. Hein J. R., Konstantinova N., Mikesell M., Mizell K., Fitzsimmons J. N., Lam P. J. et al. Arctic deep water ferromanganese-oxide deposits reflect the unique characteristics of the Arctic Ocean // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2017. Vol. 18 (11).
4. Konstantinova N., Cherkashov G., Hein J. R., Mirão J., Dias L., Madureira P., Kuznetsov V. Composition and characteristics of the ferromanganese crusts from the western Arctic Ocean // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 87. P. 88—99.
5. Shukolyukov Y. A., Yakubovich O. V., Yakovleva S. Z., Sal'nikova E. B., Kotov A. B., Rytsk E. Y. Geothermochronology Based on Noble Gases: III. Migration of Radiogenic He in the Crystal Structure of Native Metals with Applications to Their Isotopic Dating // Petrology. 2012a. Vol. 20 (1). P. 1—20.
6. Shukolyukov Yu. A., Yakubovich O. V., Mochalov A. G., Kotov A. B., Sal'nikova E. B., Yakovleva S. Z. et al. New Geochronometer for the Direct Isotopic Dating of Native Platinum Minerals (190Pt-4He Method) // Petrology. 2012b. Vol. 20 (6). P. 491—505.
7. Shuster D. L., Vasconcelos P. M., Heim J. A., Farley K. A. Weathering Geochronology by (U-Th)/He Dating of Goethite // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. Vol. 69 (3). P. 659—673.
8. Vermeesch P. IsoplotR: A Free and Open Toolbox for Geochronology // Geoscience Frontiers. 2018. Vol. 9 (5). P. 1479—1493.
9. Yakubovich O. V., Gedz A. M., Vikentyev I. V., Kotov A. B., Gorokhovskii B. M. Migration of Radiogenic Helium in the Crystal Structure of Sulfides and Prospects of Their Isotopic Dating // Petrology. 2019. Vol. 27 (1). P. 59—78.

ОЦЕНКА ЗАПАСОВ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОТЧЕТНОСТИ О МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСАХ

Алексеев И. А.

Институт наук о Земле СПбГУ
Санкт-Петербург, Россия
I.Alekseev@spbu.ru

На протяжении своей истории человечество использует полезные ископаемые (минеральные ресурсы) практически во всех сферах своей деятельности — от получения энергии до сельского хозяйства и создания произведений искусства. Во времена кустарной добычи и старательской отработки месторождений потребность в оценке минеральных ресурсов была ограничена, точность, полнота и качество оценки запасов не имели большого значения. Однако по мере развития горно-геологического сектора и его коммерциализации в последние столетия вопросы качественной оценки запасов и ресурсов стали весьма актуальны. На современном этапе, когда само понятие «месторождение» является, по сути, экономическим термином, оценка минеральных ресурсов и запасов, а также способы отчетности о результатах оценки являются неотъемлемой частью всех стадий освоения недр — от прогнозирования и поиска до разведки и эксплуатации.

Методы оценки ресурсов полезных ископаемых, а также способы отчетности прямым образом связаны с решаемой задачей. Оценка может проводиться для нужд государственного контроля и учета полезных ископаемых в недрах отдельной страны, для нужд компании-недропользователя, разрабатывающего месторождения. Также востребованной является независимая оценка (аудит) минеральных ресурсов и запасов для целей купли-продажи месторождений, инвестирования и финансирования горных проектов. При этом методики оценки и способы отчетности будут разными. Следует отметить, что сам механизм расчета количества (геологических) запасов будет приблизительно одинаковый и будет подчинен правилам, инструкциям и методическим рекомендациям, но общий результат и способ отчетности будут различаться.

Традиционно для твердых полезных ископаемых существует несколько общепринятых методик подсчета запасов. Все они направлены на выяснение:

а) геометрии залежи; б) содержания полезного компонента; в) технологических свойств руд; г) многочисленных дополнительных параметров, влияющих на экономические показатели, закладываемые в модель месторождения. В результате процесса подсчета запасов в той или иной форме появляются геологическая и экономическая модели месторождения. Далее выбирается способ подготовки отчета о запасах и минеральных ресурсах. Для России обязательным является подготовка отчета по системе ГКЗ РФ. В Канаде и Австралии более распространены системы отчетности JORC и NI 43-101. Для европейских стран более привычным является использование системы CRISCO. Нередко по оному месторождению могут быть составлены два отчета и более в различных системах для разных целей.

На современном этапе в условиях глобального рынка постоянно возникает необходимость взаимного перевода и «вязки» между собой данных, представленных с использованием различных стандартов отчетности о минеральных ресурсах. На протяжение последних 15 лет в диалоге с профессиональным геологическим сообществом государства разрабатывают принципы и «связующие документы», позволяющие переводить запасы полезных ископаемых из одних систем в другие (например, из системы ГКЗ РФ в систему отчетности JORC). Формируется своего рода «язык», на котором смогут говорить и понимать друг друга не только геологи, но и представители финансового сектора — банки, биржи, инвестиционные фонды и страховые компании.

Отдельно следует отметить сложности оценки минеральных ресурсов и запасов месторождений полезных ископаемых Мирового океана. Несмотря на интенсивное изучение данных месторождений, мы сталкиваемся со сложностями во всех аспектах оценки при попытке переноса нашего опыта с континента в океан. Особенности определения геолого-промышленных типов месторождений, особенности морфологии рудных залежей в океане, технологические свойства руд, содержания полезных компонентов, технологии добычи и переработки, отсутствие достаточного опыта, кондиций, методических рекомендаций, объектов-аналогов, экологические и правовые риски — это далеко не полный перечень вопросов, затрудняющих оценку месторождений Мирового океана. При этом очевидно, что без корректной геолого-экономической оценки реализация добывчных проектов невозможна. Ключевым фактором, как и на континентах, будут являться опыт и практика оценки месторождений Мирового океана, особенно когда оценки начнут подтверждаться результатами рентабельной добычи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА ГЛУБОКОВОДНЫЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СУЛЬФИДЫ В РОССИЙСКОМ РАЗВЕДОЧНОМ РАЙОНЕ (САХ)

Бельтенев В. Е.

ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия
v.belt@yandex.ru

Отечественные научно-исследовательские работы по проблеме глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта (САХ) начались в 1985 г. Ведущая роль в этих работах принадлежала геологическим организациям Министерства геологии СССР, в первую очередь ФГУНПП «ПМГРЭ» (АО «ПМГРЭ») и ФГУП «ВНИИОкеангеология» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»).

На начальной стадии проводились опытно-методические работы по отработке методики региональных исследований ГПС и отбору проб сульфидных руд на известных рудных полях Снейк Пит и ТАГ. В ходе региональных работ был изучен осевой отрезок САХ от 6° с.ш. до 29° с.ш.: получены данные о геофизических полях, гидрологическом строении водной толщи и геологическом строении океанского дна.

В результате анализа полученных материалов на изученном отрезке САХ были выделены перспективные площади на обнаружение ГПС. При исследованиях перспективных площадей проводились гидролокация бокового обзора (сонарная съемка) и геоакустическое профилирование комплексом «МАК-1М» (разработан в ГНЦ «Южморгеология»), гидрологические исследования, подводные теленаблюдения и геологический пробоотбор. Наиболее эффективным методом при поисках ГПС зарекомендовал электроразведочный метод, позволяющий определять потенциал естественного электрического поля (ЕП) в придонных горизонтах водной толщи. Для применения этого метода в ГП «Севморгео» был разработан специализированный глубоководный буксируемый комплекс АМК «РИФТ». Выявляемые аномалии потенциала естественного электрического поля (ЕП) «связывались» с проявлениями гидротермального рудогенеза на океанском дне.

В итоге к 2012 г. в результате проведенных исследований были открыты и предварительно изучены гидротермальные рудные поля и рудопроявления,

объединенные в рудные узлы: узел Логачёв (2 поля и 4 рудопроявления), узел Ашадзе (2 поля и 2 рудопроявления), узел Семёнов (5 рудных полей) и отдельные гидротермальные поля — Зенит-Виктория, Краснов, Петербургское и Пюи де Фоль (см. табл. и рис.). На основании полученных результатов Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации была подана заявка в Международный орган по морскому дну (МОМД) на участок морского дна в осевой части рифтовой зоны САХ с целью заключения контракта на разведку ГПС в пределах заявленной площади.

В 2012 г. был заключен контракт на разведку полиметаллических сульфидов между МОМД и Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации [1]. На основании контракта Российской Федерации (контрактору) на 15 лет предоставлено исключительное право на разведку полиметаллических сульфидов в пределах заявленной площади в международном районе Мирового океана.

Российский разведочный район глубоководных полиметаллических сульфидов (PPP-ГПС) расположен в приэкваториальной части Атлантического океана в осевой зоне САХ в интервале широт $12^{\circ}48'36''$ — $20^{\circ}54'36''$ с.ш. площадью 100 км^2 (100 разведочных блоков размером $10 \times 10 \text{ км}$). Общая протяженность PPP-ГПС вдоль простирания САХ составляет 897 км (см. рис.).

Рудные объекты в пределах Российского разведочного района

№ п/п	Рудный объект	Год открытия	№ рейса	№ блока
Открыты до заключения контракта с МОМД				
1	Рудный узел Логачёв ($14^{\circ}45'$ с.ш.)	1993—1994	7, 10	61
2	Рудный узел Ашадзе ($12^{\circ}58'$ с.ш.)	2003—2005	22, 26	98
3	Рудное поле Краснов ($16^{\circ}38'$ с.ш.)	2006	24	46
4	Рудный узел Семёнов ($13^{\circ}31'$ с.ш.)	2007—2009	30, 32	76, 77
5	Рудное поле Зенит-Виктория ($20^{\circ}08'$ с.ш.)	2008	31	12
6	Рудное поле Пюи де Фоль ($20^{\circ}30'$ с.ш.)	1996	31	8
7	Рудное поле Петербургское ($19^{\circ}52'$ с.ш.)	2010	33	23
8	Рудный узел Ириновский ($13^{\circ}20'$ с.ш.)	2011	34	83
Открыты после заключения контракта с МОМД				
9	Рудное поле Юбилейное ($20^{\circ}09'$ с.ш.)	2012	35	10
10	Рудное поле Сюрприз ($20^{\circ}45'$ с.ш.)	2012	35	4
11	Рудное поле Холмистое ($17^{\circ}57'$ с.ш.)	2014	37	27
12	Рудный узел Победа ($17^{\circ}08'$ с.ш.)	2014—2015	37	37, 39
13	Рудное поле Молодежное ($13^{\circ}09'$ с.ш.)	2020	41	90
14	Рудное поле Коралловое ($13^{\circ}07'$ с.ш.)	2020	41	90

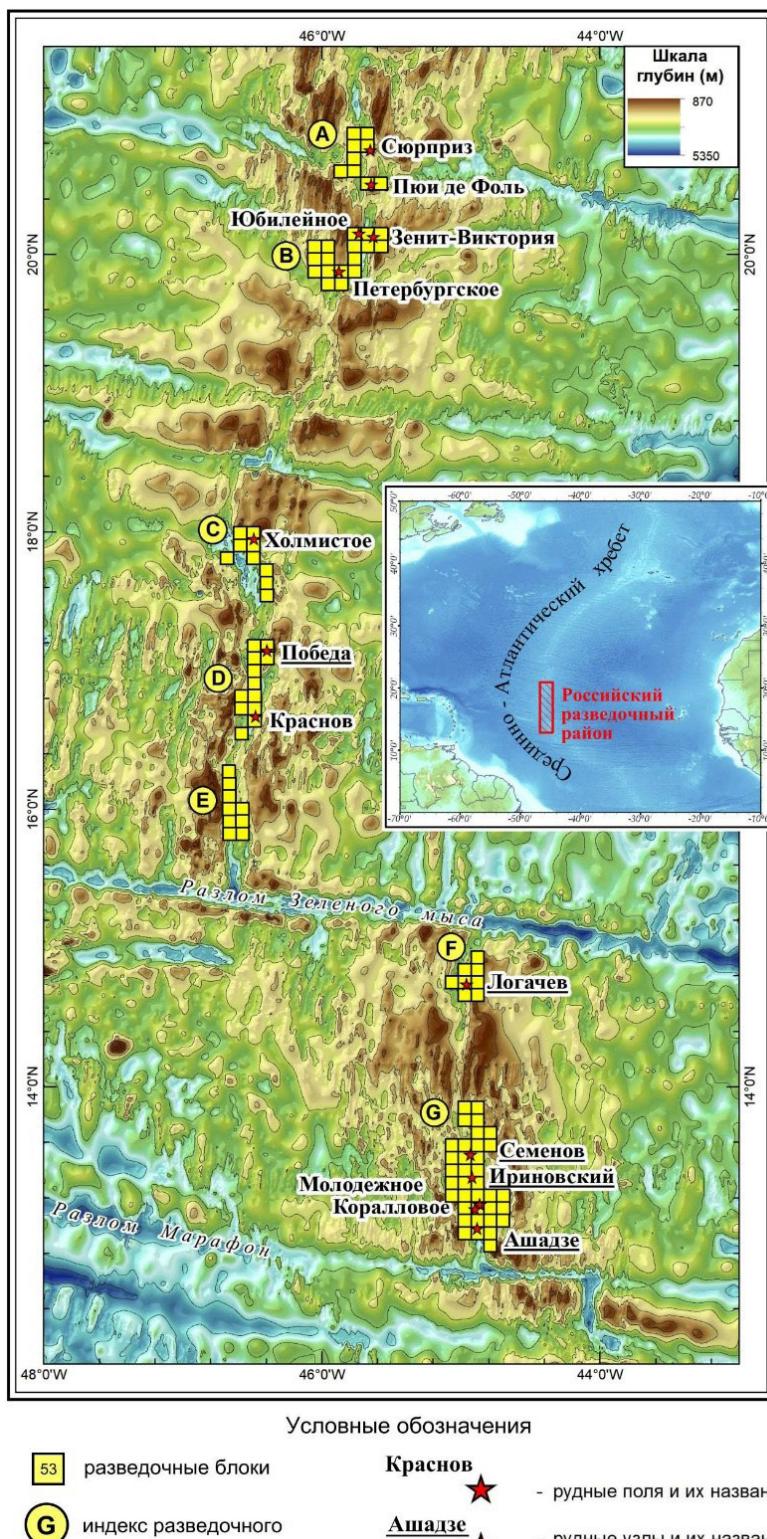


Рис. 1. Расположение рудных объектов в Российском разведочном районе

Условные обозначения

- | | | | |
|--|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 53 | разведочные блоки | ★ | - рудные поля и их названия |
| G | индекс разведочного кластера | ★ | - рудные узлы и их названия |

В рамках контракта с МОМД выполнено пять рейсов на НИС «Профессор Логачёв», открыты рудные поля Юбилейное, Сюрприз, Холмистое, Молодежное, Коралловое и рудный узел Победа (3 рудных поля) (см. табл. и рис.).

Всего к 2021 г. на научно-исследовательских судах ФГУНПП «ПМГРЭ» (АО «ПМГРЭ») в пределах Российского разведочного района проведено 25 морских экспедиций, из них 5 рейсов в рамках контракта с МОМД. В пределах РРР-ГПС открыто 23 рудных

поля и 6 рудопроявлений, часть из которых объединена в 5 рудных узлов, что в целом составляет 14 рудных объектов (см. табл. и рис.). Два рудных поля — Пюи де Фоль [2] и Ириновское-1 [3] — открыты зарубежными специалистами, остальные рудные объекты имеют российский приоритет открытия.

В соответствии с правилами поиска и разведки полиметаллических сульфидов в районе в течение 10 лет контрактору необходимо в два этапа отказаться от 75% площади изначально выделенного ему района: от 50% на 8-й год и от 25% на 10-й год контракта. В 2022 г. выполнен окончательный выбор площадей для дальнейших разведочных работ в составе Российского разведочного района и отказа от 75% изначально выделенной площади.

Процедура отказа была основана на анализе прямых и косвенных геолого-геофизических признаков возможного наличия гидротермального оруденения в пределах PPP-ГПС.

В настоящее время в соответствии с контрактом проводятся детальные разведочные работы на известных рудных полях в северной части PPP-ГПС.

Основные результаты:

1. В результате анализа научно-исследовательских работ на ГПС, проведенных в доконтрактный период, в качестве наиболее перспективного был выделен район на отрезке САХ от 12°48' до 20°54' с.ш.
2. В 2012 г. РФ был подписан контракт с МОМД на исключительное право на разведку полиметаллических сульфидов на данном отрезке САХ в пределах 100 разведочных блоков.
3. К 2021 г. завершены геологоразведочные работы поисковой стадии в пределах PPP-ГПС. Открыто 23 рудных поля и 6 рудопроявлений, часть из которых объединена в 5 рудных узлов, что в целом составляет 14 рудных объектов.
4. Выполнены работы по окончательному выбору площадей для дальнейших разведочных работ в составе Российского разведочного района и отказу от 75% изначально выделенной площади.

Список литературы

1. Контракт на разведку глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) между Международным органом по морскому дну и Минприроды России, подписан Минприроды России 29.10.2012, в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 28.07.2012 № 1360-р.
2. Gente P., Ceuleneer G., Dauteuil O. et al. 4-D Architecture of the Oceanic Lithosphere // InterRidge News. 1996. Vol. 5, N 2.
3. McLeod C. J., Searle R. C., Murton B. J. et. al. Life cycle of oceanic core complexes // Earth and Planetary Science Letters. 2009. N 287. P. 333—344.

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ РУДНЫХ ПОЛЕЙ АШАДЗЕ-2 И ПЕТЕРБУРГСКОЕ (САХ)

Бурлакова А. А.¹, Смоленский В. В.¹, Вилькин Г. С.², Константинова Н. П.²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

anastasia.burlakova@email.ru

Материалом для исследований послужила коллекция образцов, предоставленных ФГБУ «ВНИИОкеангеология» и отобранных в ходе 26-го (2005) и 30-го (2006) рейсов НИС «Профессор Логачёв» с гидротермального рудного поля Ашадзе-2 и 33-го (2010) и 36-го (2015) рейсов с гидротермального рудного поля Петербургское в ходе морских поисковых работ на глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС) (рис. 1). Коллекция представлена низкотемпературными гидротермальными образованиями и состоит из 48 образцов, из которых в общем количестве было отобрано 68 валовых и послойных проб (59 проб с Ашадзе-2 и 9 проб с Петербургского).

По результатам морфологического исследования коллекции образцов было выделено несколько морфологических типов образований для каждого рудного поля. В пределах рудного поля Ашадзе-2 отмечается пять типов образований. Первый тип представлен рыхлыми корками рыжевато-бурового, желто-бурового цветов с черно-серыми прослойками плотного вещества полуметаллического блеска (рис. 2а). Второй тип характеризуется желто-бурыми рыхлыми образованиями со светло-зелеными порошковидными массами и линзами, сложенными изумрудно-зелеными кристаллами (до 1 мм) (рис. 2б). Третий тип представлен фрагментами плотных темно-серых агрегатов, покрытых налетом серо-зеленого цвета (рис. 2в). Четвертый тип отмечается темно-серыми образованиями с налетами рыжевато-бурых корочек, а также с порошковидным налетом кремового цвета на поверхности образца (рис. 2г). Пятый тип представлен темными серо-черными агрегатами различной размерности с рыхлым коричневым материалом по краям, являющимися, предположительно, фрагментами сульфидной постройки (рис. 2д).

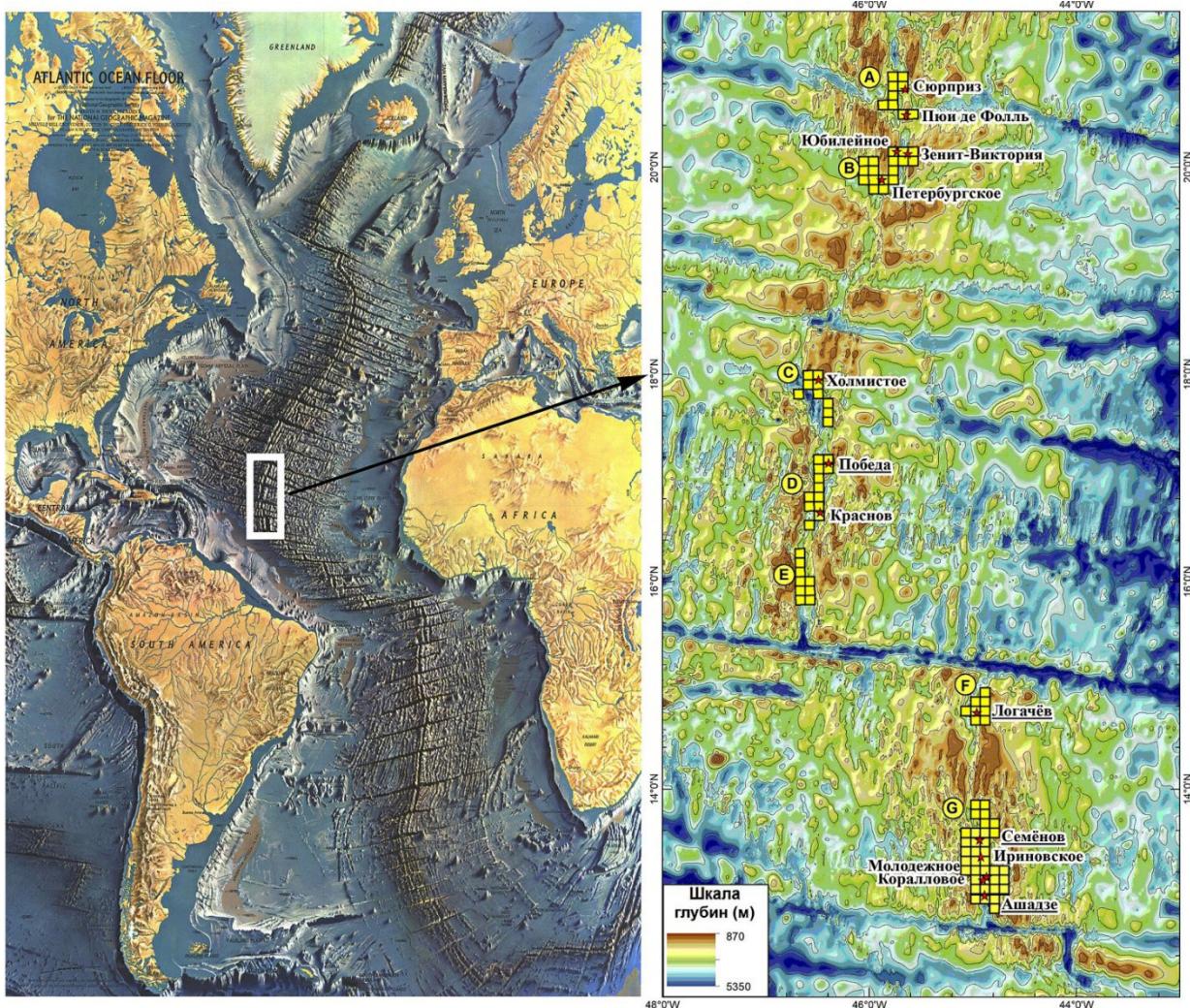


Рис. 1. Положение Российского разведочного района (PPP) в Атлантическом океане (белый прямоугольник). На увеличенном изображении PPP (справа) — 100 блоков района и важнейшие проявления глубоководных сульфидно-полиметаллических отложений, открытые АО «ПМГРЭ»
[Добрецова И. Г., Яговкина М. А., 2022]

