

Auzende J.M., Bideau D., Bonatti E. et al. Direct observation of a section through slow-spreading oceanic crust // *Nature*. 1989. Vol. 337. N. 6209. P. 726–729.

Bougault H., Dmitriev L., Schilling J.-G. et al. Mantle heterogeneity from trace elements: MAR triple junction near 14°N // *Earth and Planetary Science Letters*. 1988. Vol. 88. P. 27–36.

Cherkashov G.A., Ashadze A.M., Gerbruk A.V. New fields with manifestation of hydrothermal activity in the Logatchev area (14°N, Mid-Atlantic Ridge) // *InterRidge News*. 2000. V. 9. P. 26–27.

Fouquet Y., Cherkashov G., Charlou J.L. 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. V. 17. P. 15–19.

Petersen J. Beitrage zur Petrographic Sulphur Island, Peel Island, Hachijo und Mijakeshimja // *Jahrb. Hamburg, Wiss. Anst.*, 1891. Bd 8. S. 25.

**И.Ю. Мелекесцева**

*Южно-Уральский федеральный научный центр  
минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия  
melekestseva-irina@yandex.ru*

### **Гидротермальные сульфидные поля, ассоциирующие с внутренними океаническими комплексами: связаны ли они все с ультрамафитами?**

**I.Yu. Melekestseva**

*South Urals Federal Research Center of Mineralogy and  
Geoecology UB RAS, Miass, Russia*

### **Hydrothermal sulfide fields associated with oceanic core complexes: are they all ultramafic-related?**

**Abstract.** The mineralogical-geochemical peculiarities of massive sulfides from hydrothermal sulfide fields related to oceanic core complexes of the Mid-Atlantic Ridge are analyzed. In spite of spatial association of hydrothermal fields with oceanic core complexes, many fields exhibit no genetic link with mantle rocks. Some peculiarities reflect the magmatic contribution or could also be related to the involvement of E-MORBs and felsic rocks from deep parts of the oceanic core complex to the recycling process.

*Введение.* В настоящее время известно два типа гидротермальных сульфидных полей, приуроченных к медленным и ультрамедленно-спрединговым хребтам: поля, ассоциирующие с базальтами (ТАГ, Брокен Спур, Снейк Пит, Краснов и др.) и ультрамафитами (Логачев, Рейнбоу, Ашадзе и др.) [Fouquet et al., 2010]. Выходы ультрамафитов маркируют присутствие внутренних океанических комплексов (ВОК), которые выводят на морское дно мантийные породы по разломам типа детачмент [Escartín et al., 2008]. Их сложное геологическое строение приводит к тому, что гидротермальные поля, связанные с выходами ВОК, отличаются друг от друга в пределах одного ВОК, а также от сульфидных полей других ВОК. В данной работе эта проблема рассмотрена на примере гидротермального узла Семенов.

*Краткая характеристика объектов.* Гидротермальный сульфидный узел Семенов (13°30' с.ш.) в Срединно-Атлантическом хребте (САХ) открыт в 2007 г. в 30-м рейсе НИС «Профессор Логачев» [Beltenev et al., 2007]. Узел находится между разломами Зеленого мыса и Марафон в западном борту рифтовой долины на глубинах от 2400 до 2950 м и приурочен к выходу ВОК, вытянутому по широте примерно на 10 км при ширине около 4.5 км [MacLeod et al., 2009]. Узел состоит из пяти субширотно расположенных гидротермальных полей [Beltenev et al., 2007, 2009]. С поверхности ВОК драгированы серпентинизированные

и оталькованные перидотиты и редкие габброиды [Перцев и др., 2012]. В тектонической зоне контроля гидротермальных полей Семенов-1, -2, -5 и -3 обнаружены плагиограниты, диориты и тоналиты, которые рассматриваются как вероятные продукты частичного плавления базитового материала или реликтов континентальной коры в глубинных частях гидротермальных систем [Aranovich et al., 2023]. Основные и ультраосновные породы драгированы на полях Семенов-1, -2 и -5, тогда как на полях Семенов-3 и -4 были подняты только базальты [Beltenev et al., 2007, 2009].

*Руды полей Семенов-1, -3 и -4* отличаются марказит-пиритовым составом с высоким содержанием барита (до 20 об. %) и опала [Мелекесцева и др., 2010; Melekestseva et al., 2014, 2018]. Сульфиды  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$  и  $\text{Pb}$  являются акцессорными минералами. Руды содержат высокие концентрации  $\text{Fe}$  (до 43.54 %),  $\text{Ba}$  (до 3.48 %),  $\text{Sr}$  (до 623 г/т),  $\text{SiO}_2$  (до 47.38 %) и низкие –  $\text{Cu}$  (до 0.56 %),  $\text{Zn}$  (до 0.11 %),  $\text{Pb}$  (до 0.02 %),  $\text{Co}$  (до 0.0048 %),  $\text{Ni}$  (до 0.0083 %),  $\text{Ag}$  (до 70.8 г/т) (поле Семенов-1). По данным ЛА-ИСП-МС, содержания  $\text{Co}$  и  $\text{Ni}$  (типоморфных элементов ультрамафитов) в разных генерациях дисульфидов  $\text{Fe}$ , в среднем, составляет 0.01–14 г/т  $\text{Co}$  и 0.01–1.32 г/т  $\text{Ni}$ . В обломках крупнокристаллического пирита сульфидных брекчий поля Семенов-3 содержания  $\text{Co}$  и  $\text{Ni}$  достигают 1145 и 375 г/т, соответственно.