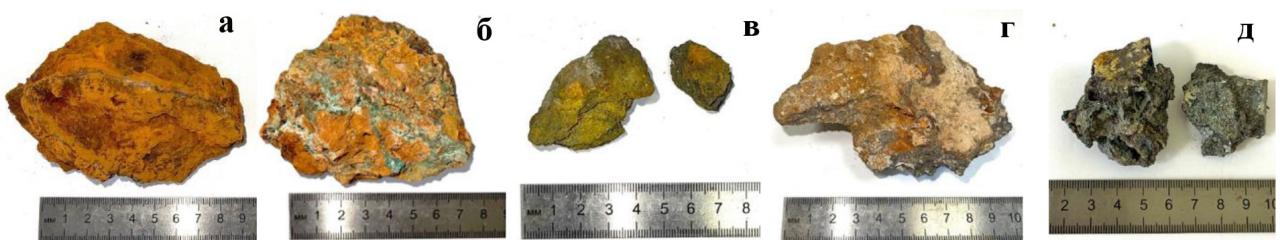


Рис. 2. Морфологические типы образований рудного поля Ашадзе-2: а — первый тип; б — второй тип; в — третий тип; г — четвертый тип; д — пятый тип



Рис. 3. Морфологические типы образований рудного поля Петербургское: а — первый тип; б — второй тип; в — третий тип

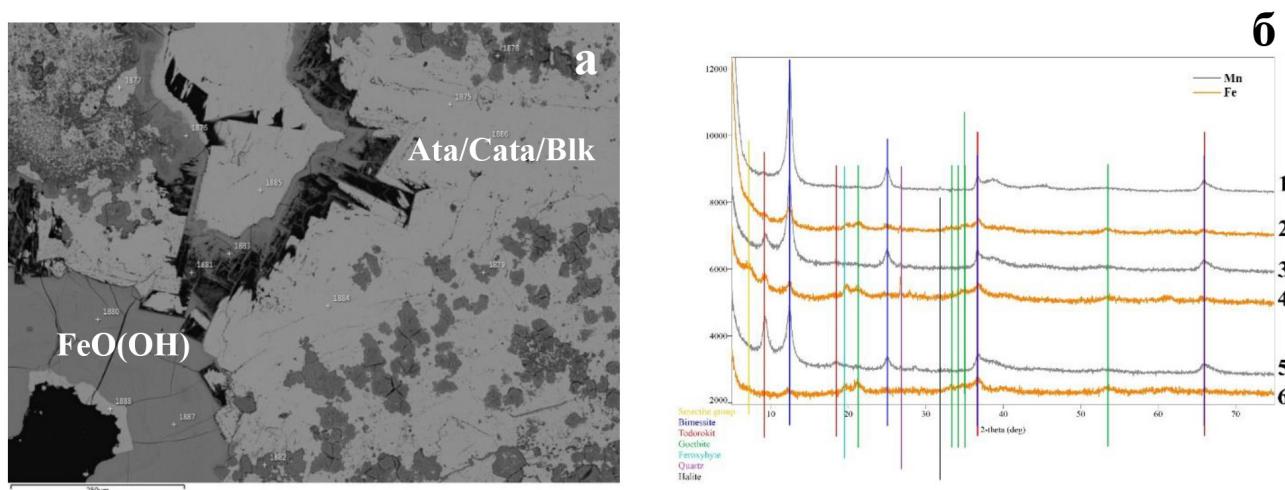


Рис. 4. Особенности минерального состава низкотемпературных гидротермальных образований: а — BSE-изображение минералов группы атаками (Ата — атакамит, Ката — клиноатакамит, Блк — боталлакит) в аморфных массах оксигидроксидов железа ($\text{FeO}(\text{OH})$); б — рентгенограмма послойного исследования образца

В пределах рудного поля Петербургское выделено три типа морфологических образований. Первый тип представлен достаточно плотной рыжевато-буровой коркой с плотными черно-серыми прослойями смолянистого блеска (рис. 3а). Второй тип характеризуется слоистой коркой мощностью около 5 см с чередованием серо-черных и рыже-бурых слоев (рис. 3б). Третий тип представлен темно-серым слоистым формированием, состоящим из двух слоев: верхний плотный и рыхлый нижний слой, предположительно пропитанный осадком (рис. 3в).

Минеральный состав корок исследовался с помощью оптической микроскопии, сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi S-3400N с аналитическими приставками для анализа дифракции отраженных электронов EBSD — AzTec HKL Channel 5 Advanced, для количественного энергодисперсионного микроанализа EDX — AzTec Energy 350 в РЦ «Геомодель» СПбГУ и рентгенофазового анализа на рентгеновском порошковом дифрактометре XRD 6000 (на Со-аноде) в лаборатории изучения вещественного состава научно-образовательного ЦКП СПбГУ.

Гидротермальные образования рудного поля Ашадзе-2 преимущественно сложены гетитом и аморфными массами оксигидроксидов железа и кремния (рис. 4). Светло-зеленые порошковидные массы и изумрудно-зеленые кристаллы сложены минералами группы атакамита: боталлакитом, атакамитом и клиноатакамитом (см. рис. 4).

На рудном поле Петербургское, помимо минералов железистой группы (гетит, оксигидроксиды железа), были диагностированы марганцевые минералы, представленные тодорокитом и бернесситом (см. рис. 4).

Список литературы

1. Добрёцова И. Г. О гидротермальном генезисе минералов группы атакамита в Атлантическом океане // Материалы XXIII Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии. Т. 2. 2019. С. 277—280.

ГЕОХИМИЯ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ РУДНЫХ ПОЛЕЙ АШАДЗЕ-2 И ПЕТЕРБУРГСКОЕ

Вилькин Г. С.¹, Константина Н. П.¹,
Бурлакова А. А.^{1,2}, Бельтенев В. Е.¹, Черкашёв Г. А.^{1,3}

¹ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
grigoriyvilkin@yandex.ru

Железомарганцевые образования (ЖМО) в Атлантическом океане являются предметом интереса с научной и практической точек зрения. Материалом для исследования послужили образцы, полученные в ходе 30-го и 34-го рейсов НИС «Профессор Логачёв». Объектом исследования 30-го рейса являлся рудный узел Ашадзе, в частности рудное поле Ашадзе-2, 34-го рейса — рудное поле Петербургское.

Ашадзе-2 — гидротермальное поле, расположенное на террасе рифтовой долины на глубинах 3100—3250 м. Оно находится в точке пересечения разлома с зоной деформаций и связано с глубинными габбро-перidotитовыми породами [1].

Рудное поле Петербургское расположено на выровненном участке склона рифтовой гряды и на глубине 2800—3100 м, данное рудное поле не имеет существенных структурно-тектонических особенностей [2].

С обоих полей было проанализировано 68 образцов (9 — с Петербургского и 59 — с Ашадзе-2). Основная масса образцов с поля Ашадзе-2 представляла собой рыхлый охристый материал, зачастую с гетитовыми прослойками и включениями атакамита. Образцы с поля Петербургское представляют собой черный хрупкий плотный материал, в котором местами присутствуют охристые прослойки рыхлого материала.

По классификации Hekinian [5], выделено три группы железомарганцевых образований:

- железистые, связанные с сульфидами (табл. 1);
- железистые с пониженным содержанием рудных элементов (табл. 2);
- железосиликатные (табл. 3).

Образцы с рудного поля Петербургское выделены в отдельную группу марганцевых образований (табл. 4).

Таблица 1. Статистические параметры распределения рудных элементов для железистых, связанных с сульфидами образований

	Fe (wt %)	Mn (wt %)	Co (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)
x_{\max}	48,70	15,41	1200,00	203200,00	360,00	21000,00
x_{\min}	24,67	0,01	10,00	945,00	5,00	190,00
$x_{\text{ср}}$	37,73	1,52	332,34	52594,50	65,15	3556,63
S	6,50	3,18	348,32	59737,15	76,19	4537,19
V	0,17	2,09	1,05	1,14	1,17	1,28

Таблица 2. Статистические параметры распределения рудных элементов для железистых образований с пониженными содержаниями рудных элементов

	Fe (wt %)	Mn (wt %)	Co (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)
x_{\max}	52,37	0,12	210,00	2570,00	20,00	2300,00
x_{\min}	34,32	0,02	18,10	494,00	5,00	356,00
$x_{\text{ср}}$	39,75	0,06	86,70	1361,00	14,43	1111,50
S	8,51	0,04	84,47	964,72	6,77	868,54
V	0,21	0,62	0,97	0,71	0,47	0,78

Таблица 3. Статистические параметры распределения рудных элементов и Si для железосиликатных образований

	Fe (wt %)	Mn (wt %)	Co (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)	Si (wt %)
x_{\max}	37,41	4,00	2100,00	43 900,00	1100,00	1800,00	16,36
x_{\min}	16,78	0,03	61,00	2480,00	13,50	535,00	7,99
$x_{\text{ср}}$	24,41	0,85	723,00	14 496,67	361,28	1342,50	12,13
S	7,48	1,55	726,98	15 055,50	476,05	461,91	2,80
V	0,31	1,83	1,01	1,04	1,32	0,34	0,23

Таблица 4. Статистические параметры распределения рудных элементов для марганцевых образований

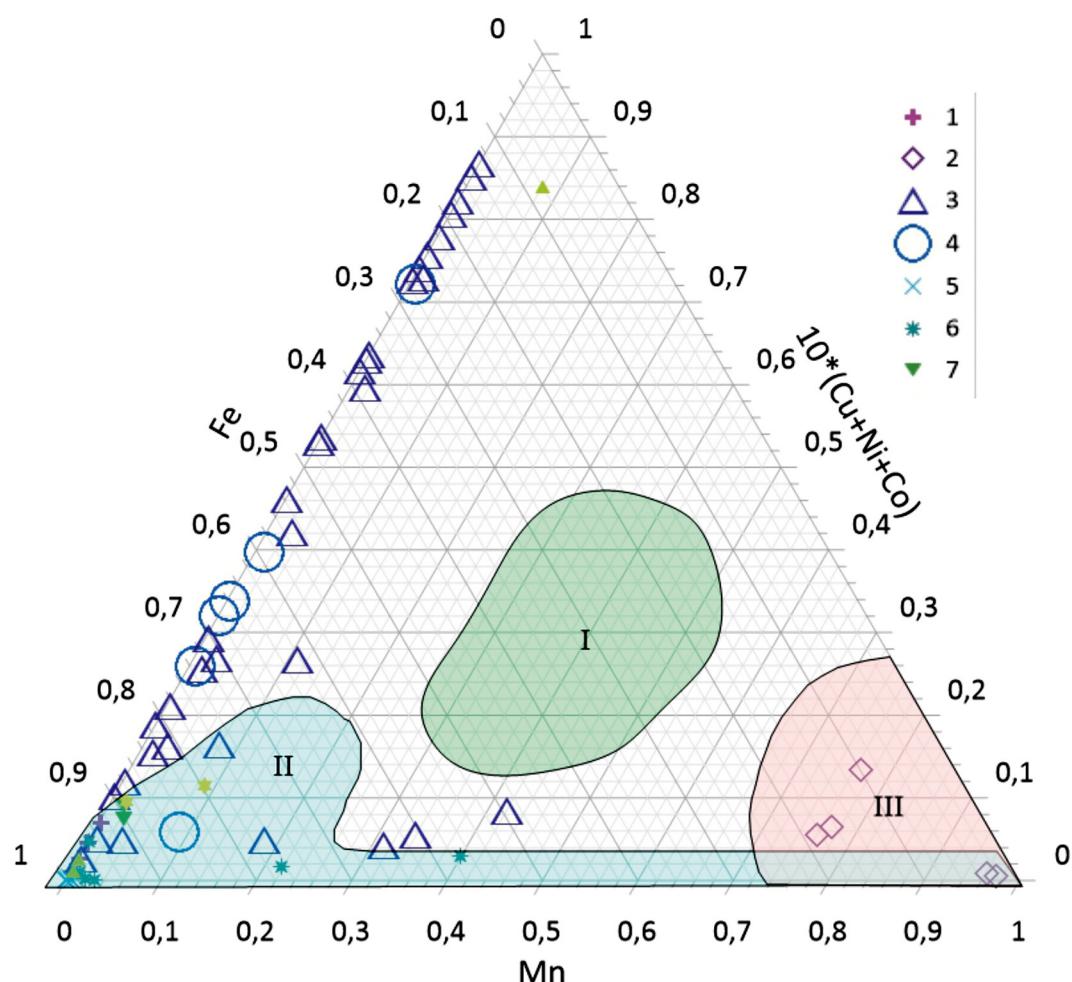
	Fe (wt %)	Mn (wt %)	Co (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)
x_{\max}	9,86	52,97	166,00	7450,00	497,00	4650,00
x_{\min}	1,14	40,74	9,22	193,00	97,90	148,00
$x_{\text{ср}}$	5,42	46,44	94,82	2677,00	239,58	2413,20
S	4,00	5,88	77,37	2971,90	158,87	2095,59
V	0,74	0,13	0,82	1,11	0,66	0,87

Примечание (для табл. 1—4): x_{\max} — максимальное значение; x_{\min} — минимальное значение; $x_{\text{ср}}$ — среднее значение; S — стандартное отклонение; V — коэффициент вариации.

Железистые, связанные с сульфидами: наиболее широко представленная группа. Выделяется по высокому содержанию железа (30—50%) и высокому суммарному содержанию меди, кобальта, никеля и цинка (0,3—19%). Образцы данного типа представлены корками гидроокислов железа, зачастую с хлоритом, атакамитом и арагонитом.

Преимущественно марганцевые выделены по высокому содержанию марганца (40—50%). Все образцы данного типа относятся к полю Петербургское. Образцы слоистые: плотные черные марганцевые слои размежеваны рыхлым рыжим материалом, который по результатам аналитики был отнесен к группе железистых образований, связанных с сульфидами.

Железистые с пониженным содержанием рудных элементов выделяются по высокому содержанию железа (27—45%) и по пониженному суммарному содержанию меди, кобальта, меди и цинка (<0,3%). Образцы данной группы



Тернарный график классификации генетического происхождения [3].

Условные обозначения: 1 — железистые с пониженным содержанием рудных элементов; 2 — марганцевые; 3 — железистые, связанные с сульфидами; 4 — железосиликатные; 5 — гидротермальное поле Lilliput [4]; 6 — Западно-Индийский хребет [7]; 7 — гора Лоихи [6]; I — гидрогенетические; II — гидротермальные; III — диагенетические

представлены оксидигидроксидными корками железа. Основная масса корок рыхлая, рыжего, черного цвета.

Железосиликатные выделены по высоким содержаниям кремния (7—20%) и железа (20—30%). Корки сложены рыхлыми рыжими гидроокислами железа с атакамитом.

Железистые, связанные с сульфидами, железистые с пониженным содержанием рудных элементов и железосиликатные образования по составу и соотношению рудных компонентов сопоставимы с ЖМО с гидротермального поля Lilliput [4], подводной горы Loixhi [6] и Западно-Индийского хребта [7]. Марганцевые корки с рудного поля Петербургское, согласно классификации генетического происхождения [3], относятся к диагенетическим образованиям (см. рис.).

Список литературы

1. Батуев Б. Н., Иванов В. Н., Лазарева Л. И., Бельтенев В. Е., Самоваров М. Л. Гидротермальная активность в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта в районе 13° с.ш. // Металлогения древних и современных океанов — 2006. Условия рудообразования. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. С. 66—69.
2. Шилов В. В., Бельтенев В. Е., Иванов В. Н., Черкашёв Г. А., Рождественская И. И., Габлина И. Ф. и др. Новые гидротермальные рудные поля на Срединно-Атлантическом хребте: Зенит-Виктория (20°08' с.ш.) и Петербургское (19°52' с.ш.) // Доклады Академии наук. 2012. Т. 442, № 3. С. 383—389.
3. Bonatti E., Honnorez J., Joensuu O., Rydell H. Classification and genesis of submarine iron manganese deposits // National Science Foundation. 1972. P. 149—166.
4. Dekov V. M., Petersen S., Garbe-Schönberg C. D., Kamenov G. D., Perner M., Kuzmann E., Schmidt M. Fe—Si-oxyhydroxide deposits at a slow-spreading centre with thickened oceanic crust: The Lilliput hydrothermal field (9°33'S, Mid-Atlantic Ridge) // Chemical Geology. 2010. Vol. 278 (3—4). P. 186—200.
5. Hekinian R., Hoffert M., Larque P., Cheminee J. L., Stoffers P., Bideau D. Hydrothermal Fe and Si oxyhydroxide deposits from South-Pacific intraplate volcanos and East Pacific rise axial and off-axial regions // Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists. 1993. N 88. P. 2099—2121.
6. Rouxel O., Toner B., Germain Y., Glazer B. Geochemical and iron isotopic insights into hydrothermal iron oxyhydroxide deposit formation at Loihi Seamount // Geochimica. 2018. Vol. 24. P. 449—482.
7. Ta K. W., Wu Z. J., Peng X. T., Luan Z. F., Chen S. Formation and origin of Fe—Si oxyhydroxide deposits at the ultra-slow spreading Southwest Indian Ridge. Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 2021.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ SR И ND МИНЕРАЛЬНЫХ ФАЗ ГИДРОГЕННЫХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОРОК СЕВЕРНОЙ ПАЦИФИКИ

Вишневская И. А.^{1,2}, Михайлик П. Е.²

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, Москва, Россия

² Дальневосточный геологический институт, ДВО РАН, Владивосток, Россия
vishnevskaia@geokhi.ru

Гидrogenные железомарганцевые (Fe-Mn) корки в период роста, который охватывает миллионы лет, сорбируют элементы из морской воды, являясь регистраторами условий их формирования. В их строении выделяются четыре минеральные фазы: I — легкорастворимая биогенная, II — марганцевые оксиды, III — железистые гидроксиды и IV — остаточная алюмосиликатная. По мере роста каждая из фаз в зависимости от условий ее образования концентрирует различные элементы, сохраняя показатели среды формирования.

Поведение изотопов Sr и Nd в валовых пробах корок уже хорошо изучено, однако минеральные фазы в этом ключе исследованы крайне скучно. Последние исследования показывают, что для типичных гидрогенных корок характерно равнозначное (50/50) распределение РЗЭ между марганцевой и железистой фазами [4]. Сохраняется ли баланс в распределении величины ϵ_{Nd} , а также отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ между минеральными фазами в гидрогенных железомарганцевых корках, в данный момент не известно.

Материалом для исследования послужили образцы Fe-Mn корок, драгированные со склонов гайотов Ханзей и Детройт (Императорский хребет), а также разломных зон Рат и Стейлмейт (НИС Zonne, 249-й рейс, 2016 г.).

По морфологии, минеральному составу, концентрации Mn, Fe, Co, Ni, Cu и других химических элементов, а также составу РЗЭ Fe-Mn корки гайотов Детройт, Ханзей и разломных зон Стейлмейт и Рат были отнесены к гидрогенному типу [1]. Валовый изотопный состав стронция изученных образцов находится в интервале от 0,707973 до 0,709141. При этом содержание стронция изменяется почти в три раза — от 659 до 1707 ppm. Изотопный состав неодима варьируется в интервале от -2,3 до -4,4

с основным интервалом значений $-3,3$ — $-3,2$, что соответствует современному значению глубинной воды Северной Пацифики [4].

Разложение проб Fe-Mn корок на минеральные фазы осуществлялось методом последовательного селективного выщелачивания. Изучение изотопного состава Sr и Nd в минеральных фазах ЖМО выполнено на базе чистых комнат ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН (Екатеринбург). Изотопный состав Sr изучался на MC-ICPMS Neptune Plus, измерение изотопных отношений Nd проводилось на TIMS TritonPlus (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, Екатеринбург). Подробности методик описаны в работе П. Е. Михайлика и соавт. [1].

Значения ϵ_{Nd} и отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в минеральных фазах приведены на рисунке.

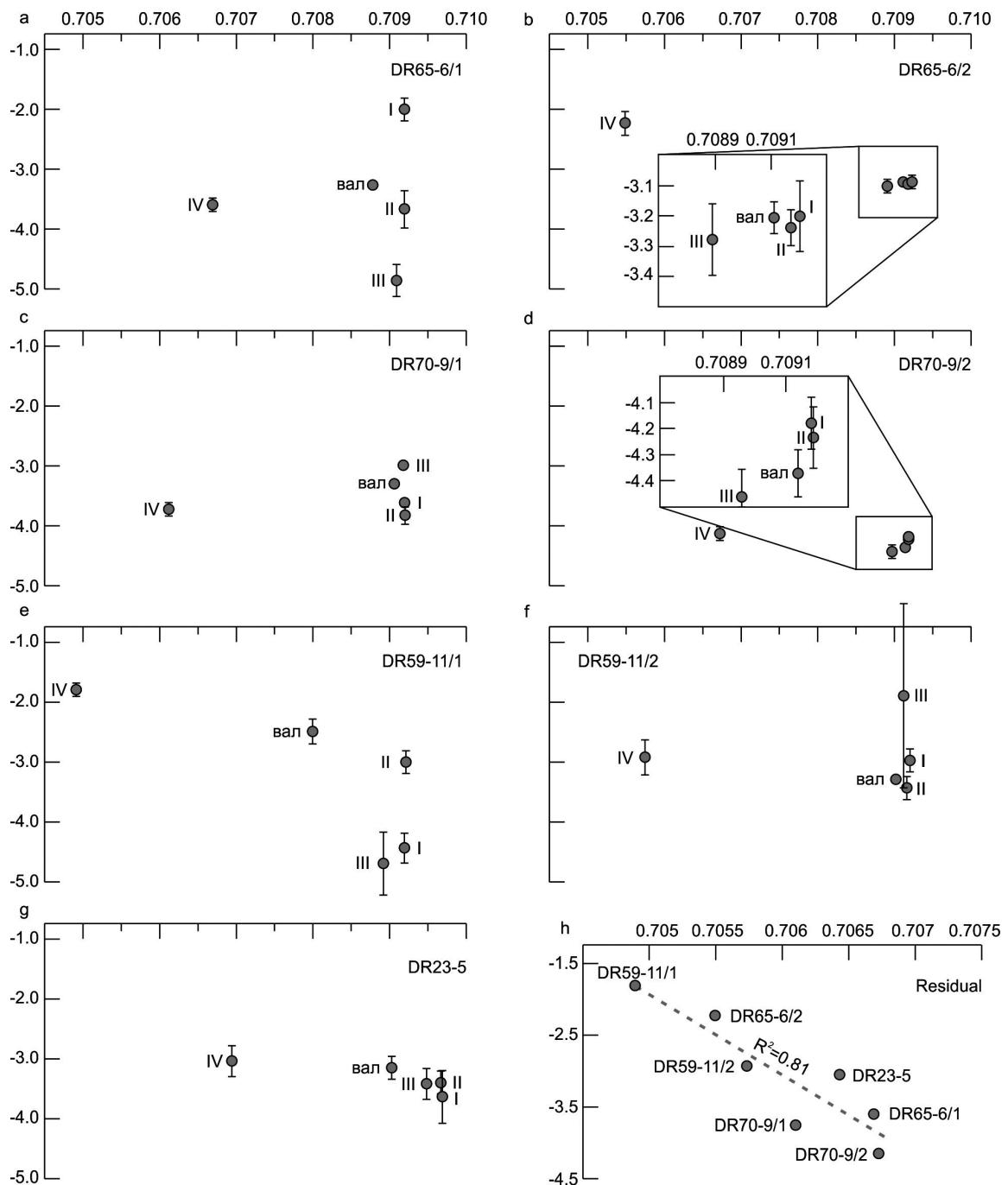
Хемогенные фазы Fe-Mn корок должны формироваться в изотопном равновесии со средой седиментации. Это прослеживается в изотопном составе неодима марганцевой и железистой фаз проб DR23-5, DR59-11/2, DR65-6/2, DR70-9/1, которые имеют одинаковую величину ϵ_{Nd} с учетом погрешности (см. рис.).

Формирование интервала опробования нижнего слоя образца с гайота Ханзей (DR70-9/2) происходило около 6 млн лет назад [1], когда ϵ_{Nd} тихоокеанских вод составляло $-4,1$ — $-4,4$. Такое значение было установлено в минеральных фазах этой пробы (см. рис.), что указывает на гидрогенный источник вещества для этой корки.

В пробах из поверхностных слоев образцов с гайота Детройт (DR65-6/1) и разломной зоны Стейлмейт (DR59-11/1) значение ϵ_{Nd} в железистой фазе ниже на $1,2$ — $1,7$ единицы эпсилон, чем в марганцевой, что указывает на нарушение изотопного равновесия.

Поставка терригенного материала в район формирования корок осуществляется в основном через Камчатский пролив, на южной оконечности которого между цепочкой подводных гор северного звена Императорского хребта и Алеутской дуги формируется осадочное тело Мейдзи Дрифт (Meiji Drift) в течение последних 40 млн лет. Основным источником терригенного вещества здесь являются породы, поступающие в бассейн Берингова моря [6], с широким диапазоном вариации отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($0,703$ — $0,709$) и ϵ_{Nd} (от $-10,1$ до $+9$) [2, 3]. На основании изучения тонкой фракции осадков Мейдзи Дрифт (СКВ. 884, ODP) показано, что в периоды оледенения разрушаются породы с возрастом 40 — 60 млн лет с величиной $\epsilon_{\text{Nd}} -1$ — $+2$, а в межледниковые — более молодые (2 — 15 млн лет), где значение $\epsilon_{\text{Nd}} = +5$ — $+9$ [6]. Поэтому повышение величины ϵ_{Nd} в остаточной фракции Fe-Mn корок Северной Пацифики может служить признаком увеличения концентрации продуктов разрушения молодых пород островных дуг в периоды потепления.

Талые воды ледников, образующиеся в теплые периоды, несут взвесь с более отрицательным ϵ_{Nd} , чем воды холодных периодов. Кроме того, эти



Изотопный состав Sr и Nd в минеральных фазах железомарганцевых корок Северной Пацифики: а — обр. DR65-6/1; б — обр. DR65-6/2; в — обр. DR70-9/1; г — обр. DR70-9/2; д — обр. DR59-11/1; е — обр. DR59-11/2; ж — обр. DR23-5; ж — соотношение изотопов неодима и стронция в алюмосиликатной фазе всех проб

воды богаты углеродом и фосфат-ионом (PO_4^{3-}). Установлено, что фосфор тяготеет к оксигидроксидам железа. Таким образом, положительно заряженные оксигидроксиды железа (фаза III) сорбируют фосфатные комплексы РЗЭ в виде LnPO_4^0 , где изотопный состав неодима отличается более низким значением относительно окружающей морской воды. Марганцевые оксиды, которые имеют отрицательный поверхностный заряд (фаза II), захватывают монокарбонатную форму неодима, которая имеет положительный заряд (NdCO_3^+), без учета фосфатного комплекса.

Вторым фактором, который может действовать одновременно с первым, являются воды нижнего циркумполярного глубоководного течения (LCDW). Их изотопный состав Nd изменяется от $-9,5$ до $-7,8$ единицы эпсилон [4, 7]. В то время как значение ϵ_{Nd} тихоокеанских вод вне этого течения находится в интервале от $-3,5$ до $-3,0$ [4]. Как известно, воды Южного океана богаты кислородом и фосфатами. Таким образом, адвекция глубинной воды из Южного океана также может оказывать влияние на формирование изотопного состава третьей фазы Fe-Mn корок гайота Детройт и разломной зоны Стейлмейт, неся менее радиогенные фосфатные комплексы неодима.

Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ хемогенных фаз (I, II, III) близко друг к другу ($0,70913 \pm 0,00010$) и современной океанической воде ($0,70917$). Это подтверждает предположение о том, что между морской водой и Fe-Mn коркой происходят обмен и усреднение изотопного состава стронция. Поэтому данные, полученные по Fe-Mn коркам, нельзя использовать в рамках Sr-изотопной стратиграфии и определения времени формирования корки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00079, <https://rscf.ru/project/22-27-00079/>.

Список литературы

1. Михайлик П. Е., Вишневская И. А., Михайлик Е. В., Рашидов В. А., Савельев Д. П., Солошенко Н. Г. Изотопный состав Sr и Nd гидрогенных железомарганцевых корок Северной Пацифики // Изв. ТПУ. Инж. георес. 2023. № 334 (2). С. 7—21.
2. Horikawa K., Asahara Y., Yamamoto K., Okazaki Y. Intermediate water formation in the Bering Sea during glacial periods: Evidence from neodymium isotope ratios // Geol. 2010. № 38 (5). С. 435—438.
3. Jang K., Huh Y., Han Y. Diagenetic overprint on authigenic Nd isotope records: A case study of the Bering Slope // Earth Planet. Sci. Lett. 2018. Vol. 498. P. 247—256.
4. Prakash S. L., Ray D., Nagender Nath B., Satyanarayanan M., Kamesh Raju K. A., Kurian J. P., Dileep Kumar M., Srinivas Rao A. Anomalous phase association of REE in ferromanganese crusts from Indian mid-oceanic ridges: Evidence for large scale dispersion of hydrothermal iron // Chem. Geol. 2020. Vol. 549. 119679.
5. Tachikawa K., Arsouze T., Bayon G. et al. The large-scale evolution of neodymium isotopic composition in the global modern and Holocene ocean revealed from seawater and archive data // Chem. Geol. 2017. Vol. 457. P. 131—148.
6. VanLaningham S., Pisias N. G., Duncan R. A., Clift P. D. Glacial-interglacial sediment transport to the Meiji Drift, northwest Pacific Ocean: Evidence for timing of Beringian outwashing // Earth Planet. Sci. Lett. 2009. Vol. 277. P. 64—72.
7. Williams T. J., Martin E. E., Sikes E., Starr A., Umling N. E., Glaubke R. Neodymium isotope evidence for coupled Southern Ocean circulation and Antarctic climate throughout the last 118.000 years // Quat. Sci. Rev. 2021. Vol. 260. 106915.

СОСТОЯНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИЗУЧЕННОСТИ ДНА МИРОВОГО ОКЕАНА НА ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫЕ КОРКИ И КОНКРЕЦИИ

Калиниченко О. В., Остапюк Т. С., Телятникова О. В., Шумейкина Н. Е.

Морской филиал ФГБУ «Росгеолфонд», Геленджик, Россия
rfgf@marine.rfgf.ru

В статье представлены результаты работ Морского филиала ФГБУ «Росгеолфонд» по ведению геолого-геофизической изученности дна Мирового океана по железомарганцевым коркам и конкрециям. Приведены основные направления деятельности предприятия и условия предоставления дополнительных услуг.

Морские геологоразведочные работы, геолого-геофизическая изученность, Тихий океан, Индийский океан, Атлантический океан, обработка и хранение информации, фотопрофилирование. Морской филиал выполняет работы, связанные с формированием и ведением специализированного морского геологического фонда (Моргеолфонд), формированием и ведением специализированного банка данных морской геолого-геофизической информации (Моргеобанк) [1].

В хранилищах Морского филиала находится первичная и интерпретированная геологическая информация по континентальному шельфу, внутренним морским водам, территориальному морю Российской Федерации и Мировому океану общим объемом более 3 Пб. Основной объем информации составляют данные сейсморазведочных работ (ОГТ-2D/3D, МПВ, сейсмоакустическое профилирование), данные гравиразведки и магниторазведки. Хранятся также данные гидролокации бокового обзора, многолучевого эхолотирования, батиметрии, каротажа скважин, донного пробоотбора и других видов исследований.

В архивах Моргеолфонда хранится более 6 тыс. документов, в том числе более 3 тыс. геологических отчетов о результатах морских ГРР.

Важнейшей функцией Морского филиала является ведение геолого-геофизической изученности дна Мирового океана.

Подготовка данных по изученности Мирового океана рейсами НИС/объектами ГРР и занесение их в БД «Геология» выполняется в соответствии с «Инструкцией о порядке и форме представления результатов геологического, геохимического и геофизического изучения недр акваторий».

В базу данных (БД) «Геология» входят следующие таблицы: сведения об экспедиции, геологические станции, описание геологического разреза, характеристика физико-механических свойств, химический состав осадков и пород, химический состав воды, гранулометрический состав осадков и пород, сведения о геофизическом профиле, магнитометрия, гравиметрия, батиметрия, данные фототелепрофилирования.

Данные, хранящиеся в БД «Геология», используются для построения карт геолого-геофизической изученности.

По результатам геолого-геофизических экспедиций прошлых лет выделены рудные поля железомарганцевого оруденения Мирового океана (см. рис.). Наиболее перспективными рудными залежами железомарганцевых конкреций (ЖМК) является рудная область Кларион-Клиппертон, расположенная в северной приэкваториальной части Тихого океана между трансформными разломами Кларион и Клиппертон. Наиболее крупные поля кобальтоносных железомарганцевых корок (КМК) расположены в северо-западной приэкваториальной части Тихого океана, из которых перспективными являются залежи КМК Магеллановых гор.

Все минеральные ресурсы Мирового океана, а также процесс их освоения регулируется международным морским правом — Международным органом по морскому дну (МОМД).

В соответствии с заключенными контрактами Российская Федерация обладает исключительным правом на ведение работ в Российском разведочном районе кобальтоносных железомарганцевых корок, расположенном в пределах Магеллановых гор Тихого океана и в Российском разведочном районе месторождения железомарганцевых конкреций, расположенном в пределах Международного района морского дна — в рудной провинции Кларион-Клиппертон Тихого океана.

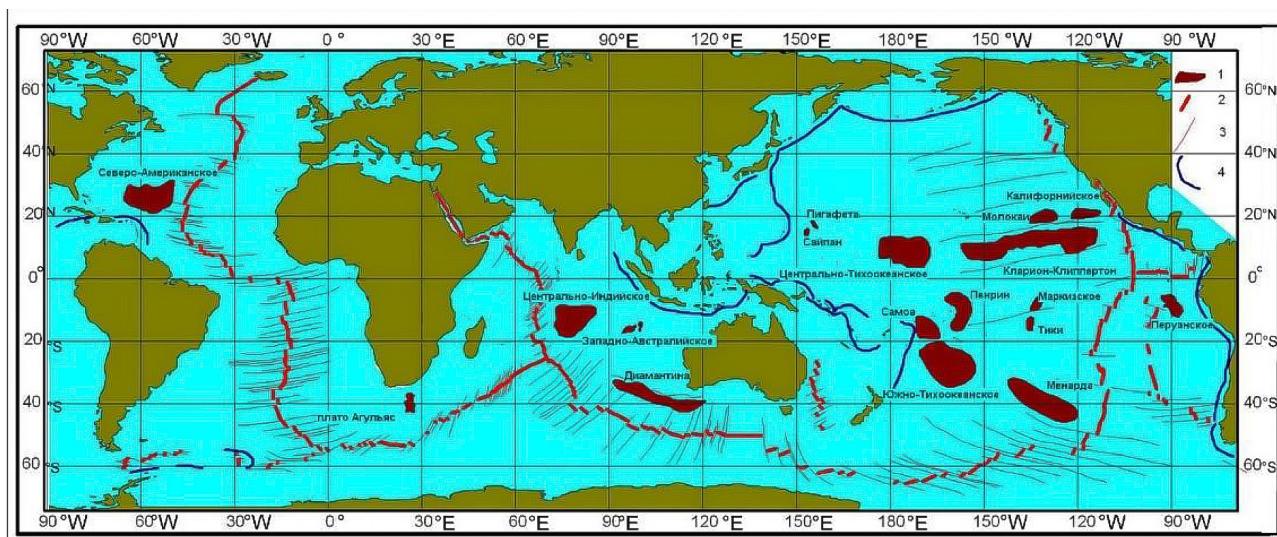


Схема расположения рудных полей железомарганцевого оруденения в Мировом океане

В архивах Моргеолфонда по теме «Состояние геолого-геофизической изученности дна Мирового океана по железомарганцевым коркам и конкрециям» находится 297 единиц хранения, в том числе 247 геологических отчетов о результатах морских ГРР в Тихом, Атлантическом и Индийском океанах, 50 альбомов снимков фотографирования морского дна Тихого океана, а также коллекции фототелепрофилирования (негативы и позитивы) дна Мирового океана.

В БД «Геология» занесена информация о профилях геофизических методов исследований, профилях фототелевизионных наблюдений, содержащих навигационно-геодезические данные (координаты, скорость ведения съемки, среднеквадратичную погрешность), вид работ, дату выполнения съемки. По фототелевизионным исследованиям занесены следующие сведения:

- координаты фотокадра;
- отстояние фототелевизионного аппарата от дна;
- номер профиля и номер фотокадра;
- наличие ЖМК и КМК;
- данные о плотности покрытия дна ЖМК и КМК.

Геолого-геофизическая изученность Мирового океана по объектам на поиски ЖМК и КМК

Вид работ	Тихий океан	Индийский океан	Атлантический океан
Сейсморазведка, км	400 000	113 000	177 300
Магниторазведка, км	580 000	167 354	618 773
Гравиразведка, км	33 900	94 332	604 500
Геоакустика, км	30 000	71	781
Эхолотный промер, км	732 000	10 800	52 800
Фотосъемка, км	33 000	160	0
Телесъемка, км	21 000	55	0
Геологическое опробование, ст.	15 189	1 191	594

Коллекции фототелепрофилирования имеют паспорта и каталоги по каждому объекту.

По результатам геологического опробования в базах данных внесены сведения о номере станции, координатах, глубине и времени отбора пробы, типе пробоотборника, массы поднятой пробы, описание ЖМК, КМК, осадков, коренных пород, о физико-механических свойствах поднятой пробы, описание геологического разреза, химического состава пород и осадков.

Состояние геолого-геофизической изученности Мирового океана по объектам на поиски ЖМК и КМК приведены в таблице.

Морским филиалом выполняются работы по обеспечению сохранности информации — сканирование коллекционного фонда данных фотопрофилирования дна Мирового океана.

Работы по сканированию данных фотопрофилирования проводятся с привлечением компании «ТОП-кадр». Морской филиал осуществляет методическое сопровождение работ, приемку отсканированных данных и оценку качества сканирования. Приемка осуществляется методом визуального просмотра отсканированных фотокадров с отметкой бракованных снимков. Каждый кадр имеет координатную привязку. Общий объем сканирования за 2020—2023 гг. составил 91 935 кадров.

Список литературы

1. Устящацев В. Л., Шумейкина Н. Е., Калиниченко О. В., Лукьянова С. Ю. Морские недра России: состояние изученности ресурсной базы // Neftegaz.RU. 2020. № 11.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РУДНЫХ ПОЛЕЙ (СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ, РОССИЙСКИЙ РАЗВЕДОЧНЫЙ РАЙОН)

Кондратенко А. В.¹, Егоров И. В.¹, Козлов С. А.²,
Бельтенев В. Е.¹, Васильева М. С.¹, Кондратюк Е. М.¹, Павлов А. С.¹

¹ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

² АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция»,

Санкт-Петербург, г. Ломоносов, Россия

kondr@vnio.nw.ru

KozlovSA@rusgeology.ru

Систематические инженерно-геологические исследования в Российском разведочном районе глубоководных полиметаллических сульфидов (PPP-ГПС) проводятся в рамках 15-летнего (2012—2027) контракта Минприроды с Международным органом по морскому дну. АО «ПМГРЭ» осуществляет организацию и проведение работ на НИС «Профессор Логачёв», получение информации о строении морского дна, пробоотбор руды, вмещающих горных пород и донных осадков. ФГБУ «ВНИИОкеангеология» изучает физико-механические свойства отобранных образцов и с привлечением полученных в рейсе материалов выполняет комплексную оценку инженерно-геологических условий рудных полей. На первом (поисковом) этапе разведочной деятельности (2012—2020) инженерно-геологические исследования были направлены на анализ рельефа дна, выявление и прогноз развития опасных геологических процессов, изучение физико-механических свойств сульфидных руд, вмещающих пород и донных осадков [6].

По состоянию на 2023 г. в результате многолетних экспедиционных исследований в PPP-ГПС открыто 23 рудных поля и 6 рудопроявлений, часть из которых объединена в 5 рудных узлов. Размеры рудных полей варьируются в пределах от 50×75 м до 1600×2700 м [4]. Прогнозные ресурсы ГПС в пределах Российского разведочного района по категориям P_2+P_3 превышают 100 млн тонн влажной руды [2].

Методика инженерно-геологических исследований. Инженерно-геологические исследования в PPP-ГПС выполняются попутно с проведением геологоразведочных работ без дополнительных затрат судового времени и при широком использовании геологических материалов (результаты батиметрической съемки масштаба 1:200 000, геоакустического и телепрофилирования, отбор образцов донных образований на борту судна) для инженерно-геологических построений (3D-модели и схемы уклонов поверхности дна, схемы инженерно-геологического районирования). Изучение

физико-механических свойств сульфидных руд, вмещающих пород и донных осадков выполняется в судовой и стационарной лабораториях и регламентируется методическими рекомендациями, учитывающими особенности глубоководных донных образований [3].

Особенности геологического строения. Особенностью строения Срединно-Атлантического хребта (САХ) является наличие четко выраженной рифтовой долины, приуроченной к осевой части хребта. Основная часть рудных объектов приурочена к бортам рифтовой долины. В геологическом строении региона принимают участие донные осадки, вулканические породы (толеитовые базальты) и породы габбро-перidotитового комплекса. Донные осадки представлены биогенными карбонатными илами, преобладающая мощность которых составляет 1—3 м. Вблизи рудных построек формируются металлоносные (рудоносные) осадки, мощность которых не превышает 0,5—0,6 м и уплотненные, гидротермально измененные карбонатные осадки. Мантийные и нижнекоровые породы габбро-перidotитового комплекса фиксируются в бортах рифтовой долины в виде крупных блоков. Мантийные породы представлены в различной степени серпентинизированными перidotитами, нижнекоровые породы — габброидами. Сульфидное оруденение представлено как отдельными рудными постройками различной морфологии высотой до нескольких метров, так и крупными рудными холмами.

Рельеф дна. Гидротермальные рудные поля РРР-ГПС локализованы в батиметрическом интервале от 1940 м (рудное поле Пюи де Фоль) до 4200 м (рудное поле Ашадзе-1). Перепад глубин океана в пределах рудных полей колеблется от 50—60 до 400—500 м.

Важное значение для оценки степени сложности проведения разведочных и добывчих работ в пределах рудных полей имеет характер микрорельефа дна. Встречаются развалы коренных пород; сульфидные постройки с трубными комплексами (высота которых достигает 40 м) и их развалами; сульфидные холмы высотой 10—20 м; трещины и уступы. Очевидно, что крутые склоны, а также сложный и разнообразный микрорельеф рудных полей следует учитывать при проектировании буровой техники и агрегатов добычи ГПС.

Физико-механические свойства донных образований. Сульфидные руды. Массивные сульфидные руды представлены различными минеральными ассоциациями. Главные рудные минералы — пирит, марказит, халькопирит и сфалерит. Основные нерудные минералы — кварц, опал и барит. В связи с разнообразием минерального состава и структурно-текстурными особенностями сульфидных руд их физико-механические свойства изменяются в очень широких пределах: плотность породы — 1,77—4,52 г/см³, предел прочности на одноосное сжатие — 0,6—198,0 МПа (рис. 1).

Магматические породы. Магматические породы, вмещающие сульфидные руды, представлены базальтами и породами габбро-перidotитового комплекса. Базальты, как правило, скальные породы высокой плотности и прочности (плотность породы — 2,64—2,94 г/см³, предел прочности на одноосное сжатие — 93,4—295,0 МПа). Габброиды (плотность породы — 2,60—3,06 г/см³, предел прочности на одноосное сжатие — 28,3—164,0 МПа) и серпентинизированные перidotиты (плотность породы — 1,45—2,82 г/см³, предел прочности на одноосное сжатие — 1,8—131,8 МПа) существенно уступают базальтам по прочностным характеристикам (см. рис. 1).

Существенное влияние на физико-механические свойства вмещающих пород оказывают процессы гидротермальной деятельности. В процессе гидротермальной проработки базальты и породы габбро-перidotитового комплекса претерпевают изменения, которые приводят к их разуплотнению (увеличивается пористость, уменьшается плотность породы) и разупрочнению (уменьшается прочность) [7].

Результаты изучения физико-механических свойств сульфидных руд и вмещающих пород свидетельствуют о крайней неоднородности и высокой степени их изменчивости как в пределах рудных полей, так и между рудными объектами.

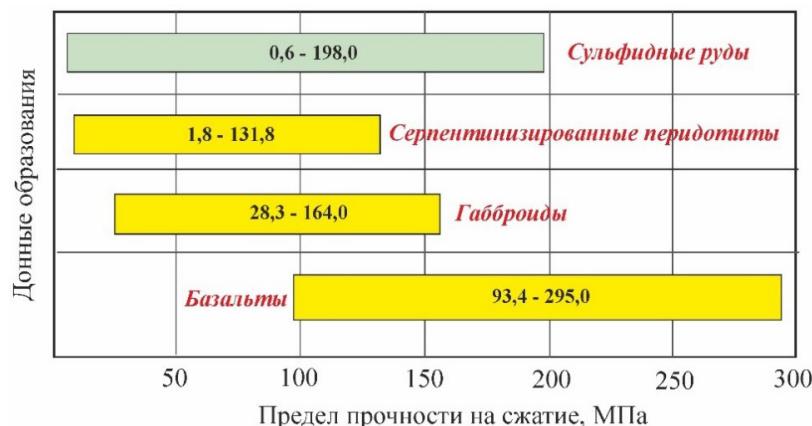


Рис. 1. Предел прочности на сжатие сульфидных руд и горных пород РРР-ГПС [7]

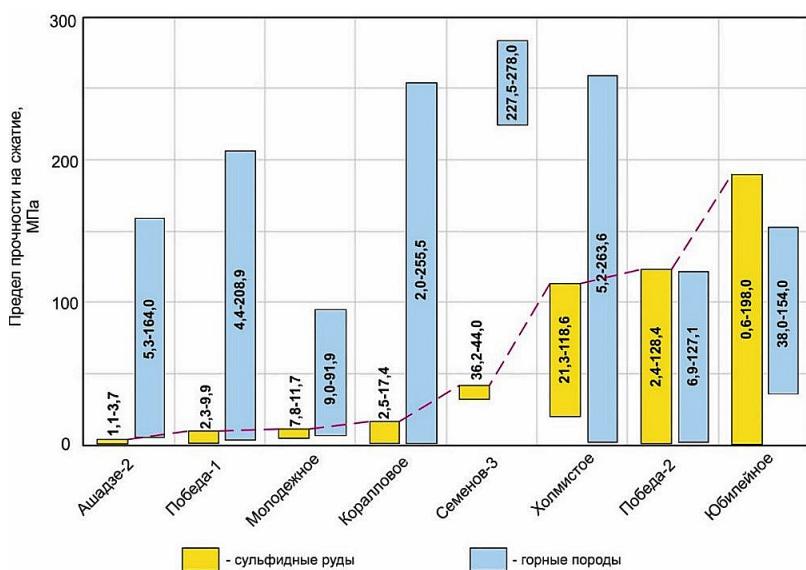


Рис. 2. Изменчивость значений предела прочности на сжатие в массивных сульфидных рудах и вмещающих породах на рудных полях РРР-ГПС

Физико-механические свойства сульфидных руд и вмещающих пород — один из элементов инженерно-геологических условий, который подчеркивает своеобразие каждого рудного поля (рис. 2).