*Руды поля Семенов-5* представлены массивными марказит-пиритовыми и прожилково-вкрапленными халькопирит-пиритовыми рудами в гидротермально-измененных ультрамафитах [Firstova et al., 2022]. Руды характеризуются высокими содержаниями  $\text{Fe}$  (до 44.50 %), варьирующими –  $\text{Cu}$  (0.11–16.6 %), низкими –  $\text{Zn}$  (до 0.19 %) и повышенными –  $\text{Co}$  (859–1600 г/т) и  $\text{Ni}$  (958–1610 г/т) в прожилково-вкрапленных рудах и умеренными и низкими (9.3–509 и 4.0–45 г/т, соответственно) – в массивных. Химический состав пирита из прожилково-вкрапленных и массивных руд в ультрамафитах поля Семенов-5 отличается от такового из других полей гидротермального узла повышенными содержаниями  $\text{Co}$  (до 2.97 мас. %) и  $\text{Ni}$  (до 2.01 мас. %).

*Руды поля Семенов-2* представлены медно-цинковыми разностями с халькопиритом, изокубанитом и сульфидами  $\text{Zn}$  и высокими содержаниями  $\text{Cu}$  (до 19.33 %),  $\text{Zn}$  (до 18.32 %),  $\text{Au}$  (до 188 г/т),  $\text{Ag}$  (до 1788 г/т),  $\text{Cd}$  (до 1347 г/т),  $\text{SiO}_2$  (до 29.62 %), повышенными –  $\text{Te}$  (до 34.7 г/т) и низкими –  $\text{Co}$  (до 0.011 %) и  $\text{Ni}$  (до 0.003 %) [Melekestseva et al., 2017]. Отличительной особенностью руд поля Семенов-2 является присутствие акцессорных минералов  $\text{Te}$  (мелонит, теллуровисмутит, гессит, алтаит, калаверит,  $\text{Te}$ -содержащая блеклая руда),  $\text{Se}$  (клаусталит, науманнит),  $\text{Sb}$  (ауростибит) и  $\text{Co}$  (кобальтин) [Firstova et al., 2019].

*Обсуждение.* Низкие содержания  $\text{Co}$  и  $\text{Ni}$  в рудах и минералах полей Семенов-1, -2, -3 и -4 по сравнению, например, с таковыми в рудах полей Логачев, Ашадзе или Рейнбоу, которые подстилаются ультрамафитами [Fouquet et al., 2010], свидетельствуют об отсутствии генетической связи образования этих руд с ультрамафитами. Генетическая связь с ультрамафитами (прожилково-вкрапленные и массивные сульфиды в измененных перидотитах) прослеживается только на поле Семенов-5.

Высокие содержания  $\text{Ba}$ ,  $\text{Sr}$  и  $\text{SiO}_2$  в рудах полей Семенов-1, -2, -3 и -4 типичны для руд гидротермальных полей Лаки Страйк и Менез Гвен, связанных с Азорской горячей точкой и базальтами типа E-MORB [Fouquet et al., 1994]. Термодинамическое моделирование образования марказит-пиритовых руд, обогащенных баритом, показало их формирование в системе базальт/морская вода при добавлении магматического газа и невозможность их образования в системе перидотит/морская вода даже при добавлении магматического газа [Melekestseva et al., 2014]. Необходимо отметить данные по химическому составу гидротермальных образцов с неактивного поля Рейнбоу-2 с высокими содержаниями  $\text{Ba}$  (16.20 мас. %) и  $\text{Pb}$  (20987 г/т) [Fouquet et al., 2010], что ставит под вопрос связь рудообразования с ультрамафитами на поле Рейнбоу-2.

Повышенные содержания Те и присутствие теллуридов в рудах поля Семенов-2 могут указывать на вовлечение в рудообразование кислых пород из глубинной части ВОК. Так, например, на колчеданных месторождениях Урала высокие содержания Те (30 г/т) и теллуриды более типичны для месторождений, формирующихся на кислом основании [Maslennikov et al., 2013].