Донные осадки. Донные осадки в пределах рудных полей представлены биогенными фораминиферовыми, кокколитово-фораминиферовыми и фораминиферово-кокколитовыми, преимущественно сильнокарбонатными ($\text{CaCO}_3 \geq 75\%$) и карбонатными ($50\% \leq \text{CaCO}_3 < 75\%$), разновидностями (см. табл.), а также птероподовыми песками, последние из которых обычно формируют поверхностный слой осадков. Вблизи рудных построек залегают карбонатные металлоносные (рудоносные) осадки. Донные осадки, как правило, обрамляют рудные постройки или перекрывают рудные тела. Мощность донных осадков изменяется в пределах от первых сантиметров до первых метров.

Основные закономерности пространственной изменчивости физико-механических свойств осадков карбонатного ряда определяются содержанием в осадках CaCO_3 и продуктов гидротермальной деятельности (гидроксидов железа и рудных минералов) и контролируются вертикальной зональностью осадконакопления.

Опасные геологические процессы. Одним из важных направлений оценки инженерно-геологических условий рудных объектов является прогноз развития опасных геологических процессов, которые определяют природные риски, возникающие при проведении разведочных и добывочных работ. К ним следует отнести гидротермальную активность в пределах рудных полей, сейсмическую активность региона и проявление склоновых (гравитационных) процессов.

Физико-механические свойства донных осадков PPP-ГПС ([8], с дополнением)

Рудное поле (рудопроявление)	Тип осадка	Интервал отбора, см	Плотность грунта, $\text{г}/\text{см}^3$	Влажность, %	Сопротивление вращательному срезу, кПа	Кол-во определений
Ашадзе-1	K	10—30	1,44—1,47	119—130	2,9—5,3	3
Ашадзе-2	K	5—40	1,49—1,57	89—110	4,0—9,2	21
Ашадзе-3	K	15—55	1,43—1,50	107—134	2,8—9,0	6
Юбилейное	K	2—75	1,45—1,57	88—141	2,8—8,4	11
	K(m)	25—30	1,52	126	3,5	1
Победа-2	K(p)	5—40	1,40—1,46	125—166	8,9—12,2	4
Победа-3	K(p)	15—55	1,54—1,58	90—93	4,3—5,9	2
Коралловое	K	6—52	1,48—1,53	99—104	4,8—8,1	4

Примечание. K — сильнокарбонатные и карбонатные осадки; m — металлоносные ($10\% \leq \text{Fe}_{\text{бкв}} < 30\%$, $[\text{Cu} + \text{Zn}]_{\text{бкв}} < 0,25\%$) осадки; p — рудосодержащие ($10\% \leq \text{Fe}_{\text{бкв}} < 30\%$, $[\text{Cu} + \text{Zn}]_{\text{бкв}} \geq 0,25\%$) осадки.

На большей части рудных объектов выявлены прямые (визуальные) или косвенные признаки современной гидротермальной активности, что значительно повышает коррозионную агрессивность морской среды по отношению к конструкционным материалам.

Сейсмическая активность региона, наряду с уклонами поверхности дна, является одним из основных факторов, определяющих интенсивность проявления опасных геологических (гравитационных) процессов в пределах рудных объектов ГПС. По результатам сейсмического мониторинга САХ [1], максимальное значение магнитуды в регионе достигает 5,8.

Значительные площади рудных полей находятся на склонах, уклоны которых превышают 15° и более. Эти поверхности являются потенциально опасными с точки зрения развития на них гравитационных процессов, инициированных сейсмической активностью или техногенным воздействием при проведении разведочных или добывчих работ [5]. В процессе исследований рельефа рудных полей зафиксировано проявление различного рода гравитационных процессов, таких как оползание осадков, осыпание и обрушение горных пород.

Инженерно-геологическое районирование и типизация рудных полей.

Важнейшим итогом инженерно-геологических исследований, выполненных на первом этапе разведочной деятельности, является формирование предварительных представлений о сложности инженерно-геологических условий разведки и разработки изученных рудных полей.

Для количественной оценки влияния рельефа дна на сложность инженерно-геологических условий рудных объектов выполнено инженерно-геологическое

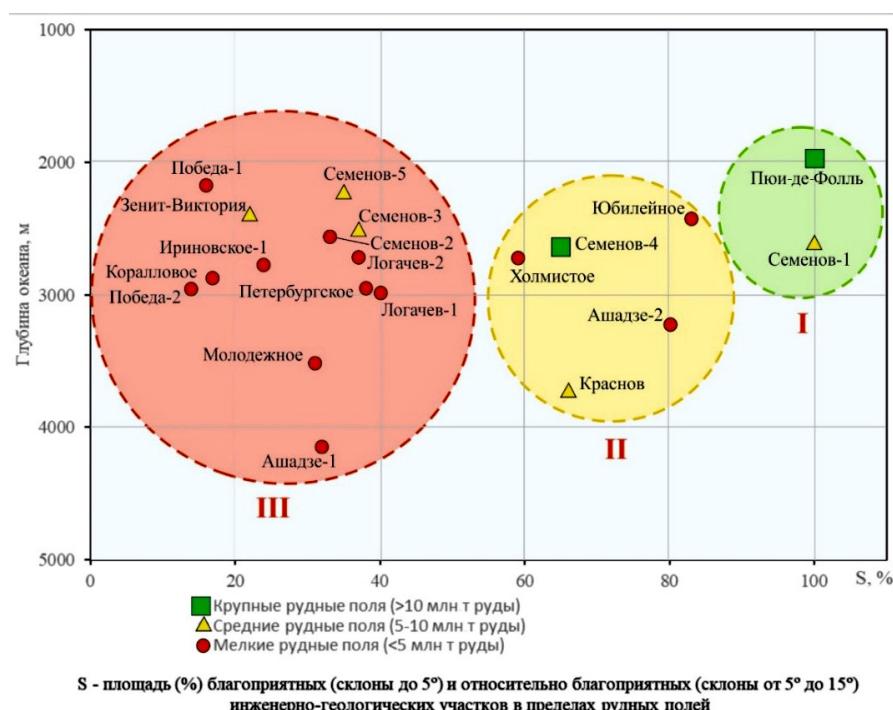


Рис. 3. Инженерно-геологические условия разведки (разработки) рудных полей ГПС (I — простые, II — средней сложности, III — сложные) и рудный потенциал РРР-ГПС

районирование. В качестве критерия инженерно-геологического районирования рудных полей был принят геоморфологический признак (уclоны поверхности дна), определяющий морфологические особенности поверхности дна и их связь с развитием гравитационных процессов [5]. На схемах инженерно-геологического районирования были выделены три типа инженерно-геологических участков по условиям разведки и разработки ГПС: благоприятные (уclоны дна до 5°); относительно благоприятные (уclоны дна от 5 до 15°); неблагоприятные (уclоны дна свыше 15°). Это выделение участков носит условный, самый предварительный характер, учитывая отсутствие сведений о характере предстоящей добычи.

Результаты инженерно-геологического районирования свидетельствуют о высокой степени неоднородности инженерно-геологических условий изученных рудных полей относительно друг друга. На большей части рудных полей (13 из 20 рудных полей) площадь неблагоприятных участков, расположенных на склонах свыше 15°, превышает 60%. На пяти рудных полях площадь неблагоприятных участков варьируется от 20 до 41%. И только в пределах рудных полей Пюи де Фоль и Семёнов-1 полностью отсутствуют неблагоприятные участки.

По результатам инженерно-геологического районирования рудные поля типизированы по сложности инженерно-геологических условий. По соотношению площадей различных типов инженерно-геологических участков в пределах рудных полей выделено три категории сложности инженерно-геологических условий локализации рудных полей (рис. 3).

I категория — рудные поля, залегающие в простых инженерно-геологических условиях. В пределах рудных полей этого типа отсутствуют неблагоприятные участки с уclонами дна свыше 15°. К этой категории относится крупное рудное поле Пюи де Фоль, локализованное на горизонтальных и субгоризонтальных (уclоны дна до 5°) участках дна, на вершине крупнейшего в рифтовой долине САХ вулкана центрального типа, и небольшое рудное поле Семёнов-1 в составе крупного рудного узла Семёнов.

II категория — рудные поля, залегающие в инженерно-геологических условиях средней сложности. Это рудные поля (Ашадзе-2, Юбилейное, Краснов, Семёнов-4 и Холмистое), в пределах которых благоприятные и относительно благоприятные участки дна занимают более 50% их общей площади.

III категория — рудные поля, залегающие в сложных инженерно-геологических условиях. В пределах этих рудных полей благоприятные и относительно благоприятные участки дна занимают менее 50% их общей площади. В эту категорию вошло 13 рудных полей.

Суммарно на всех рудных полях РРР-ГПС благоприятные и относительно благоприятные участки занимают 46% площади рудных полей. Остальные 54% —

участки неблагоприятные как для проведения геологоразведочных и инженерно-геологических работ, так и для последующей разработки ГПС. В дальнейшем, на втором (оценочном) этапе разведочной деятельности и по мере детализации геологоразведочных работ, критерии сложности инженерно-геологических условий будут уточняться.

Выводы

1. Объектами инженерно-геологических исследований в РРР-ГПС являются трехмерные залежи полиметаллических сульфидов с горизонтальными размерами от 50×75 до 1600×2700 м, локализованные в батиметрическом интервале от 1940 до 4200 м.
2. Потенциальным объектом добычи могут стать сульфидные руды массивной текстуры, представленные минеральными ассоциациями, включающими рудные (пирит, марказит, халькопирит и сфалерит) и нерудные (кварц, опал, барит) минералы. Показатели физико-механических свойств сульфидных руд изменяются в широких пределах: плотность — $1,77\text{--}4,52$ г/см³, прочность на сжатие — $0,6\text{--}198,0$ МПа.
3. Магматические породы, вмещающие сульфидные руды, представлены скальными и полускальными породами преимущественно высокой прочности и разной степени разупрочнения: серпентинизированными перidotитами (предел прочности на сжатие — $1,8\text{--}131,8$ МПа), габброидами (предел прочности на сжатие — $28,3\text{--}164,0$ МПа) и базальтами (предел прочности на сжатие — $93,4\text{--}295,0$ МПа).
4. Осадочный чехол преимущественно маломощный, при значительной мощности может представлять препятствие для добычи сульфидов. Сформирован слабыми (сопротивление вращательному срезу — $4,3\text{--}12,2$ кПа; плотность грунта — $1,40\text{--}1,59$ г/см³) биогенными осадками карбонатного ряда с низкой несущей способностью.
5. По результатам предварительного инженерно-геологического районирования условно выделено три категории сложности инженерно-геологических условий: I) простые условия (рудные поля Пюи де Фоль, Семёнов-1); II) условия средней сложности (рудные поля Юбилейное, Краснов, Холмистое, Семенов-4 и Ашадзе-2); III) сложные условия (рудные поля Петербургское, Зенит-Виктория, Победа-1, Победа-2, Логачёв-1, Логачёв-2, Семёнов-2, -3, -5, Ириновское-1, Молодежное, Коралловое, Ашадзе-1).
6. На последующих стадиях геологоразведочных работ предполагается расширить перечень критериев для оценки сложности инженерно-геологических условий, включив в их число распространение и физико-механические свойства донных образований, а также проявления современной гидротермальной активности.

Список литературы

1. Болдырев С. А. Сейсмогеодинамика Срединно-Атлантического хребта. М.: Национальный геофизический комитет РФ, 1998. 126 с.
2. Козлов С. А., Бельтенев В. Е., Иванов В. Н., Каулио В. М., Самоваров М. Л. Перспективы изучения полиметаллических сульфидов Атлантики // Разведка и охрана недр. 2016. № 12. С. 24—32.
3. Методические рекомендации по технологии геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые в Мировом океане (железомарганцевые образования, глубоководные полиметаллические сульфиды, донные осадки). Кн. 3. Контактные методы исследования. М., 2001. С. 84—103.
4. Мировой океан. Т. III. Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты в океане. М.: Научный мир, 2018. 708 с.
5. Kondratenko A. V., Egorov I. V. Engineering-geological zoning of hydrothermal ore fields on the Mid-Atlantic ridge // Minerals of the ocean-7 & Deep-sea minerals and mining-4. International conference 2—5 juone, 2014. St. Petersburg, VNIIOkeangeologia, 2014. P. 52—54.
6. Kondratenko A. V., Egorov I. V., Ivanov V. N., Kell D. L. Engineering geological study of hydrothermal polymetallic sulphides ore fields / Proc. of the Twenty-seventh International Ocean and Polar Engineering Conference. San Francisco, CA, USA, June 25—30, 2017. Vol. 1. P. 52—57.
7. Kondratenko A. V., Egorov I. V., Ivanov V. N., Kell D. L. Stepanova M. S. Physical-mechanical properties of the bottom formations of the hydrothermal ore fields on the Mid-Atlantic Ridge / The Proc. of the Twenty-eighth International Ocean and Polar Engineering Conference. Sapporo, Japan, June 10—15, 2018. P. 106—111.
8. Kondratenko A. V., Ivanov V. N., Beltenev V. E., Kozlov S. A. Physical-mechanical properties of ground formations of ore unit Achadze (Mar, 130 N) // Minerals of the ocean-4. The international conference. St. Petersburg, VNIIOkeangeologia, 2008. P. 89—92.

ГЕНЕЗИС ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОРОК ЯН-МАЙЕНСКОЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ, ХРЕБЕТ МОНА

Кравчишина М. Д.¹, Кузнецов А. Б.², Стародымова Д. П.¹, Дара О. М.¹,
Чеботарева В. А.², Клювихин А. А.¹, Баранов Б. В.¹, Леин А. Ю.¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Институт геологии и геохронологии докембра РАН, Санкт-Петербург, Россия
kravchishina@ocean.ru

К северу от Ян-Майенской зоны разломов на 71.2° с.ш. расположено осевое вулканическое поднятие (ОВП) — наиболее крупный структурный элемент хребта Мона, который, в свою очередь, является заполярным участком Срединно-Атлантического хребта (САХ). В пределах ОВП находятся рифты и относительно мелководные гидротермальные постройки с «белыми и серыми курильщиками», расположенными на разных глубинах рифтовой зоны, от 550 до 724 м, и отличающимися прежде всего по температуре флюидов (от ~100 до 320 °C). Исследование геологии, геохимии и биоты гидротермальных полей на южном сегменте хребта Мона началось с 2005 г. Было обнаружено несколько активных среднетемпературных гидротермальных полей: Troll Wall, Soria Moria и Perle & Bruse, а также одно неактивное поле Gallionella Garden. Поэтому южный сегмент хребта Мона принято называть Ян-Майенским гидротермальным районом [6].

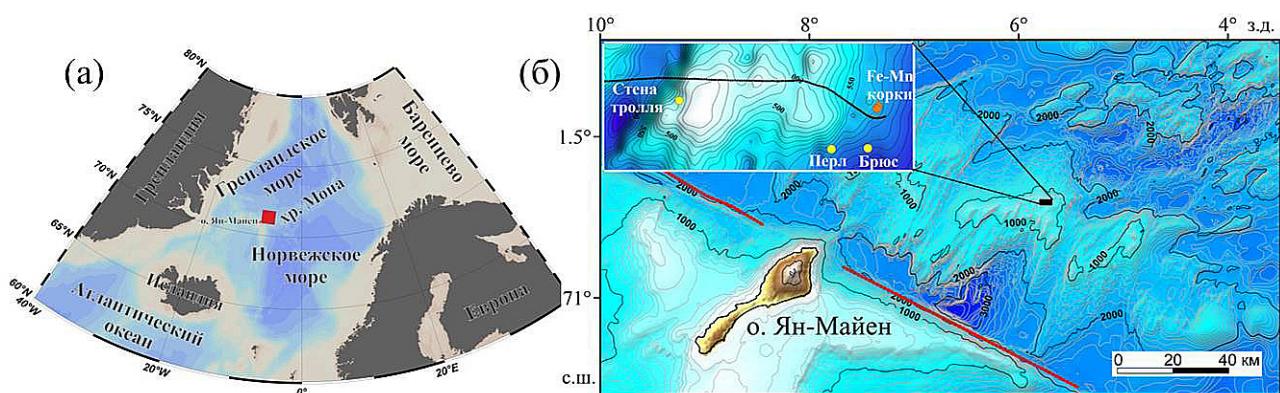


Рис. 1. Положение Ян-Майенской гидротермальной области (а), места отбора железомарганцевых корок и гидротермальных полей (б) в пределах осевого вулканического поднятия. Красная линия — Ян-Майенский трансформный разлом

Исследования на активных гидротермальных полях проводятся в ИО РАН начиная с 1980 г.; изучение признаков гидротермальной активности на хребте Мона выполнялось в 1995 г. [1]. Наши исследования гидротермальных систем на хребте Мона начались с 2017 г. [4], а в 2019 г. на восточном склоне ОВП впервые были обнаружены уникальные железомарганцевые (Fe-Mn) корки [3].

Восемь образцов Fe-Mn корок толщиной ~3 см и размером до ~30×15 см отобраны с помощью дночерпателя «Океан-50» в 75-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» на восточном фланге ОВП с глубины 572 м на расстоянии ~600 м к северу от гидротермального поля Perle & Bruse. Образцы корок был распилены, после осмотра выделены слои, из которых отобраны пробы для минералогического и геохимического анализов, а из образца 5 — для изотопно-геохимического анализа. Петрографическое изучение выполнено на оптическом микроскопе и сканирующем электронном микроскопе с энергодисперсионным спектрометром. Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре Bruker D8 Advance согласно методике О. Г. Сметанниковой (1988) в ИО РАН. Изучение химического состава проб выполнено методами масс-спектрометрии и атомной эмиссии с индуктивно связанный плазмой в ИПТМ РАН. Изотопный состав Nd и Sr определен в пяти пробах из выделенных слоев одного образца корки на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в ИГГД РАН.

Fe-Mn корки — плитчатые слоистые образования, перекрытые с поверхности слоем (2—4 см) алевритово-пелитового ила с примесью песка. Кровля (верхняя поверхность) корок черная, массивная, шероховатая с каналообразными структурами; основание (нижняя поверхность) неровное, мелкобугорчатое, местами гладкое, покрытое слоем ~1—3 мм железистого вещества и колломорфными оксигидроксидами Fe и Mn. Структура — тонкослоистая; слои 0,3—1 мм рудного вещества содержат примесь нерудного — вулканического стекла. Fe-Mn корки являются седиментационными образованиями, что проявляется в слоистом строении и изменении от слоя к слою концентрации рудных компонентов и нерудного вещества.

В составе рудного вещества Fe-Mn корок идентифицированы две группы гидроксидов марганца, среди которых преобладает 7 Å минерал — бернессит. Группа 10 Å минералов представлена бузеритом I, а в качестве примеси в отдельных слоях диагностирован неупорядоченный смешанно-слоистый гидроксид марганца. Минералы железа не удалось установить по данным РФА. Здесь рудная минерализация имеет марганцевую специализацию. Примесь вулканического стекла в разных слоях корок варьируется от 22 до 63%. Содержание Fe достигает 13,9% только в слое охристо-желтого цвета в основании корок, варьируясь от 5,2 до 1,6% в составе их слоев. В противоположность этому содержание Mn увеличивается от 3,5% в основании до 12—33% в поверхностном слое. Между содержаниями Mn и Fe, а также Mn и Al в слоях корок существует надежная обратная зависимость.

Слои поверхности и основания корок существенно различаются по концентрации не только матричных элементов, но и микроэлементов. Во внутренних слоях преобладают «чистые» оксигидроксиды Mn, а также марганцевые разности, концентрирующие Co, реже — Ni (см. табл.). Концентрация РЗЭ понижается в направлении от основания к поверхности корок. Эта тенденция находится в прямой зависимости от содержания Fe, а также Al, но в обратной — от содержания Mn. На спектрах распределения РЗЭ наблюдается незначительная отрицательная Ce-аномалия. Величина Ce/Ce^{NASC} (Ce_{an}) меняется от 0,80 до 0,96 при переходе от основания к поверхности корки (рис. 2). Более существенно в образцах проявлена положительная Eu-аномалия, которая в большинстве проб варьируется от 1,41 до 1,36 и лишь в самом верхнем слое понижается до 1,08—1,18. Отношение Y/Ho составляет 28 (в центре) и 33 (в кровле).

Минералогические и петрографические данные для изученного образца показывают осадочное происхождение Fe-Mn корок, а полученные изотопно-геохимические данные свидетельствуют о высоком вкладе гидротермального материала в состав Fe-Mn корок. Преобладающие высокие значения ε_{Nd} 5,8—6,2 совпадают с таковыми в океанических базальтах САХ и значительно отличаются от Nd-характеристик континентальных пород, обрамляющих Северную Атлантику. Значение ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr хотя несколько выше, чем в гидротермальных растворах, поступающих из рифтовых ячеек САХ (0,7035±0,0005), но значительно отличается от отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в современном океане — 0,70920 [5]. Спектры распределения РЗЭ в Fe-Mn корке близки к составу океанических базальтов, но демонстрируют большее обогащение легкими РЗЭ. Такое обогащение легкими РЗЭ и положительная Eu_{an} во всех слоях Fe-Mn корки указывают на генетическую связь с гидротермальными растворами САХ [2].

Содержание РЗЭ и изотопный состав Sr и Nd в изученных слоях образца № 5 Fe-Mn корки: 1 — основание; 2—5 — внутренняя часть; 6 и 7 — поверхность [3]

Слой	Fe	Mn	Al	Co	Ni	РЗЭ	Eu/Eu ^{NASC}	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	ε _{Nd} *
	%	мкг/г								
1	13,9	3,5	5,9	660	107	124	1,36	0,70621	0,512945	6,0
2	5,2	13,9	5,5	2697	267	91	1,41	—	—	—
3	4,2	21,5	3,9	1964	173	72	1,36	0,70662	0,512954	6,2
4	3,9	21,3	3,7	5140	431	85	1,33	0,70713	0,512935	5,8
5	3,0	23,6	3,2	580	665	61	1,38	0,70713	0,512926	5,6
6	4,8	12,1	4,7	286	665	109	1,08	0,70740	0,512633	-0,1
7	1,6	33,3	1,1	3442	863	61	1,18	—	—	—

* Величины ε_{Nd}(0) рассчитаны с использованием значений для CHUR (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0,512638, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd = 0,1967).

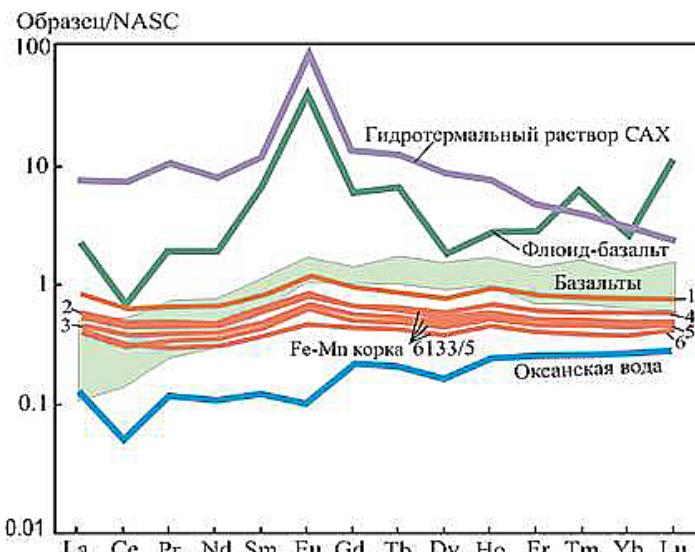


Рис. 2. Распределение РЗЭ, нормализованных на состав РЗЭ в NASC, в слоях Fe-Mn корки в сравнении с составом РЗЭ в других объектах [3]

Уменьшение концентрации Fe, РЗЭ и отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и одновременное понижение значений Eu_{an} и ϵ_{Nd} при переходе от нижних к верхним слоям корки свидетельствуют об ослаблении влияния гидротермального источника по мере роста Fe-Mn корки и увеличении доли гидрогенных оксигидроксидов Mn и Fe. Sr и Nd изотопные характеристики верхних слоев быстро смещаются в сторону равновесия с океанской водой. Так, в случае медленного (от нескольких сотен тысяч до первых миллионов лет) осаждения

оксигидроксидов Fe и Mn на поверхности глубоководных осадков их Sr и Nd изотопные характеристики уравниваются с придонной морской водой. Учитывая небольшую толщину корок, можно уверенно говорить о быстром наступлении равновесия в изученных Fe-Mn корках, что подтверждает высокую скорость их кристаллизации. Таким образом, быстро растущие микрослоистые Fe-Mn корки на склоне ОВП имеют преимущественно гидротермальный генезис. Очевидно, что они значительно моложе по времени образования классических пелагических глубоководных Fe-Mn конкреций.

Список литературы

1. Богданов Ю. А., Сагалевич А. М., Галкин С. В. и др. Геологические и биологические исследования в северной части хребта Мона (Норвежское море) // Океанология. 1997. № 37 (4). С. 609—616.
2. Дубинин А. В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.
3. Кравчишина М. Д., Кузнецов А. Б., Баранов Б. В. и др. Гидротермальный генезис железомарганцевой корки южного сегмента хребта Мона, Норвежское море: геохимия РЗЭ, изотопный состав стронция и неодима // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. № 506 (2). С. 163—169.
4. Кравчишина М. Д., Леин А. Ю., Боев А. Г. и др. Гидротермальные минеральные ассоциации на 71° с.ш. Срединно-Атлантического хребта // Океанология. 2019. № 59 (6). С. 1039—1057.
5. Кузнецов А. Б., Семихатов М. А., Горохов И. М. Изотопный состав Sr в водах Мирового океана, окраинных и внутренних морей: возможности и ограничения Sr-изотопной хемостратиграфии // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2012. № 20 (6). С. 3—19.
6. Pedersen R. B., Rapp H. T., Thorseth I. H. et al. Discovery of a black smoker vent field and vent fauna at the Arctic Mid-Ocean Ridge // Nature Communication. 2010. Vol. 1 (8).

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОНОСНЫХ ОСАДКОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО РУДНОГО УЗЛА СЕМЁНОВ

Кукса К. А.¹, Бич А. С.², Черкашёв Г. А.^{1, 2}, Фирстова А. В.²,
Кузнецов В. Ю.¹, Бельтенев В. Е.², Болтрамович С. Ф.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

kkuksa@gmail.com

Металлоносные осадки, ассоциирующие с современными океанскими рудогенерирующими системами, традиционно используются для реконструкции этапов усиления/ослабления гидротермальной деятельности. В зависимости от удаленности от места разгрузки флюида они подразделяются на так называемые проксимальные и дистальные осадки. Геохимические исследования и датирование осадков, развитых в пределах рудных полей (так называемых проксимальных), содержащих значительное количество продуктов деятельности «черного курильщика», дают возможность получить «непрерывную запись» гидротермальных событий и реконструировать эволюцию гидротермальной системы во времени. Однако данный подход часто сталкивается с трудностями, вызванными присутствием в составе осадков, помимо вещества взвеси гидротермального плюма, продуктов разрушения расположенных в непосредственной близости древних сульфидных построек [5, 7]. Поскольку оба компонента имеют очень близкий макроэлементный состав, их различение и количественный учет доли обломочных сульфидов для корректной реконструкции истории гидротермальной деятельности представляют собой нетривиальную задачу. В представленной работе мы попытались решить ее на примере колонок металлоносных осадков рудного узла Семёнов.

Рудный узел Семёнов располагается в западному борту рифтовой долины САХ на 13°31' с.ш. В его состав входит пять гидротермальных рудных полей. Самое крупное гидротермальное поле Семёнов-4 расположено на базальтах, тогда как остальные четыре поля (1, 2, 3 и 5) локализованы в пределах массива внутреннего океанического комплекса, сложенного ультраосновными породами (серпентинизированными перidotитами и редкими габброидами [10]).

Методом ИСП-МС был определен химический состав и изучено распределение основных, редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) в проксимальных

металлоносных осадках гидротермальных полей Семёнов-1 (колонка 32L307), Семёнов-2 (колонка 32L285) и Семёнов-4 (колонка 32L368). Осадочные колонки длиной 50, 50 и 55 см, соответственно, представлены буро-коричневыми, красно-коричневыми и рыжими глинистыми, реже — слабокарбонатными отложениями песчаной или песчано-дресвяной размерности. В них встречаются минералы железа (пирит, пирротин), меди (халькопирит, самородная медь, атакамит), барит и оксигидроксиды железа [9, 11]. Карбонатность осадков варьируется от 8 до 38%, при этом наиболее высокие содержания CaCO_3 характерны для колонки 32L307 (в среднем 30%), а наименьшие — для колонки 32L368 (в среднем 10%). Содержание рудных элементов в пересчете на бескарбонатную основу варьируется в широком диапазоне: 2—50% $\text{Fe}_{\text{бкв}}$, 0,004—1,1% $\text{Cu}_{\text{бкв}}$ и 0,007—0,25% $\text{Zn}_{\text{бкв}}$. При этом концентрации как основных, так и примесных элементов испытывают значительные колебания по глубине (рис. 1).

Спектры распределения РЗЭ пологие со значительным обогащением легкими лантаноидами (рис. 2). В осадках всех трех колонок наблюдаются едва заметные отрицательные аномалии церия ($\text{Ce}/\text{Ce}^*=0,44—0,88$) и сильно выраженные положительные аномалии европия ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=1,4—94,0$). Наибольшая величина Eu аномалии характерна для осадков поля Семёнов-4 (32L368), что уже отмечалось ранее другими исследователями [8]. В то же время в осадках колонки 32L307 поля Семёнов-1 положительная европиевая аномалия проявлена в значительно меньшей степени ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0,81—3,93$), а в двух пробах ее знак меняется на противоположный. В целом спектры распределения РЗЭ в изученных колонках наиболее близки

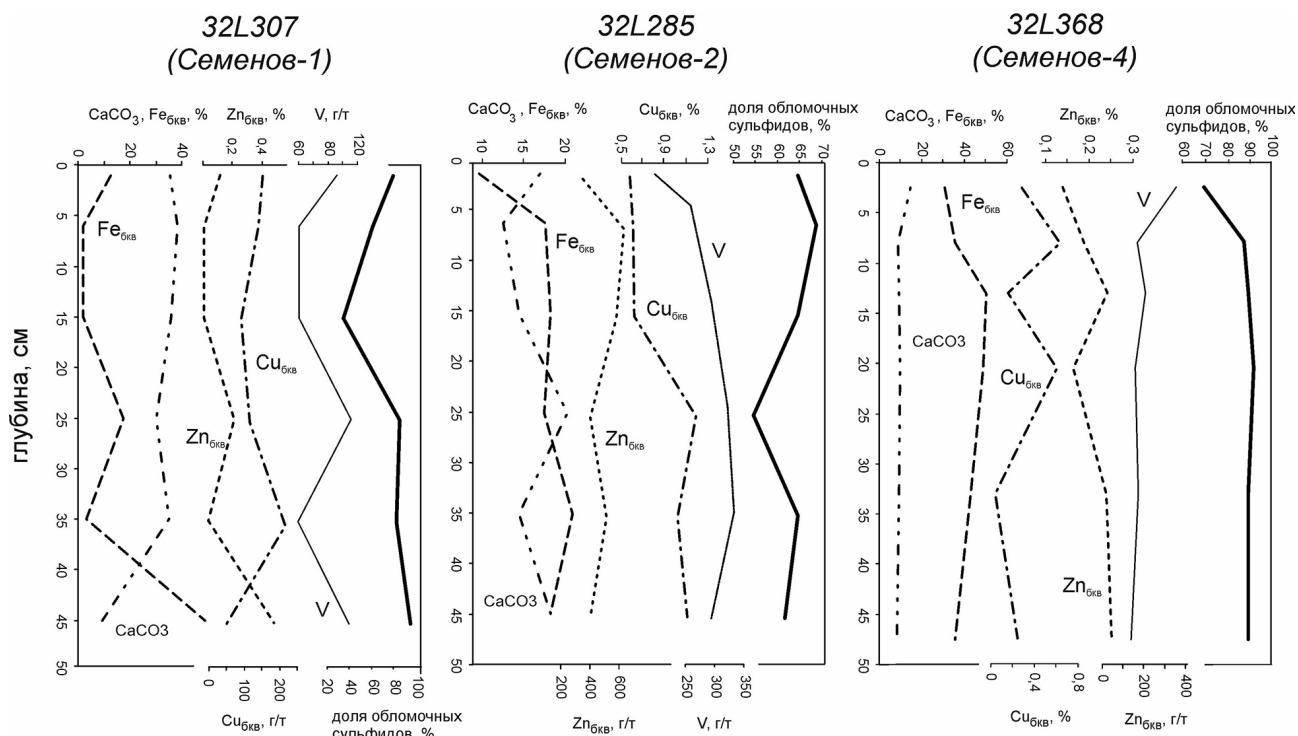


Рис. 1. Вариации распределения CaCO_3 , Fe , Cu , Zn , V и расчетной доли обломочного сульфидного материала (см. текст ниже) по глубине осадочных колонок

к спектрам металлоносных осадков других гидротермальных полей, сложенных обломками разрушающихся сульфидных построек и/или взвесью материала черного курильщика [4, 7]. Однако количественно оценить вклад каждого из этих компонентов в осадки на основе данных по распределению РЗЭ не представляется возможным, поскольку даже после захоронения вещества плюмовой взвеси оно продолжает сорбировать лантаноиды из контактирующей с осадком морской воды [3].

Для решения данной задачи была использована методика, разработанная нами ранее для проксимальных металлоносных осадков рудного узла Победа [6].

В качестве представителя фоновых пелагических илов Атлантического океана были использованы величины среднего состава осадков колонки BOFS 22#6M/23#12M [1]. Влияние состава подстилающих пород было оценено на основе элементного состава перидотита 32л242-5, отобранного в пределах рудного узла [9]. Учет доли вещества взвеси гидротермального плюма в осадках трех исследуемых колонок проводился по величине V/Fe отношения в плюме поля Рейнбоу [2] и собственным неопубликованным данным по химическому составу массивных сульфидных руд полей Семёнов-1, -2 и -4. Полученные результаты показали (см. рис. 1), что в среднем относительное количество в осадках обломочного сульфидного материала составляет ~73, 64 и 87%, соответственно, для колонок 32L307 (Семёнов-1), 32L285 (Семёнов-2) и 32L368 (Семёнов-4) и несколько варьируется по глубине. При этом максимальное его количество чаще всего встречается в горизонтах с наибольшими величинами положительной аномалии Eu, что косвенно подтверждает формирование последней за счет поступления в осадки значительного количества обломков сульфидных руд, наследующих спектр распределения РЗЭ гидротермального флюида.

Доля вещества взвеси дыма черного курильщика в осадках меняется от 5 до 65% для поля Семёнов-1, от 30 до 45% для поля Семёнов-2 и от 8 до 30% для поля

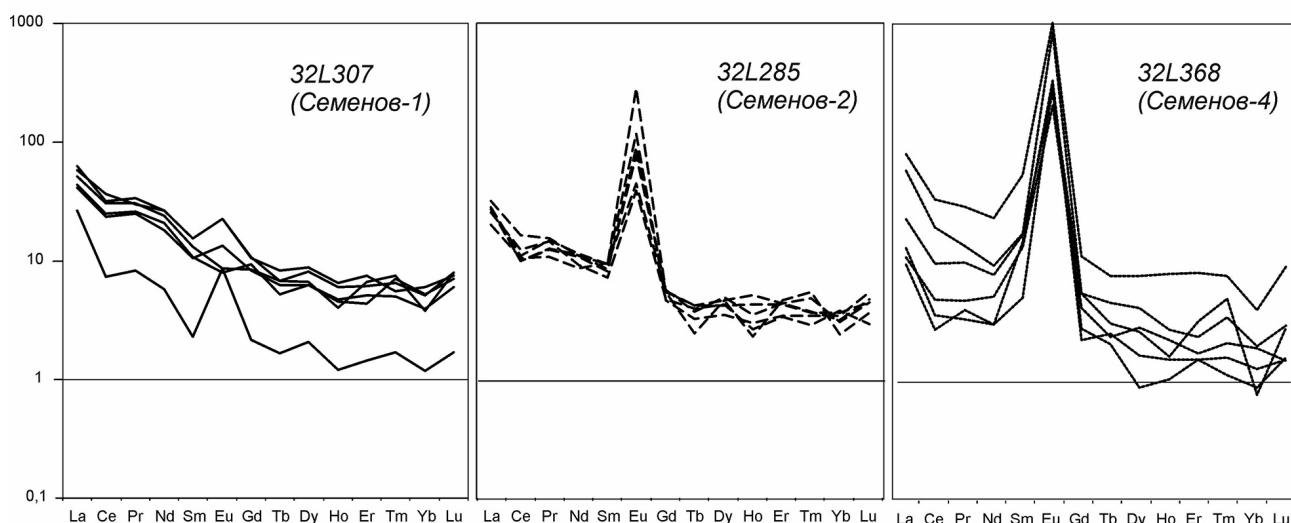


Рис. 2. Нормированные к хондриту спектры распределения редкоземельных элементов в металлоносных осадках

Семёнов-4. При этом их вариации никак не коррелируют с валовым содержанием железа, что подтверждает наше предположение об ошибочности выделения этапов усиления гидротермальной разгрузки лишь на основании увеличения в осадках концентраций основных рудных элементов.

Полученные оценки доли вещества взвеси дыма черного курильщика могут быть использованы в дальнейшем для корректной реконструкции истории гидротермальной деятельности как в пределах отдельных полей, так и для рудного узла Семёнов в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-27-00375).

Список литературы

1. Cave R. et al. Fluxes to sediments underlying the Rainbow hydrothermal plume at 36°14' N on the Mid-Atlantic Ridge // Geochim. Cosm. Acta. 2002. Vol. 66 (11). P. 1905—1923.
2. Edmonds H. N., German C. R. Particle geochemistry in the Rainbow hydrothermal plume, Mid-Atlantic Ridge // Geochim. Cosm. Acta. 2004. Vol. 68 (4). P. 759—772.
3. German C. R., Klinkhammer G. P., Edmond J. M., Mitra A., Elderfield H. Hydrothermal scavenging of rare earth elements in the ocean // Nature. 1990. Vol. 316. P. 516—518.
4. German C. R. et al. A Geochemical Study of Metalliferous Sediment From the TAG Hydrothermal Mound, 26°08'N, Mid-Atlantic Ridge // Journal of geophysical research. 1993. Vol. 98 (B6). P. 9683—9692.
5. Kuksa K. et al. Mass-wasting processes input in proximal metalliferous sediments: a case study of Pobeda hydrothermal cluster // Marine Geology. 2021. Vol. 438. 106517.
6. Kuksa K. et al. Temporal evolution of the Pobeda hydrothermal site (MAR): Utility of proximal sediment cores // Chem. Geol. 2023. Vol. 628. 121477.
7. Mills R. A., Elderfield H., Thompson J. A dual origin of the hydrothermal component in a metalliferous sediment core from the Mid-Atlantic Ridge // Journal of geophysical research. 1993. Vol. 98 (B6). P. 9671—9681.
8. Yang Y., Rusakov V. Y., Kuz'mina T. G. Rare earth elements in the ore-bearing sediments of the Krasnov and Semenov hydrothermal fields, Mid-Atlantic Ridge // Geochem. Int. 2016. Vol. 54 (3). P. 280—292.
9. Бельтенев В. Е. и др. Геолого-геофизические исследования с целью выделения участков, перспективных на ГПС, в осевой зоне САХ (в пределах 11°—12°30' с.ш.) и поисковые работы на участке 13°31' с.ш. // Фонды ФГУНПП «ПМГРЭ», 2010, г. Ломоносов.
10. Перцев А. Н. и др. Современные колчеданные залежи рудного района Семёнов (Срединно-Атлантический хребет, 13°31' с.ш.): характеристика ассоциирующих пород внутреннего океанического комплекса и их гидротермальных изменений // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54, № 5. С. 400—415.
11. Русаков В. Ю. и др. Минералого-geoхимическая зональность осадков гидротермального узла Семёнов (13°31'—13°30' с.ш. Срединно-Атлантический хребет) // Геохимия. 2013. № 8. С. 717—742.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ ГЛУБОКОВОДНЫХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СУЛЬФИДОВ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Ловчикова Т. Л.

ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия
lota-lana@mail.ru

Для понимания ресурсного потенциала и экологических последствий предстоящей в скором времени добычи сульфидов на глубоководных участках морского дна в настоящее время ведется активная разработка новых методов дистанционного зондирования. Они становятся все более важными для обнаружения и изучения месторождений глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС), так как при ограниченном числе буровых скважин могут решить задачу получения трехмерных геометрических параметров рудных тел.

Задачи, поставленные перед геофизиками, способствовали развитию разных методик проведения геофизической съемки: с установкой аппаратуры на борту судна; поверхностной буксировки за судном; глубоководной буксировки за другим глубоководным аппаратом на кабельном тросе; глубоководной придонной съемки с помощью дистанционно управляемых аппаратов (ROV, АПА, АНПА), а также с помощью обитаемых подводных аппаратов (ОПА).

Ранее применявшиеся на суше геофизические методы — магниторазведка, электроразведка пассивная и активная, сейсморазведка, гравиразведка — доказали свою эффективность при поисках и разведке ГПС.

В настоящее время при переходе к оценочному этапу геологоразведочных работ на ГПС наиболее важной задачей является определение параметров месторождений на глубину. Ни один геофизический метод индивидуально не может решить все задачи, связанные с поиском тел сульфидов и их трехмерным оконтуриванием. Для этого необходима разработка оптимального по эффективности решения геологических задач и экономической целесообразности комплекса геофизических исследований, модификации аппаратуры и методики проведения съемки для конкретной геологической обстановки.

Геофизиками GEOMAR (Германия), выполняющими геофизическую съемку на гидротермальном месторождении TAG САХ (контрактный участок IFREMER (Франция) [11], в качестве оптимального предложен комплекс исследований, включающий придонную АНПА — магниторазведку в сочетании с электроразведкой ЕП [3, 12]. BGR (Германия) в контрактном районе ГПС в Индийском океане проводит полный комплекс геофизических исследований с помощью системы GOLDEN EYE и с помощью глубоководной платформы HOMESIDE. Китайские ученые анализируют работу буксируемой глубоководной системы для проведения электромагнитных исследований в сочетании с электроразведкой методом ЕП [15], а также новую систему АНПА-ЕП для проведения работ на контрактном участке COMRA (Китай) ГПС в Индийском океане [14]. Японские ученые предлагают разные варианты АНПА исследований на ГПС, а также уделяют большое внимание проведению сейсморазведки в различных вариантах в троге Окинава [6, 8, 9]. Новый комплекс геофизических исследований разработан японскими учеными. Он включает методы активной и пассивной электроразведки: одновременные измерения сопротивления постоянному электрическому току (MCDR) и потенциала естественного электрического поля ЕП. Эффективность метода существенно усиlena за счет использования двух АНПА и одного надводного автономного аппарата ASV во время геофизической съемки. Использование АНПА и ASV повышает скорость получения данных и их качество (обследование 1 км² площади за четыре часа на скорости 2—2,5 узла на высоте 5—50 м над морским дном), решает проблему проведения ГРР в районах с контрастным рельефом морского дна.

Фирмой OFG (Канада) проведен комплекс придонных АНПА и ROV-исследований в троге Окинава (Япония) [1] и на месторождении Solwara (Папуа — Новая Гвинея) [4, 10].

Список литературы

1. Constable S., Kowalczyk P., Bloomer S. Measuring marine self-potential using an autonomous underwater vehicle // Geophysical Journal International. 2018. Vol. 215 (1). P. 49—60. DOI: 10.1093/gji/ggy263.
2. Eppelbaum L. Quantitative analysis of self-potential anomalies in archaeological sites of Israel: an overview // Environ. Earth Sci. 2020. Vol. 79. P. 1—15.
<https://doi.org/10.1007/s12665-020-09117-w>.
3. Galley C., Lelièvre P., Farquharson C. Geophysical inversion for 3D contact surface geometry // Geophysics. 2020. Vol. 85 (6). P. 1—76. DOI: 10.1190/geo2019-0614.1.
4. Galley C., Lelièvre P., Haroon A. et al. Magnetic and Gravity Surface Geometry Inverse Modeling of the TAG Active Mound // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2021. Vol. 126 (10). DOI: 10.1029/2021JB022228.
5. Gehrmann R., North L., Gruber S. Marine mineral exploration with controlled source electromagnetics at the TAG hydrothermal field, 26°N mid-Atlantic ridge // Geophysical Research Letters. 2019. Vol. 46. P. 5808—58166. DOI: 10.1029/2019GL082928.
6. Honsho C., Ura T., Kim K. Deep-sea magnetic vector anomalies over the Hakurei hydrothermal field and the Bayonnaise knoll caldera, Izu-Ogasawara arc, Japan // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2013. Vol. 118 (10). P. 5147—5164.
<https://doi.org/10.1002/jgrb.50382>.

7. *Kasaya T., Iwamoto H., Kawada Y.* et al. Marine DC resistivity and self-potential survey in the hydrothermal deposit areas using multiple AUVs and ASV // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 2020. Vol. 31. P. 579—588. DOI: 10.3319/TAO.2019.09.02.01.
8. *Kawada Y., Kasaya T.* Marine self-potential survey for exploring seafoor hydrothermal ore deposits // *Scientific Reports.* 2017. Vol. 7. P. 13552. DOI: 10.1038/s41598-017-13920-0.
9. *Kawada Y., Kasaya T.* Self-potential mapping using an autonomous underwater vehicle for the Sunrise deposit, Izu-Ogasawara arc, southern Japan // *Earth, Planets and Space.* 2018. Vol. 70 (1). P. 142.
10. *MacGregor L., Kowalczyk P., Galley C.* et al. Characterization of seafloor mineral deposits using multiphysics datasets acquired from an AUV // *First Break.* August 2021. Vol. 39 (8). P. 63—69. DOI: 10.3997/1365-2397.fb2021062.
11. *Petersen S.* Metal fluxes and Resource Potential at the Slow-spreading TAG Midocean Ridge Segment (26°N, MAR). DOI: 10.3289/GEOGRAPHICAL_RESOURCE_POTENTIAL_NORTH_SOUTHERN_TAG_MAR_2016.
12. *Szitkar F.* et al. Deep-sea electric and magnetic surveys over active and inactive basalt-hosted hydrothermal sites of the TAG segment (26°, MAR): An optimal combination for seafloor massive sulfide exploration // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 2021. Vol. 126. e2021JB022082. <https://doi.org/10.1029/2021JB022082>.
13. *Yu J., Tao C., Liao S.* et al. Resource estimation of the sulfide-rich deposits of the Yuhuang-1 hydrothermal field on the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge // *Ore Geology Reviews.* 2021. Vol. 134 (B10). P. 104169. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104169.
14. *Zhu Z., Shen J., Tao C.* et al. Autonomous-underwater-vehicle-based marine multicomponent self-potential method: observation scheme and navigational correction // *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 2021. Vol. 10. P. 35—43. DOI: 10.5194/gi-10-35-2021.
15. *Zhu Z.* et al. Self-Potential tomography of a deep-sea polymetallic sulfide deposit on Southwest Indian ridge // *Journal of Geophysical Research.* 2020. Vol. 125. e2020JB019738. <https://proxy.library.spbu.ru:2060/10.1029/2020JB019738>.

ОЦЕНОЧНАЯ И РАЗВЕДОЧНАЯ СТАДИИ ГРР НА АБИССАЛЬНЫЕ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫЕ КОНКРЕЦИИ: МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Лыгина Т. И., Миноранский Д. Е., Папсулесова С. Г., Сапрыкин С. С.

ГНЦ АО «Южморгеология», Геленджик, Россия
LyginaTI@rusgeology.ru

ГНЦ АО «Южморгеология», в соответствии с контрактом, заключенным с Международным органом по морскому дну (МОМД), с 2001 г. проводит геологоразведочные работы на площади Российского лицензионного участка — Российского разведочного района железомарганцевых конкреций (PPP-ЖМК) площадью 75 000 км², расположенного в зоне Кларион-Клиппертон Тихого океана и состоящего из двух полигонов — Западного и Восточного. За прошедшее время на площади PPP-ЖМК, в пределах Восточного полигона как наиболее перспективной его части выполнены комплексные площадные поисково-разведочные (оценочные) работы, в том числе с целью локализации ресурсов, по результатам этих работ выбраны участки для проведения более детальных ГРР следующей, разведочной стадии, и в 2017 г. на одном из этих участков начаты разведочные работы. Сопоставление геологических результатов оценочных и разведочных работ, проведенных на изученной площади в период с 2007 по 2022 г., является предметом настоящей публикации.

С 2007 по 2009 г. в западной части Восточного полигона на площади 5 800 км² были проведены поисково-разведочные (оценочные) работы с целью локализации и оценки прогнозных ресурсов железомарганцевых конкреций категории Р₁. Оценочные работы выполнялись в масштабе 1:200 000 и включали дистанционные (геакустическое и фототелевизионное профилирование) и контактные (геологическое опробование) методы. Все работы проводились с использованием высокоточной системы подводной навигации УКБС Posidonia 6000. Предварительно на площади была выполнена сплошная поверхностная батиметрическая съемка масштаба 1:200 000 многолучевым эхолотом (МЛЭ) EM12S-120.

Батиметрическая съемка проводилась по широтным профилям с межпрофильным расстоянием 12,5 км, шириной полосы съемки от 3,15 до 3,25 глубины (около 15 км) и перекрытием соседних полос обзора от 15 до 25%. Геакустические

исследования выполнялись комплексом МАК-1М с использованием ГБО с частотой сигнала 30 кГц и диапазоном съемки 1050 м на каждый борт и акустического профилографа с частотой сигнала 5 кГц и изучением осадочного разреза до 150 м. Профили были отработаны в северо-восточном направлении с межпрофильным расстоянием от 6 до 12 км. Фототелевизионная съемка осуществлялась с помощью ФТК «Нептун» по профилям северо-восточной ориентации с межпрофильным расстоянием 3 км. Рядовое геологическое опробование выполнялось коробчатым пробоотборником, оснащенным донной фотоустановкой. На той части площади, на которой впоследствии были развернуты разведочные работы, была сформирована неравномерная сеть опробования с расстоянием между станциями от 5 до 9 км и плотностью сети в пределах рудного контура 1 ст. на 40 км² (рис. 1А). По результатам оценочных работ была оконтурена крупная рудная залежь плащеобразного типа, и в ее пределах был выбран первый пятилетний блок добывающего района, на одном из участков которого и проводится в настоящее время разведка.

Кроме того, ранее (2006) в этом же районе на участке площадью 360 км² были проведены опытно-методические работы (OMP), направленные на разработку методики ГРР разведочной стадии на рудных залежах плащеобразного типа. ОMP представляли собой детальные комплексные геолого-геофизические исследования масштаба 1:50 000 и включали геоакустическое и фототелевизионное профилирование с межпрофильным расстоянием 1 км и рядовое опробование по сети 1,5×1,5 км. OMP выполнялись с применением тех же комплексов, которые были использованы позже при оценочных работах 2007—2009 гг. По итогам OMP, на основе обработки материалов фотопрофилирования и рядового опробования с применением геостатистического анализа, были установлены параметры геологической модели плащеобразной залежи и обоснована оптимальная система геологических наблюдений применительно к плащеобразному типу рудных скоплений. Разработанные по итогам OMP рекомендации были применены позже при планировании и проведении ГРР разведочной стадии в пределах первого пятилетнего добывающего блока.

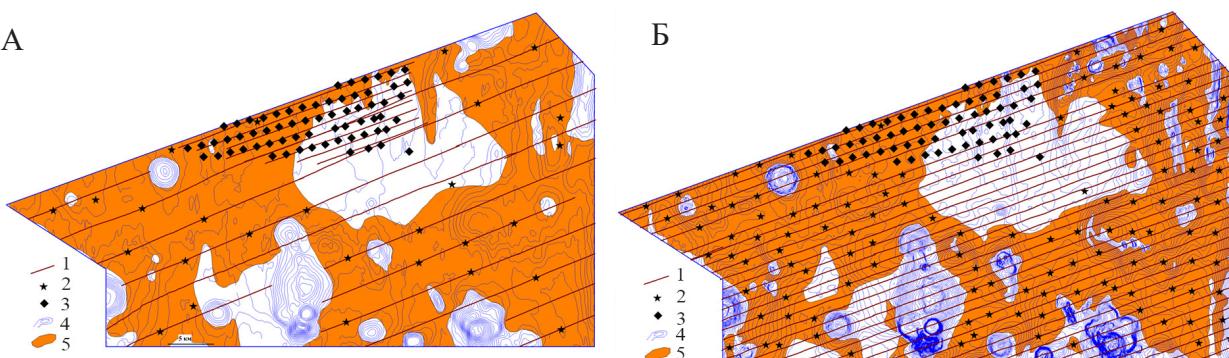


Рис. 1. Система ГРР на изученном участке плащеобразной залежи: А — поисково-разведочная (оценочная) стадия; Б — разведочная стадия; 1 — линии фотопрофилей; 2, 3 — станции рядового опробования, в том числе 3 — в рамках ОМР 2006 г.; 4 — изобаты сечением 25 м (А) и 10 м (Б); 5 — рудный контур

Работы разведочной стадии 2017—2022 гг. выполнены на площади, изученной оценочными работами, на трех смежных участках общей площадью 1610 км² (рис. 1Б). На всех трех полигонах использован единый технико-технологический комплекс, отличающийся от комплекса, примененного на оценочной стадии, плотностью сетей и использованием придонного МЛЭ, и включающий следующие виды и методы работ:

- батиметрическую съемку совместно с геоакустическим профилированием с использованием комплекса «МАК-Рельеф» производства АО «Южморгеология», в состав которого входят придонный МЛЭ SeaBat 7125-ROV2 с шириной полосы съемки 600 м, гидролокатор бокового обзора низкой частоты (ГБО НЧ) в режиме средней дальности (34 кГц) с диапазоном обзора ГБО 750 м на каждый борт и акустический профилограф (4 кГц), по системе профилей северо-восточного направления с межпрофильным расстоянием 500 м;
- фототелепрофилирование с использованием цифрового ФТК «Нептун-Ц-О», по системе профилей северо-восточного направления с межгалсовым расстоянием 1000 м, межкадровым расстоянием 20—25 м и площадью сфотографированного участка дна не менее 2,5 м;

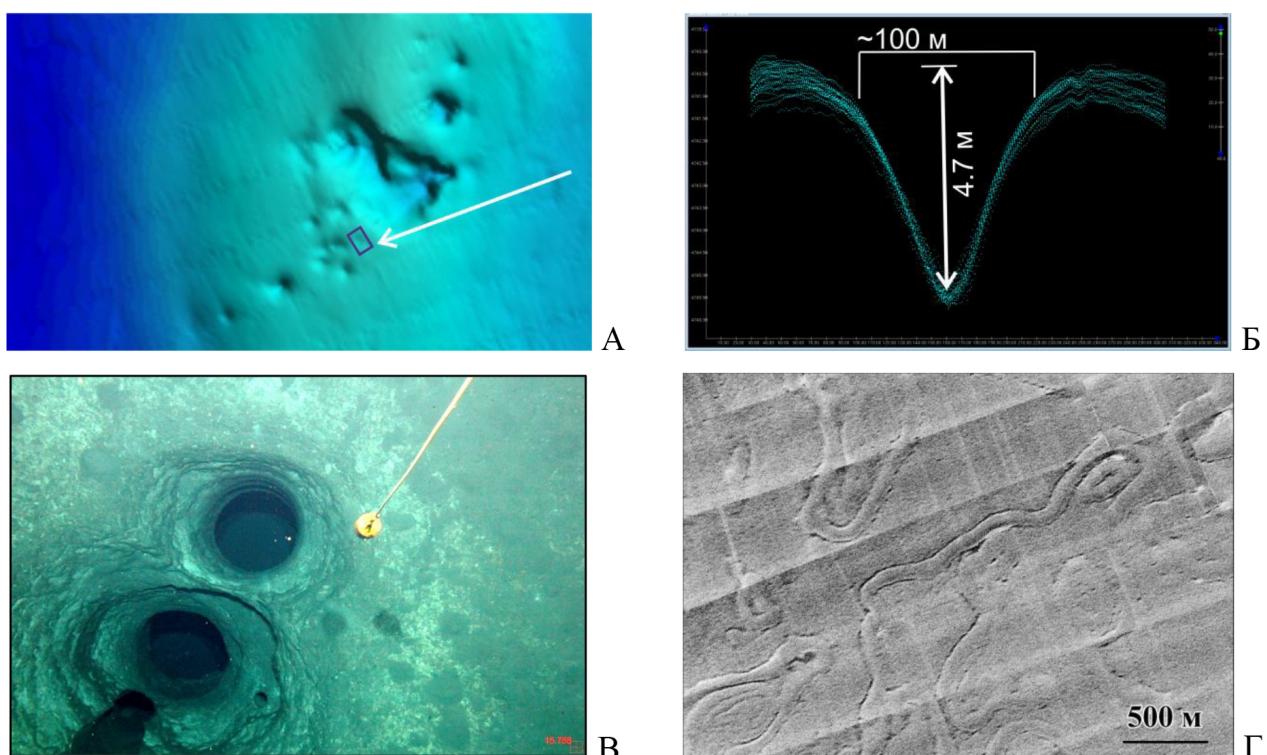


Рис. 2. Специфические донные препятствия, выявленные на площади рудной залежи (по данным: А, Б — придонного МЛЭ; В — фотопрофилирования; Г — ГБО): А — фрагмент батиметрической поверхности с серией воронкообразных структур (стрелкой указано местоположение структуры, показанной на рис. 2Б); Б — разрез мелкой воронкообразной структуры на примере данных МЛЭ, представленных в виде точек зондирований в окне выборки; В — трубчатые каналы в слоистых карбонатных породах (донный фотоснимок, диаметр груза-разведчика 10 см); Г — участок развития поверхностных эрозионных структур на материалах ГБО (монтаж сонограмм)

- рядовое опробование рудных залежей ЖМК коробчатым пробоотборником, оснащенным фотоустановкой, с доведением разведочной сети до ячейки 3×3 км.

Основные результаты разведочных работ, в сравнении с оценочными работами, проведенными на этом же участке, сводятся к следующему:

- получена кондиционная батиметрическая основа масштаба 1:50 000, при этом закартированы элементы рельефа дна с уклонами, превышающими 6° при относительном перепаде глубин в первые десятки сантиметров;
- получены монтажи сонограмм с 50%-ным перекрытием, полностью закрывающие картируемую площадь записью с каждого борта ГБО;
- в рудном контуре достигнута плотность рядового опробования 1 ст. на 9 км².

Рельеф дна месторождения изучен с детальностью, достаточной для проектирования добывчного комплекса и планирования добывчных работ; уточнены контуры, условия залегания, особенности внутреннего строения, характеристики изменчивости геолого-промышленных параметров рудной залежи; детально изучены горно-геологические (ГГУ) и инженерно-геологические условия (ИГУ) эксплуатации месторождения ЖМК на площади изученного участка; выделены эксплуатабельные участки (блоки) на оконтуренной залежи конкреций; выполнен подсчет запасов руды (ЖМК) и основных металлов (Mn, Ni, Cu, Co) по категориям С₁ и С₂ и, в соответствии с требованиями МОМД, по категориям, предусмотренным шаблоном CRIRSCO: «измеренные» ресурсы (Measured mineral resources) и «выявленные» ресурсы (Indicated mineral resources).

В итоге по результатам разведочных работ и по сравнению с результатами оценочных работ рудная площадь на участке уменьшилась на 10%, средняя весовая концентрация руды (плотность залегания) увеличилась на 7%, ресурсы Р₁ переведены в запасы С₁+С₂. Полученные результаты характеризуются высокой степенью обоснованности и достоверности.

К особо важным результатам разведочной стадии относится получение детальной характеристики ГГУ месторождения. Выявлены и закартированы специфические донные препятствия, представленные эрозионными структурами гидротермального генезиса в карбонатных породах (непрерывный ряд разномасштабных воронкообразных врезов и трубчатых каналов размером от первых сантиметров до первых километров в поперечнике и глубиной до 100 м) (рис. 2А—В) и сложной системой субпараллельных бороздообразных неровностей дна глубиной от нескольких дециметров до первых метров, представляющих собой выходы подповерхностных слоев глинистой части разреза, обнаженных площадной эрозией (рис. 2Г).

ГИДРОГЕОХИМИЯ МЕТАНА И РУДООБРАЗУЮЩИХ МЕТАЛЛОВ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ОРЕОЛАХ РАССЕЯНИЯ (НА ПРИМЕРЕ РУДНЫХ ПОЛЕЙ РОССИЙСКОГО РАЗВЕДОЧНОГО РАЙОНА СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА)

Петров В. А.^{1, 2}, Судариков С. М.^{1, 2}

¹ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
vladimir@spmi-petrov.ru

Высокотемпературные субмаринные гидротермальные источники, также известные как «черные курильщики», разгружаются на дне океана и маркируют область формирования глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) в пределах срединно-океанических хребтов (СОХ). ГПС представляют собой комплексные руды с высокими концентрациями целого ряда металлов, в том числе медь, цинк, золото, серебро, кобальт и др. Для поиска этих руд используют несколько методов, и одним из них является обнаружение и изучение ореолов рассеяния (плюмы, или «дымы курильщиков»), распространяющихся в водной толще.

Система СОХ считается одной из наиболее изученных структур Мирового океана, но даже за десятилетия исследований изучены лишь первые проценты от ее площади. Большое количество гидротермальных полей остается неоткрытым и неисследованным. По этой причине необходимо совершенствовать имеющиеся и разрабатывать новые методы прогнозирования и поиска гидротермальных источников.

Для решения поставленной проблемы были изучены и интерпретированы:

- результаты зондирования датчиком метана вблизи полей, приуроченных:
 - 1) к ультрабазитовым блокам бортов долины Срединно-Атлантического хребта (САХ) — Логачёв-1, Коралловое и Молодежное; 2) к базальтовому вулканическому поднятию в пределах днища долины — Пью-де-Фоль;
- результаты химического анализа проб воды на взвешенные и растворенные металлы в пределах гидротермального узла Ашадзе.

Сравнительный анализ полученных результатов зондирования и опубликованных данных показал различия в высоте формирования и дальности распространения

ореолов метана. Предыдущие исследования в районе гидротермального узла Логачёв показали, что метан формирует хорошо выраженный в плане ореол, распространяющийся на 4—10 км от источника на высоте 200—500 м от дна при концентрациях >10 нмоль/л [8]. Аналогичные ореолы были также выделены в районе Восточно-Тихookeанского поднятия [4], где из-за высокой магматической активности формировались так называемые мегаплюмы, отличающиеся большой дальностью и площадью распространения [11]. Тем не менее, согласно полученным при зондировании результатам вблизи источников, связанных с блоками ультраосновных пород, метан формирует аномалии вблизи океанического дна, концентрации в которых быстро снижаются до ~3—5 нмоль/л уже в ~200 м от источника. Вероятно, дальность и высота распространения ореолов определяются концентрациями метана в конечном гидротермальном растворе (КГР) и гидродинамическими характеристиками разгружающегося источника. Формирование аномалии метана, отмеченной в работе [8], вероятно, было вызвано редкой для данного сегмента САХ активизацией магматической деятельности, на возможность которой указывают наличие вулканических построек и максимальная тектоническая активность всего в 2,5 км от гидротермального узла Логачёв [7].

В пределах вулканического поднятия Пью-де-Фоль только на двух станциях зондирования было отмечено небольшое повышение концентраций метана. Вблизи этих станций по результатам телепрофилирования были отмечены «дымы курильщиков» и живая гидротермальная фауна, что указывает на их непосредственную близость к гидротермальным источникам. Низкие концентрации метана в КГР систем, приуроченных к базальтам [3], обусловливают его низкие содержания в ореоле рассеяния, малую дальность распространения и непригодность как поискового признака гидротермальных источников, связанных с базальтами.

Исходя из новых данных о расположении источника в пределах гидротермального поля Ашадзе-2 [6], были переинтерпретированы результаты анализа водной толщи вокруг источника. Согласно опубликованным данным, большая часть растворенных металлов выходит из раствора в зоне смешения гидротермального флюида с морской водой (первые метры), что приводит к падению концентраций на 4—7 порядков [5]. Несмотря на это, вблизи источника (~200—400 м) обнаружены аномалии растворенных металлов, в то время как аномалии взвешенных металлов сосредоточены на удалении (~500—700 м).

Изучение распределения рудообразующих металлов (Cu, Zn, Fe, Mn) в плане и в разрезе показало, что ореол рассеяния не отвечает существующей модели его формирования, которую упрощенно можно представить в виде следующих этапов: 1) подъем гидротермального раствора от источника (преимущественно вертикальное движение — восходящий плюм); 2) выравнивание плотностей раствора и

окружающих вод (замедление распространения — плюм нейтральной плавучести); 3) формирование и распространение плюма в определенном направлении под действием придонного течения. В действительности образуется вихревая структура гидротермального ореола, приводящая к обнаружению аномалий металлов вокруг гидротермального источника на разных горизонтах рассеяния. Формирование подобной структуры объясняется нами как результат воздействия нескольких факторов: 1) пространственно-временная изменчивость придонных течений [9]; 2) подповерхностная фазовая дифференциация гидротермального раствора [2]; 3) нестабильность гидротермального плюма [11].

Формирование вихревой структуры гидротермального плюма осложняет поиск гидротермального источника. Для прогнозирования вероятной площади гидротермальной разгрузки предложен адаптированный метод мультилатерации, применяемый для определения координат источника сигнала исходя из известных координат точек (приемников сигнала) вокруг источника и расстояний от них до источника [1]. Как «сигнал» принято соотношение $[p\text{Me}]/[v\text{Me}]$, где Me — рудообразующие металлы (Cu, Zn, Fe, Mn). Источником сигнала выступает гидротермальный источник, а приемниками «сигнала» — точки опробования. Расстояния между источником и приемниками определено эмпирическим путем и варьируется в зависимости от силы «сигнала» от 400 до 500 м (максимальное расстояние от источника, на который распространяется сигнал различной силы). Сила сигнала определяется величиной превышения соотношения $[p\text{Me}]/[v\text{Me}]$ фоновых значений. Вокруг аномальных точек строятся окружности с радиусами, равными выбранным расстояниям, которые пересекаются и формируют линзу. Область пересечения наибольшего количества кругов указывает на вероятное расположение активного гидротермального источника. Сравнение прогнозных площадей с реальным положением источника в пределах гидротермального поля Ашадзе-2 показало высокую точность прогнозирования. Проверка методики на объектах-аналогах (гидротермальных полях Ашадзе-2 и -3) также показало совпадение прогнозируемой площади с реальной ситуацией. Для повышения точности рекомендуется использовать построения по нескольким элементам (Cu, Zn, Fe, Mn) и выбирать точки с наибольшей силой сигнала (выше фоновых значений на три стандартных отклонения и больше).

Список литературы

1. Монаков А. А. Алгоритм оценки местоположения объекта в активных системах мультилатерации // Радиолокация, навигация, связь. 2018. С. 134—142.
2. Bischoff J. L., Rosenbauer R. J. Phase separation in seafloor geothermal systems: an experimental study of the effects on metal transport // American Journal of Science. 1987. Vol. 287. P. 953—978. <https://doi.org/10.2475/ajs.287.10.953>.
3. Charlou J. L., Donval J. P., Fouquet Y., Jean-Baptiste P., Holm N. Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14'N, 118

- MAR) // Chemical geology. 2002. Vol. 191 (4). P. 345—359.
[https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00134-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00134-1).
4. Cowen J. P., Wen X., Popp B. N. Methane in aging hydrothermal plumes // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002. Vol. 66 (20). P. 3563—3571.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)00975-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)00975-4).
5. Fang Z., Wang W. X. Size speciation of dissolved trace metals in hydrothermal plumes on the Southwest Indian Ridge // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 771. P. 145367.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145367>.
6. Fouquet Y., Cherkashov G., Charlou J. L., Ondréas H., Birot D., Cannat M., Bortnikov N., Silantyev S. et al. Serpentine Cruise — ultramafic hosted hydrothermal deposits on the Mid-Atlantic Ridge: First submersible studies on Ashadze 1 and 2, Logatchev 2 and Krasnov vent fields // InterRidge News. 2008. Vol. 17. P. 15—20.
7. Grevemeyer I., Reston T. J., Moeller S. Microseismicity of the Mid-Atlantic Ridge at 7°S—8°15'S and at the Logatchev Massif oceanic core complex at 14°40'N—14°50'N // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013. Vol. 14 (9). P. 3532—3554.
<https://doi.org/10.1002/ggge.20197>.
8. Keir R. S., Schmale O., Seifert R., Süttenfuß J. Isotope fractionation and mixing in methane plumes from the Logatchev hydrothermal field // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2009. Vol. 10 (5). Q05005. <https://doi.org/10.1029/2009GC002403>.
9. Lahaye N., Gula J., Thurnherr A. M., Reverdin G., Bouruet-Aubertot P., Rouillet G. Deep currents in the rift valley of the north mid-Atlantic ridge // Frontiers in Marine Science. 2019. Vol. 6. P. 597. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00597>.
10. Speer K. G., Helfrich K. R. Hydrothermal plumes: a review of flow and fluxes // Geological Society, London, Special Publications. 1995. Vol. 87 (1). P. 373—385.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.087.01.29>.
11. Von Damm K. L., Oosting S. E., Kozlowski R., Buttermore L. G., Colodner D. C., Edmonds H. N. et al. Evolution of East Pacific Rise hydrothermal vent fluids following a volcanic eruption // Nature. 1995. Vol. 375 (6526). P. 47—50. <https://doi.org/10.1038/375047a0>.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ МОРСКОГО ДНА И ГЛУБОКОВОДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Половков В. В.^{1, 2}, Пен Е. А.³, Корхов В. В.^{1, 3},
Белошапко А. Г.^{1, 3}, Карельский К. В.^{1, 3}, Черкашёв Г. А.^{1, 2}, Бич А. С.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

³ ООО «Биогеохаб», Санкт-Петербург, Россия

v.v.polovkov@gmail.com

В связи с истощением минерально-сырьевой базы континентов, снижением качества добываемых руд, а также повышением требований к экологической безопасности наземных добычных проектов в XXI в. все большее значение приобретает освоение глубоководных твердых полезных ископаемых Мирового океана. Существует три основных типа глубоководных полезных ископаемых: железомарганцевые конкреции (ЖМК), кобальт-марганцевые корки (КМК) и глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС). Для определения границ распространения этих полезных ископаемых, оценки вещественных характеристик, изучения их инженерно-геологических и других свойств выполняется комплекс специализированных геологоразведочных работ, неотъемлемой частью которых является фотовидеопрофилирование.

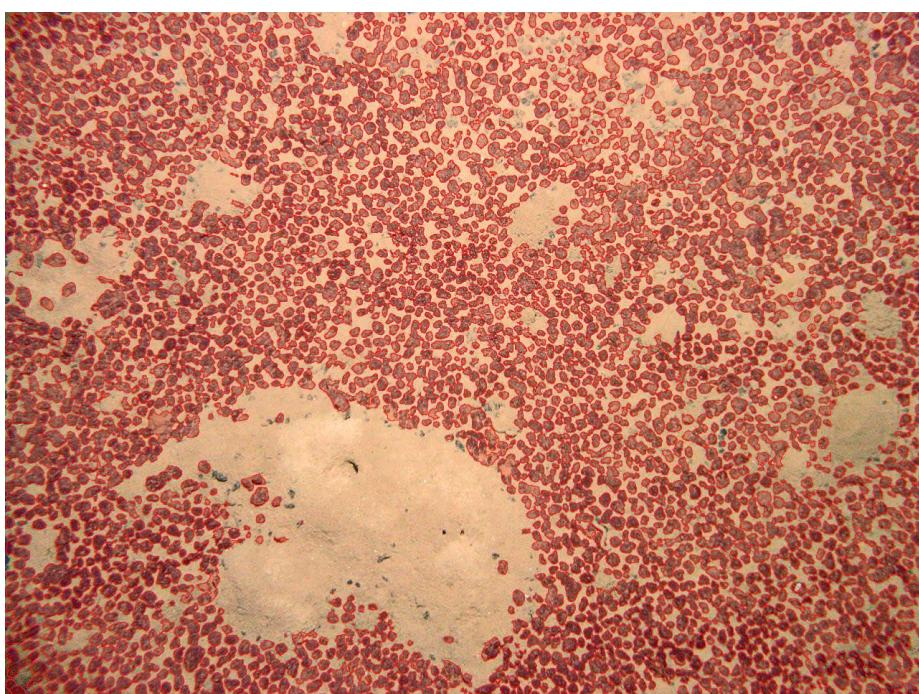
Фотовидеопрофилирование проводится по заранее намеченным профилям по равномерной сети; в процессе выполнения полевых работ накапливается большой объем информации (тысячи фотографий и десятки часов видеопотока). При этом отмечается существенное отставание в развитии технологий фотовидеофиксации от методики обработки этих материалов. В большинстве случаев анализ изображений происходит эмпирически, путем ручной обработки журналов фотовидеопрофилирования, повторения ранее отсмотренных фрагментов видео, что требует колоссальных временных затрат исполнителей работ. При этом длительный монотонный труд оператора приводит к частичной потере ценной информации, снижению эффективности работ, а также нерациональному использованию трудовых ресурсов.

Широкое развитие технологий, основанных на применении нейронных сетей с целью распознавания различных изображений и видеофайлов в других сферах

человеческой деятельности, и учет обозначенных выше проблем определяют актуальность и перспективность разработки специализированного программного обеспечения для автоматического анализа результатов фотовидеопрофилирования морского дна. В настоящее время коллективом авторов создан прототип программного обеспечения (ПО), позволяющий выделять ЖМК на изображениях. На следующем этапе предполагается разработка ПО для картирования всего спектра образований в пределах рудных полей, включая породы разного состава и морфологии, осадки, КМК и ГПС.

Фотографии с ЖМК обработаны с помощью нейронной сети. В качестве модели нейронной сети использована сеть U-Net [1], так как она обладает сравнительно простой структурой и высокими показателями в решении похожих задач. Для изображения произвольного размера нейронная сеть U-Net вычисляет бинарную маску. Мaska отмечает все пиксели исходного изображения, которые относятся к фрагментам ЖМК.

Обучение нейронной сети U-Net было выполнено с помощью небольшого набора данных, полученных из сети Интернет. Изначальная разметка данных на обучающей выборке выполнялась специалистами-геологами вручную. Для стабилизации обучения сети применялись различные техники преобразования данных: цветовые (смещение тона, яркости и насыщенности) и геометрические (повороты изображения, конформные отображения). Таким образом, объем данных для обучения составляет тысячи примеров. На рисунке показан результат работы прототипа программы — в автоматическом режиме на тестовой выборке (изображении, которое не было знакомо нейронной сети) программой автоматически выделены ЖМК с высокой степенью точности.



Фотография морского дна, обработанная сетью U-Net (тестовая выборка). Дно представляет собой осадки с железомарганцевыми конкрециями на поверхности. Красным отображены контуры масок, вычисленные нейронной сетью. Наблюдается выделение практически всех визуально различных конкреций

Результат работы прототипа программы показывает высокий потенциал и эффективность данного подхода для решения задач картирования морского дна и глубоководных полезных ископаемых. Такой подход позволит на порядки снизить затраты времени, требуемые в настоящее время для обработки результатов фотовидеопрофилирования, повысит качество и надежность обработки данных, а также позволит высококвалифицированным специалистам-геологам сосредоточиться на решении других важных задач. Следует отметить, что с точки зрения машинного обучения для успешной работы программы необходимо решить проблемы классификации и сегментации [2], а также учитывать особенности подводной съемки, требующей последующей обработки — подавления помех и т. п.

Список литературы

1. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Lecture notes in Computer Science, 2015. Col. 9351. P. 234—241.
2. Iakushkin O. O., Pavlova E. D., Lavrova A. K., Polovkov V. V., Frikh-Khar A. U., Pen E. A., Sedova O. S. (2022, July). Underwater biotope mapping: automatic processing of underwater video data. In The 6th International Workshop on Deep Learning in Computational Physics (p. 24).

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОПОДЪЕМА В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОВОДНОЙ ДОБЫЧИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МИРОВОГО ОКЕАНА

Сержан С. Л.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
Sergei.serzhan@inbox.ru

Разработка глубоководных месторождений твердых полезных ископаемых (ТПИ), таких как ЖМК, КМК и ГПС, включает следующие основные технологические процессы: добыча (подготовка к выемке, разрушение, сбор); подъем; транспортирование; обогащение; укладка хвостов и получение концентратов с отгрузкой потребителю. Одним из наиболее трудоемких является процесс подъема ТПИ на водную поверхность, что в условиях современных тенденций и требований в горном деле вызывает необходимость использовать поточные технологии, а также машины и механизмы непрерывного действия. Для непрерывного, высокопроизводительного и надежного подъема ТПИ с больших глубин (более 3000 м) возможно применение технологии гидроподъема, при которой добытые ТПИ транспортируются на водную поверхность по вертикальному трубопроводу в виде гидросмеси. Движение гидросмеси может осуществляться за счет работы грунтовых насосов, в зависимости от требуемых напорно-расходных характеристик возможна параллельная и/или последовательная установка насосов. Также существуют теоретические разработки комплексов, в состав которых входит промежуточная капсула с атмосферным давлением, где движение гидросмеси происходит за счет разницы напоров внутри капсулы и снаружи [1], причем перемещение гидросмеси в капсулу осуществляется без энергетических затрат. Капсула может оборудоваться пульпоперекачным оборудованием [1], что позволяет организовать двухстадийный гидроподъем, где затраты энергии будут присутствовать только на втором этапе подъема; капсула может не иметь насосного оборудования, тогда подъем гидросмеси осуществляется судовыми лебедками, причем технология становится циклически-поточной [2, 3].

Эффективность применения гидротранспортных систем в условиях глубоководной добычи ТПИ может быть оценена надежностью и энергетической эффективностью.

Насосное оборудование и система вертикальных трубопроводов работают в сложных условиях и подвержены сильному гидроабразивному износу, что будет требовать частых остановок для технического обслуживания.

Энергетическая эффективность гидротранспортной системы может быть оценена энергоемкостью процесса гидроподъема [3]:

$$e = \frac{N}{GL} = \frac{\rho_{cm} g I_{cm}}{3,6 \rho_{tb} c_0}, \quad (1)$$

где e — энергоемкость процесса гидроподъема, кВт·ч/(т·км); N — мощность насосов, кВт; L — длина трубопровода (глубина залегания ТПИ), км; G — производительность системы по твердому материалу, т/ч; ρ_{tb} — плотность твердых частиц, т/м³; ρ_{cm} — плотность гидросмеси, т/м³; g — ускорение силы тяжести, м/с²; I_{cm} — удельные потери напора, м вод. ст./м; c_0 — объемная концентрация твердых частиц.

Энергоемкость процесса транспортирования в основном зависит от удельных потерь напора I_{cm} при гидроподъеме гидросмеси по вертикальному трубопроводу и от величины концентрации c_0 твердой фазы в транспортируемом потоке гидросмеси [4]. Удельные потери напора при гидроподъеме будут складываться из потерь напора на течение чистой воды I_0 , дополнительных потерь напора на преодоление сопротивлений, вызванных перемещением твердых частиц, взвешивания столба гидросмеси ΣI и местных потерь напора и могут быть определены по формуле [5, 6]:

$$I_{cm} = I_0 \cdot (k + \sum I) = \left\{ \lambda \frac{\nu_{cm}^2}{2gD} \left[k + 145 \cdot c_0 \frac{gD}{\nu_{cm}^2} \cdot \frac{w}{\sqrt{gD}} \right] \right\}, \quad (2)$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления (который в общем виде является функцией числа Рейнольдса (Re) и относительной шероховатости (ε), то есть $\lambda=f(Re, \varepsilon)$, однако для развитого турбулентного режима движения гидросмеси, характерного для трубопроводного транспорта, коэффициент гидравлических сопротивлений можно определить по известной формуле Шифринсона $\lambda=0,11(\varepsilon)^{0,25}$; D — диаметр трубопровода, м; ν_{cm} — скорость потока, м/с; w — скорость свободного падения твердых частиц в воде (гидравлическая крупность), м/с; k — коэффициент, учитывающий местные потери напора и несложную геометрию вертикального трубопровода.

Анализируя формулы (1) и (2), можно прийти к выводу, что энергоемкость процесса гидроподъема может быть снижена за счет:

- увеличения концентрации гидросмеси до оптимальных значений [4];
- снижения удельных потерь напора за счет использования материалов внутренней стенки трубопровода с низким значением шероховатости, приводящим к снижению коэффициента λ [6].

Для оценки эффективности гидротранспортной системы определим энергоемкость процесса гидроподъема для следующих горно-геологических условий и параметров ЖМК: крупность конкреций $d=0,1$ м; коэффициент динамической вязкости морской

воды $\mu=1,673$ МПа; плотность морской воды $\rho_0=1025$ кг/м³; плотность ЖМК $\rho_{\text{TB}}=3200$ кг/м³; глубина акватории в зоне добычи $H_t=5000$ м; производительность придонного добывающего комплекса $G=340$ т/ч; материал трубопровода — сталь Ст3сп (значение эквивалентной шероховатости $\Delta_s=0,2$ мм). Рассчитанные значения параметров гидроподъема представлены в таблице.

Параметры гидроподъема

Параметр	Базовый вариант	Модернизированный вариант
Объемная концентрация c_0	0,1	0,3
Эквивалентная шероховатость Δ_s , мм	0,2	0,01
Диаметр трубопровода D , м	0,5	0,32
Расход гидросмеси $Q_{\text{см}}$, м ³ /ч	1060	350
Плотность гидросмеси $\rho_{\text{см}}$, кг/м ³	1240	1680
Потребный напор H , м	350	670
Мощность потока, кВт	1270	1080
Энергоемкость, кВт·ч/т	3,75	3,2

Как уже было сказано выше, большое влияние на энергоемкость процесса гидроподъема оказывают шероховатость внутренней поверхности трубопровода и значение объемной концентрации. Исследования в области повышения эффективности гидротранспорта хвостовых пульп показывают, что снижение энергоемкости и повышение энергетической эффективности гидротранспорта возможно за счет применения полимерных материалов как новых конструкционных материалов. По опыту гидротранспорта хвостовых пульп существует технология, при которой на внутреннюю поверхность стального трубопровода наносится полиуретановое покрытие, абсолютная шероховатость которого ниже, чем у стали [6]. Также из опыта гидротранспорта хвостовых пульп известно, что оптимальным значением концентрации является $C_{0,\text{опт}}=0,3$ [4].

По результатам лабораторных и полупромышленных исследований, проводимым Санкт-Петербургским горным университетом, относительная шероховатость полиуретановых покрытий различных производителей (твердость по Шору находится в диапазоне 83А—93А) варьируется в пределах 0,5—1,4, а среднее значение — 1,07, в то же время значение этого параметра для стальных труб достигает 4,2 [6]. Расчет параметров гидроподъема по новым рекомендациям также представлен в таблице.

По результатам, представленным в таблице, видно, что рекомендации, полученные на основе исследований гидротранспорта хвостовых пульп, а именно повышение объемной концентрации до 30% и использование полимерных материалов с низким значением шероховатости, позволяют снизить энергоемкость процесса гидроподъема на 17%.

Стоит также отметить, что полиуретановые покрытия имеют значительно более стойкое сопротивление к гидроабразивному износу, такие исследования также проводились в Горном университете [7].

Важнейшей проблемой остается вопрос пульпоприготовления, то есть создания гидросмеси заданных параметров, в первую очередь концентрации и плотности, а также крупности твердого. Для обеспечения таких параметров на дне должно осуществляться первичное обогащение, в противном случае все преимущества гидроподъема могут быть нивелированы.

На основании проведенных исследований можно сделать рекомендации по конструктивным особенностям вертикального трубопровода:

- применение в качестве внутренней поверхности полиуретановых покрытий, имеющих низкое значение шероховатости и высокую стойкость к гидроабразивному износу;
- вертикальный трубопровод должен иметь внешний несущий слой, который будет сопротивляться давлению окружающей воды;
- трубопровод должен иметь положительную плавучесть, для чего возможно использование легких материалов с плотностью ниже, чем у воды, либо иметь воздушные карманы.

Список литературы

1. Сержан С. Л., Медведков В. И. Влияние глубины погружения капсулы с пульпоперекачным оборудованием на эффективность добычи полезного ископаемого морским добычным комплексом // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 3. С. 34—42.
2. Сержан С. Л., Лавренко С. А., Малеванный Д. В., Дадаян Л. М. Промежуточная капсула для подъема твердых полезных ископаемых со дна Мирового океана. Патент на изобретение, № 2779867, 14.09.2022, бул. № 26.
3. Сержан С. Л., Малеванный Д. В. Технология глубоководной добычи твердых полезных ископаемых с применением промежуточной капсулы // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 2 (166). С. 49—56. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-49-56.
4. Александров В. И., Собота И. Удельная энергоемкость гидравлического транспортирования продуктов переработки минерального сырья // Записки Горного института. 2015. Т. 213. С. 9—17.
5. Александров В. И., Собота Е. Моделирование и расчет системы гидравлического подъема горной массы при подводной разработке минерального сырья // Записки Горного института. 2003. Т. 157. С. 140—143.
6. Александров В. И., Кибиров В. И., Сержан С. Л. Эффективность применения полиуретановых покрытий внутренней поверхности пульповодов в системах гидротранспорта хвостовой пульпы // Обогащение руд. 2020. № 4. С. 35—41.
7. Скребнев В. И., Сержан С. Л., Калугина Е. В. Исследование стойкости к гидроабразивному износу полимерных и стальных труб. Оценка основных параметров, влияющих на интенсивность износа гидротранспортных систем // Пластические массы. 2020. № 9—10. С. 40—44. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-9-10-40-44>.

ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ВУЛКАНИЧЕСКОГО И ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ПРОЦЕССА В ОСАДОЧНОМ ЧЕХЛЕ ХРЕБТА МОНА (НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКИЙ БАССЕЙН)

Стародымова Д. П., Кравчишина М. Д., Новичкова Е. А.,
Чеховская М. П., Сломнюк С. В., Мицисова И. А., Якимова К. В.

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия
d.smokie@gmail.com

Исследования гидротермальных систем низкоспредингового хребта Мона (заполярного участка Срединно-Атлантического хребта (САХ)) ведутся начиная с момента их открытия в 2005 г. [7]. В зоне сочленения хребтов Мона и Книповича, в пределах осевого вулканического поднятия на 73°30' с.ш. и 8° в.д., расположено активное гидротермальное поле Замок Локи (Loki's Castle) с 13-метровыми черными курильщиками, исследования которого начались в 2008 г. Осевое вулканическое поднятие состоит из обломков ранее разрушенных гидротермальных структур [7]. Основным источником терригенного осадочного вещества в этом районе являются осадки конуса выноса Медвежинского желоба [2], дополнительное вещество может поставлять ледовый разнос, естественная гемипелагическая седиментация, эпизодически продукты подводных извержений вулканов и гидротермальной деятельности. По-прежнему остается неясным влияние гляциальных циклов на вулканическую и гидротермальную активность.

Колонка донных осадков АМК5536 была отобрана с глубины 2196 м в ходе 68-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2017 г. Отбор осадков проводился с помощью гравитационной трубы большого диаметра. Место пробоотбора располагается в рифтовой долине в области сочленения хребтов Мона и Книповича, одно из немногих мест срединно-океанического рифта, где накапливаются значительные объемы осадочных отложений [4]. Колонкой вскрыта 4-метровая толща осадков вблизи гидротермального поля Замок Локи, флюиды которого фильтруют материнские породы — основные базальты САХ (D-MORB) и отложения конуса выноса Медвежинского желоба. Колонка была разделена на две части продольным разрезом, макроописание проведено на борту НИС по свежему срезу, одна половина колонки (архивная) была упакована и хранилась в холодильнике. Другая половина

была разделена на слои с дискретностью 1 см, осадки были упакованы в отдельные пакеты и до анализа хранились в холодильной камере при температуре 3—4 °С.

Архивная часть колонки исследована с помощью системы комплексного сканирования кернов Geotek MSCL-XYZ. С помощью сканера кернов были получены данные с дискретностью 1 см о распределении магнитной восприимчивости (MS), цвета и рентгенофлуоресцентного спектра. Элементный анализ слоев донных осадков был выполнен методом ИСП-МС с дискретностью 10 см по всей длине керна и с дискретностью 1 см в интервале 370—420 см. Для построения возрастной модели проведены измерения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ (‰ PDB) в раковинах планктонных фораминифер (вид *N. pachyderma* (s)). Временные шкалы для колонок донных осадков построены на основе корреляции полученной изотопно-кислородной кривой со стандартной кривой LR04 [5] и PS1243 [1] путем линейного интерполирования между опорными точками.

Верхняя часть колонки представлена алевритовыми и пелитовыми илами оливкового и оливково-коричневого цвета с включениями комков более плотного темно-серого алевритового ила. В осадках на отдельных горизонтах встречаются зерна песка и гравия, пятна ожелезнения. Начиная с горизонта 345 см цвет осадка меняется сначала на желтовато-коричневый (в интервале 345—351 см), затем (до горизонта 414 см) на темно-оливковый до темно-серого. Особенностью колонки является присутствие прослоев базальтовых стекол в интервалах 370—378 и 381—383 см. Характер залегания линз базальтовых стекол и их высокое содержание позволяют предположить, что эти прослои являются результатом извержения подводного вулкана. Начиная с горизонта 414 см осадок представлен пелитовым илом зеленовато-серого цвета с редкими включениями раковинного детрита.

Вертикальное распределение интенсивности сигналов химических элементов позволяет выделять стратиграфические интервалы. Распределение Ca и Al характеризует противоположные тренды накопления карбонатного (Ca) и терригенного (Al) материала (рис. 1), что позволяет выделить периоды колебания продуктивности. Распределение Mn соответствует изменению цвета осадка и отображает изменчивость условия вентиляции в придонном горизонте.

По характеру распределения РЗЭ изученный интервал имеет четкую границу 383 см, ниже которой спектр РЗЭ, нормализованных на Северо-Американский сланец (NASC) [3], характеризуется относительным обогащением легкими РЗЭ (рис. 2). В то время как для интервала 374—383 см характерно обеднение легкими РЗЭ. Минимальное значение (ЛРЗЭ/ТРЗЭ), равное 0,68, получено для горизонта 381—383 см, где существенна примесь базальтовых стекол, обнаруженных при макроописании. В вышележащих слоях это значение варьируется от 0,83 до 1,17, в то время как в нижележащих слоях оно составляет 1,2—1,3. Отметим, что отношение (ЛРЗЭ/ТРЗЭ) может считаться признаком примеси базальтовых стекол.

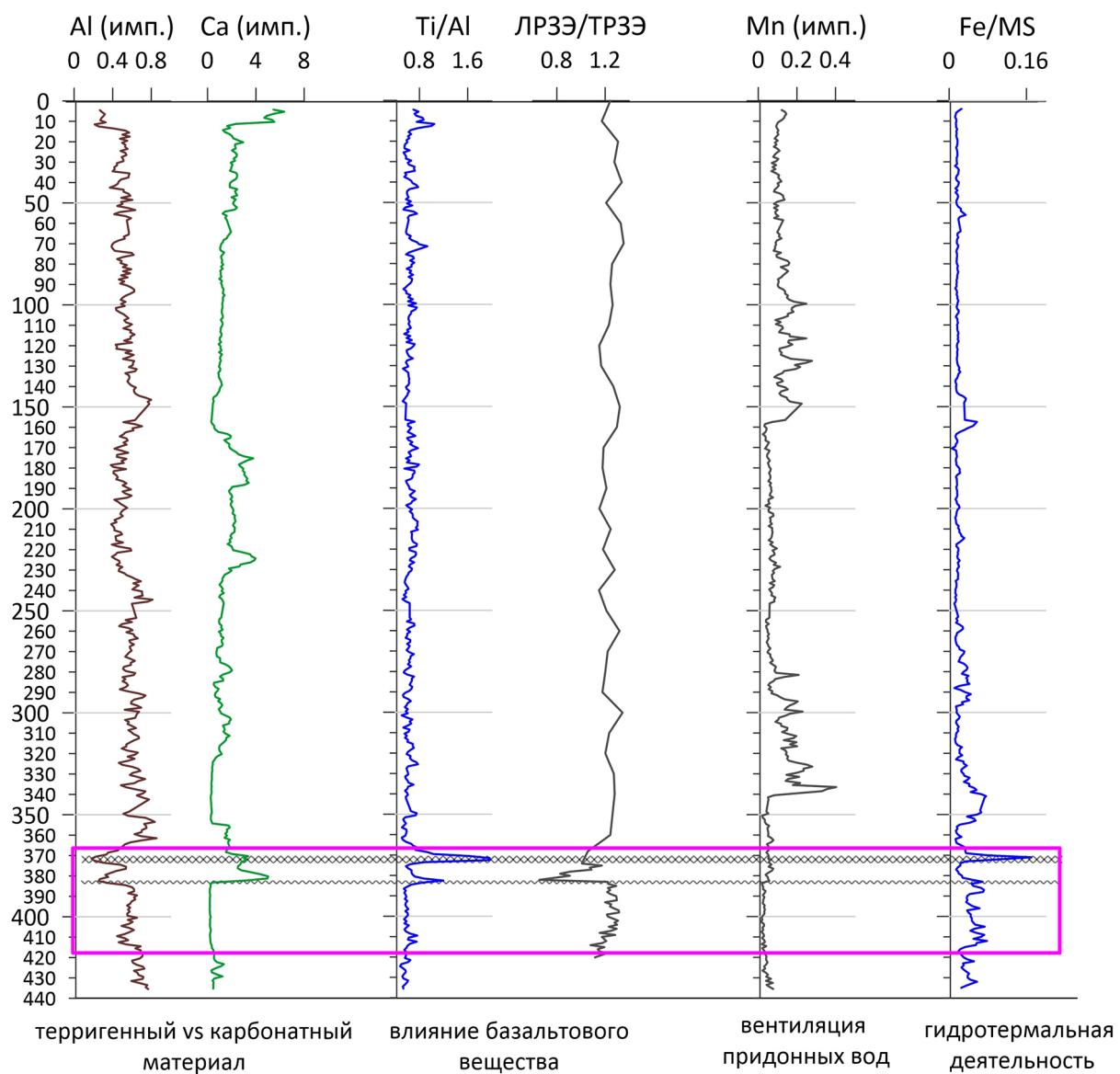


Рис. 1. Вертикальное распределение геохимических индикаторов условий осадконакопления по данным сканирования колонки и анализа ИСП-МС. Рамкой выделен интервал с выраженной гидротермальной и вулканической активностью

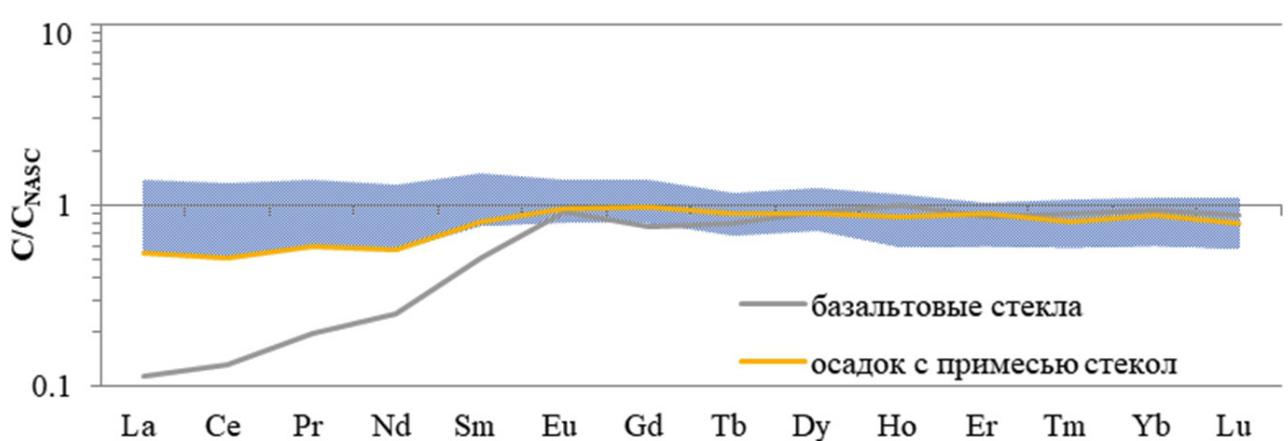


Рис. 2. Диапазон содержаний РЭ, нормализованных на Северо-Американский сланец NASC [3], в донных осадках колонки 5536 и в базальтовых стеклах интервала 370—378 см

Снижение этого значения в интервале 374—383 см может говорить о непрерывности и продолжительности подводного вулканического процесса на всем интервале. Построенная возрастная модель позволяет предположить, что интервал осадков 374—420 см имеет возраст 236,9—264,5 тыс. лет. Интервалы с базальтовыми стеклами были отложены в ходе стадии МИС 7.

Распределение элементов, вовлеченных в гидротермальный процесс, показало увеличение содержания Fe в интервале 386—411 см (см. рис. 1). Одновременно в этом же интервале увеличивается содержание Al, Rb и РЗЭ, что свидетельствует об увеличении роли литогенного вещества. В интервале 374—383 см происходит осаждение ассоциации элементов (Mn, Co, Ni, Cu, Sr, U).

Другие интервалы с признаками повышения гидротермальной активности (340—350, 150—160 см) сопряжены с интервалами понижения продуктивности, что позволяет предположить связь между гляциальными циклами и периодами гидротермальной активности [6].

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00157-П, <https://rscf.ru/project/20-17-00157/>.

Список литературы

1. Bauch H. A., Kandiano E. S., Helmkeet J. P. Contrasting ocean changes between the subpolar and polar North Atlantic during the past 135 ka // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL051800>.
2. Bruvoll V., Breivik A. J., Mjelde R., Pedersen R. B. Burial of the Mohn-Knipovich seafloor spreading ridge by the Bear Island Fan: Time constraints on tectonic evolution from seismic stratigraphy // Tectonics. 2009. Vol. 28, N 4. TC4001.
3. Gromet L. P., Dymek R. F., Haskin L. A., Korotev R. L. “The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics // Geochim. Cosmochim. Acta. 1984. Vol. 48. P. 2469—2482.
4. Jorgensen S. L., Hannisdal B., Lanzén A. et al. Correlating microbial community profiles with geochemical data in highly stratified sediments from the Arctic Mid-Ocean Ridge // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2012. Vol. 109 (42).
5. Lisiecki L. E., Raymo M. E. A Pliocene–Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ¹⁸O records // Paleoceanography. 2005. Vol. 20. PA1003.
6. Middleton J. L., Langmuir C. H., Mukhopadhyay S., McManus J. F., Mitrovica J. X. Hydrothermal iron flux variability following rapid sea level changes // Geophys. Res. Lett. 2016. Vol. 43. P. 3848—3856.
7. Pedersen R., Rapp H., Thorseth I., Lilley M. D., Barriga F. J., Baumberger T. et al. Discovery of a black smoker vent field and vent fauna at the Arctic Mid-Ocean Ridge // Nat. Commun. 2010. Vol. 1. P. 126. DOI: 10.1038/ncomms1124.

НАУЧНЫЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Черкашёв Г. А.

ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия
cherkashov@vniio.ru

Изучение металлогении глубоководной части Мирового океана, как и аналогичное направление геологических исследований на континентах, имеет взаимосвязанное фундаментальное и практическое значение.

Первые открытия XIX и XX вв., связанные с подъемом на борт исследовательских судов необычных железомарганцевых образований и донных осадков с признаками поступления гидротермального рудного вещества, вызвавшие прежде всего вопросы о происхождении и характере распространения этих образований, первоначально ограничивались фундаментальными исследованиями. Постепенное накопление фактического материала привело к осознанию глобального характера феномена океанского оруденения и его очевидной практической ценности. Стало ясно, что на океанском дне имеются новые, дополнительные к континентальным месторождениям, источники минерального сырья — железомарганцевые и сульфидные руды. В результате параллельно с продолжением научных исследований в 50—60-х гг. прошлого столетия начали разворачиваться глубоководные геологоразведочные работы, имеющие уверенные перспективы будущего освоения океанских руд в нынешнем столетии.

С правовой точки зрения в соответствии с Конвенцией по морскому праву (Конвенция) геологические работы в Международном районе морского дна (Район) разделяются на морские научные исследования (МНИ) (marine scientific researches) и геологоразведочные работы (ГРР) (exploration works). Их статус различен: МНИ не имеют ограничений и могут проводиться любой организацией на любых участках Района, в то время как ГРР лимитируются площадями, которые государствам — производителям работ выделяются по контракту с Международным органом по морскому дну. Учитывая общий характер положений Конвенции,

практика проведения МНИ и ГРР приводит к возникновению правовых коллизий, разрешение которых не предусмотрено в Конвенции. Примеры подобных коллизий рассматриваются в докладе. Возникают вопросы и в отношении режима конфиденциальности, который предусмотрен для данных, получаемых в рамках выполнения контрактных ГРР, и отсутствует в случае проведения МНИ.

Фундаментальные металлогенические исследования в океане включают широкий ряд направлений, начиная от изучения геологического строения районов распространения полезных ископаемых, их геоморфологии, тектоники, магматизма и процессов осадконакопления, продолжая изучением характера залегания, морфометрии, состава и возраста рудных тел и заканчивая построением пространственно-временных генетических моделей рудообразующих систем.

Геологоразведочные работы опираются на результаты научных исследований, но, будучи направленными на поиск и оценку минеральных ресурсов, сосредоточены на выборе критериев и методов обнаружения рудных залежей, определения их масштабов и условий залегания для будущей разработки.

Отдельный вопрос касается технологий проведения МНИ и ГРР, применяемых аппаратурных и аналитических комплексов.

В докладе приводятся примеры научных исследований, результаты которых определили и определяют направления текущих и будущих разведочных работ в Мировом океане.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МАШИН КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДОБЫЧИ РАССРЕДОТОЧЕННЫХ ПО МОРСКОМУ ДНУ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Юнгмейстер Д. А.¹, Исаев А. И.¹, Королёв Р. И.²,
Ефимов Ф. А.³, Смоленский М. П.¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² ООО «ПроТех Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия

³ ООО «Механобр-Урал», Екатеринбург, Россия

iungmeister@yandex.ru

Наиболее ценными и перспективными глубоководными полезными ископаемыми являются участки месторождений железомарганцевых конкреций (ЖМК) и кобальтоносных марганцевых корок (КМК), на площади которых выполнены геологоразведочные работы поисковой, оценочной и разведочной стадий: два из них закреплены за Российской Федерацией. По последним подсчетам, мировой запас ЖМК составляет около 1500 млрд т, что намного превосходит объем добычи в разрабатываемых рудниках и карьерах.

В качестве вертикального транспорта глубоководных полезных ископаемых могут использоваться: гидротранспорт (необходима многоступенчатая гидравлическая система с большим количеством промежуточных капсул); технология подъема всплывающими кассетными тралами (конструктивно сложно осуществима, невозможно реализовать на глубине свыше 2 км) [1]; тросовый подъем. Наиболее предпочтительным на первоначальном этапе проведения опытной добычи ЖМК/КМК является тросовый подъем ископаемых, так как прочные грузоподъемные канаты всегда будут входить в перечень оборудования добычи конкреций в качестве устройств для спуско-подъемных операций придонных добычных агрегатов.

На кафедре машиностроения Санкт-Петербургского горного университета совместно с ООО «ГИКО» разработан комплекс [2] (рис. 1) для промышленной добычи на больших глубинах рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых, включающих как ЖМК, так и КМК, с возможностью их предварительного разрушения и отделения от подложки, включающий дистанционно управляемые подводные аппараты, полный цикл работы которых автономно координируется с базового судна. Комплекс не нарушает экологию морского дна.

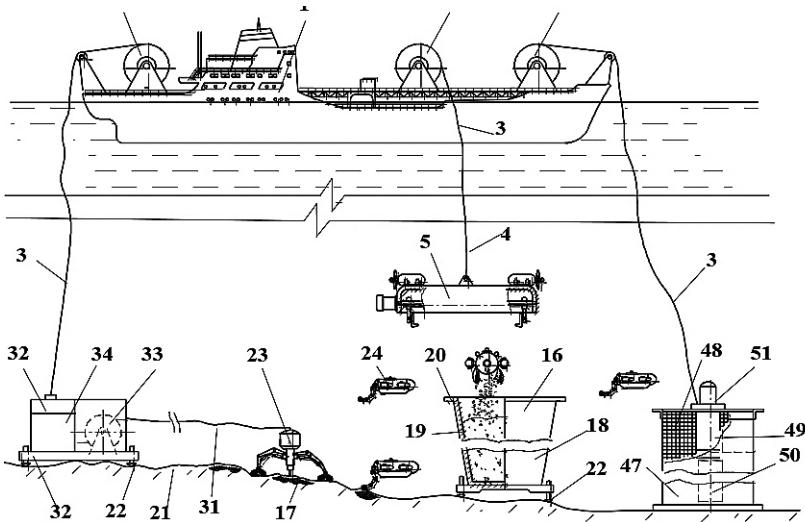


Рис. 1. Комплекс для добычи глубоководных полезных ископаемых

В состав комплекса входит базовое судно с тремя лебедками. Спускаемое оборудование включает станцию с шагающими роботами-сборщиками/отбойщиками, грузовой бункер-накопитель с захватным устройством и бокс- ангар, вмещающий в себя автономных роботов-сборщиков в требуемом количестве. Общая идея этого комплекса позволяет

разработать опытный образец, но для работы требуется высокоеффективная подъемная установка для обеспечения рентабельной производительности.

В некоторых случаях, например для перемещения по дну бокс-ангаров с микророботами, требуется шагающий портал с возможностью захвата и переустановки придонного оборудования (рис. 2). Разработаны варианты элементов гидросистемы: подбор насосов, гидроцилиндров и пр. Расчетная скорость шагания — 0,16 м/с. Таким образом, для передвижения станции базирования на 30 м понадобится 5 минут.

Представлена схема передвижения шагающего подводного аппарата: позиция 1 — вертикальный подъем рычагов; позиция 2 — подъем, выдвижение и опускание на грунт рычага 6, далее подъем рычагов 1, 2 и 4; позиция 3 — задвигание телескопа рычага 6 и выдвигание рычага 3, рычаг 5 совершаает поворот в направлении движения, рычаги 1 и 2 в поднятом состоянии выдвигаются; позиция 4 — рычаги 1,

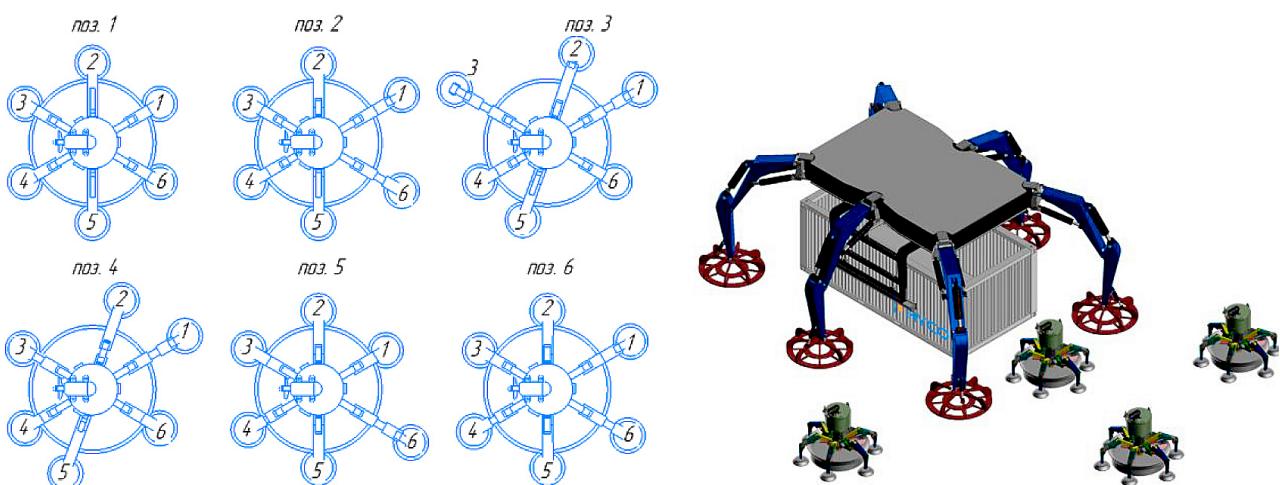


Рис. 2. Алгоритм шагания глубоководного шагающего портала для переустановки придонного оборудования

2 и 4 опускаются, а рычаги 3, 5 и 6 поднимаются; позиция 5 — рычаг 1 задвигается, а рычаг 4 выдвигается, при этом рычаг 2 совершает поворот в направлении движения, рычаги 3, 5 и 6 принимают положения для последующего движения; позиция 6 — рычаги 3, 5 и 6 опускаются, а рычаги 1, 2 и 4 поднимаются. Цикл повторяется с позиции 2.

Расчеты показали, что необходимо учитывать два варианта бункеров (см. рис. 1, центральная часть) в зависимости от плотности распределения конкреций q , с полезной массой 50 и 100 т. При этом параметры подъемного кабель-троса: разрывное усилие 2000 кН учитывает: запас прочности — 1,5; сопротивление движению в воде — 22 кН; динамическая составляющая растягивающего усилия — 180 кН; вес каната — 60 кН; вес контейнера — 100 кН; полезный вес груза — 1000 кН.

Формула для расчета часовой производительности комплекса для сбора ЖМК/КМК:

$$Q_{\text{час}} = \frac{G}{T_{\text{ц}}},$$

где G — вес груза; $T_{\text{ц}} = 2t_{\text{спуск/подъем}} + t_{\text{захвата}} + t_{\text{разгрузки}}$ — время цикла; $T_{\text{ц}}$ зависит от скорости подъема и может принимать значения в интервале 1—2 часа, без учета времени заполнения бункера.

В зависимости от вместимости бункера время заполнения составляет 1,5—3 часа, поэтому при переменных q и времени цикла $T_{\text{ц}}$, могут применяться различные схемы замены пустого бункера на заполненный и переустановки бункеров на новые точки стояния.

На рис. 3 показаны зависимости производительности Q (т/год) от времени цикла спуско-подъемных операций и скорости подъема. Для достижения требуемой производительности 0,5 млн т/год необходимо осуществить подъем со скоростью 2,5 м/с бункера с грузоподъемностью 92 т. Необходимо совершенствовать

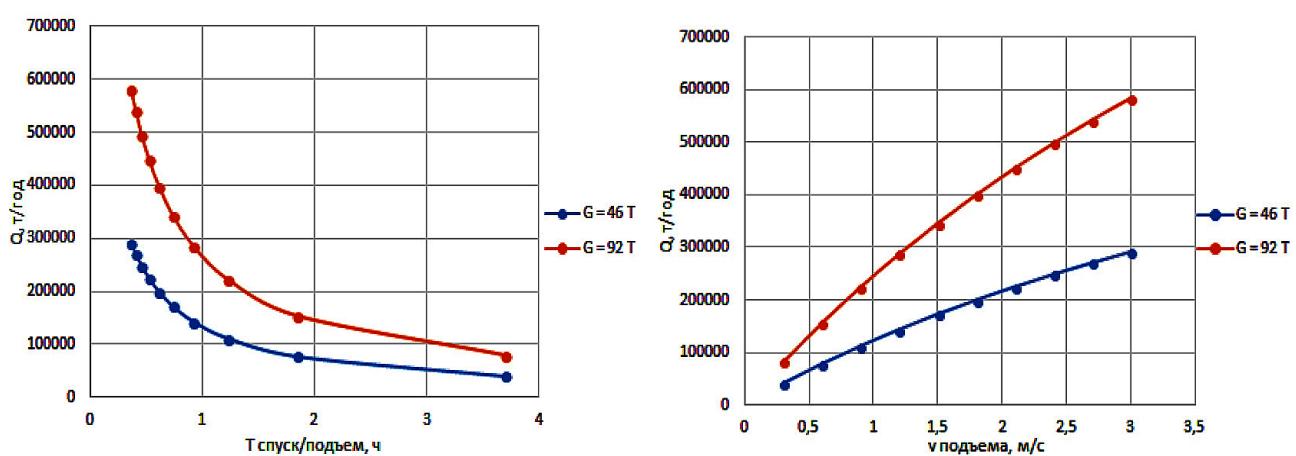


Рис. 3. Зависимость годовой производительности комплекса от времени цикла и скорости подъема для одного бункера разной грузоподъемности

технологию работы роботов-сборщиков для снижения времени заполнения бункера и технологию спуско-подъемных операций для снижения времени цикла до 40 минут.

Результатом технологии добычи глубоководных ЖМК/КМК СПГУ и ООО «ГИКО» на базе комплекса [2] является применение шагающих роботов-сборщиков/отбойщиков, считающееся способом добычи, не оказывающим существенного влияния на придонную биоту [3].

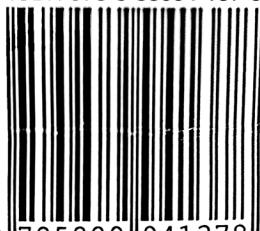
Предложенная технология позволяет достигнуть требуемой производительности (0,5 млн т/год), при этом используется специальная гидросистема с гидравлическими цилиндрами, необходимая для быстрого перемещения сборщиков и приемного бункера.

По нашему мнению, необходима концентрация усилий по созданию работоспособной подъемной канатной установки, достигающей глубины 5—6 км (и бункера, вмещающего 100 т конкреций), способной выполнять вспомогательные спуско-подъемные операции по опусканию на дно основного и дополнительного оборудования.

Список литературы

1. Юнгмейстер Д. А. Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций / Д. А. Юнгмейстер, С. М. Судариков, К. А. Киреев // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 88—95. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.88.
2. Патент № 2788227 РФ. Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых / Д. А. Юнгмейстер, В. А. Шпенст, А. В. Григорчук, А. И. Исаев, М. П. Смоленский. Заявка № 2022123385 от 01.09.2022; опубл. 17.01.2023. Бюллетень № 2.
3. Судариков С. М., Юнгмейстер Д. А., Королёв Р. И., Петров В. А. О возможности уменьшения техногенной нагрузки на придонные биоценозы при добыче твердых полезных ископаемых с использованием технических средств различной модификации // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 82—96. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.14>.

ISBN 978-5-88994-137-8



9 785889 941378

Сборник тезисов
10-й Международной конференции
«ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ
МИРОВОГО ОКЕАНА»

The 10th International Conference
«MINERALS OF THE OCEAN»
Abstract Book

Компьютерная верстка Е. В. Бурыкиной, корректор В. М. Гончар

Подписано в печать 16.06.2023. Формат 60×90 1/8
Уч.-изд. л. 5. Усл. печ. л. 6. Тираж 300 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в секторе издания научно-технической продукции ФГБУ «ВНИИОкеангеология»
190121, СПб., Английский пр., д. 1