*Заключение.* Несмотря на пространственную приуроченность гидротермальных полей узла Семенов к структуре ВОК с мантийными породами, генетическая связь рудообразования с ультрамафитами не прослеживается на большинстве изученных объектов. Все гидротермальные поля обнаруживают вещественные признаки базальтового субстрата [Перцев и др., 2012]. Это отличается от гидротермальных полей, связанных с подобными структурами в других частях САХ (например, Логачев, Рейнбоу, Ашадзе), где связь с ультрамафитами выражена в сильно восстановительных условиях рудообразования и соответствующих минералого-геохимических особенностях руд: в частности, присутствии обильного пирротина [Fouquet et al., 2010]. Содержания и геохимические отношения химических элементов (главных и элементов-примесей) и рудные минеральные ассоциации гидротермальных полей узла Семенов подчеркивают главный вклад основных, а, возможно, и кислых пород из глубинных горизонтов ВОК. Вовлечение кислых дифференциатов в рециклинговую ячейку также предполагается для гидротермальной системы г. Джордан в Юго-Западном Индийском хребте [Nayak et al., 2014]. Некоторые особенности (например, отрицательный изотопный состав S сульфидов некоторых полей, присутствие CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> во флюидных включениях [Melekestseva et al., 2014, 2017]) также отражают магматический вклад в рудообразование.

*Автор глубоко благодарен В.Н. Иванову, В.Е. Бельтеневу и И.И. Рождественской за возможность участия в рейсе № 30 НИС «Профессор Логачев» и отбора образцов для исследований.*

## Литература

- Мелекесцева И.Ю., Котляров В.А., Иванов В.Н. и др. Руды нового гидротермального сульфидного узла Семенов (13°31' с.ш.), Срединно-Атлантический хребет // Литосфера. 2010. № 2. С. 47–61.
- Перцев А.Н., Бортников Н.С., Власов Е.А. и др. Современные колчеданные залежи рудного района Семенов (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.
- Aranovich A.Y., Pertsev A.N., Girmis A.V. и др. Basalts from MAR at 13°15'–13°40' N: What mixed? // Lithos. 2023. Vol. 462–463. #107424.
- Beltenev V., Ivanov V., Rozhdestvenskaya I. et al. A new hydrothermal field at 13°30' N on the Mid-Atlantic Ridge // InterRidge News. 2007. Vol. 16. P. 9–10.
- Beltenev V., Ivanov V., Rozhdestvenskaya I. et al. New data about hydrothermal fields on the Mid-Atlantic Ridge between 11°–14° N: 32<sup>nd</sup> cruise of R/V Professor Logatchev // InterRidge News. 2009. Vol. 18. P. 14–18.
- Escartín J., Smith D.K., Cann J. et al. Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere // Nature. 2008. Vol. 455. № 9. P. 790–795.
- 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. #294.
- Firstova A., Cherkashov G., Stepanova T. et al. 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. #1593.
- Fouquet Y., Charlou J.-L., Costa I. et al. A detailed study of the Lucky Strike hydrothermal site and discovery of a new hydrothermal site: Menez Gwen; preliminary results of the DIVA1 Cruise (5–29 May, 1994) // InterRidge News. 1994. Vol. 3(2). P. 14–17.

*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 // Diversity of hydrothermal systems on slow spreading ocean ridges. Rona P.A., Devey C.W., Dymant J., Murton B.J. (Eds.) AGU Geophys. Monograph, 2010. P. 321–368.

*MacLeod C.J., Searle R.C., Murton B.J. et al.* Life cycle of oceanic core complexes // Earth and Planetary Science Letters. 2009. Vol. 287. P. 333–344.

*Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., et al.* Tellurium-bearing minerals in zoned sulfide chimneys from Cu-Zn massive sulfide deposits of the Urals, Russia // Mineralogy and Petrology. 2013. Vol. 107. P. 67–99.

*Melekestseva I.Yu., Tret'yakov G.A., Nimis P. et al.* Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13°30.87' N): Evidence for phase separation and magmatic input // Marine Geology. 2014. Vol. 349. P. 37–54.

*Melekestseva I., Maslennikov V., Safina N. et al.* Sulfide breccias from the Semenov-3 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge: authigenic mineral formation and trace element pattern // Minerals. 2018. Vol. 8(8). P. 321.

*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.

*Nayak B., Halbach P., Pracejus B., Münch U.* Massive sulfides of Mount Jourdan along the super-slow spreading Southwest Indian Ridge and their genesis // Ore Geology Reviews. 2014. Vol. 63. P. 115–128.

**К.А. Кукса**

*Санкт-Петербургский государственный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
katerina.kuksa@spbu.ru*

**Оценка количества взвеси материала гидротермального плюма  
в металлоносных осадках рудного узла Семенов  
(Срединно-Атлантический хребет)**

**К.А. Кукса**

*St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia*

**Estimation of the amount of plume particulates in metalliferous sediments from  
the Semenov hydrothermal sulfide cluster (Mid-Atlantic Ridge)**

**Abstract.** Mineralogical and geochemical features of three cores of proximal metalliferous sediments from the Semenov hydrothermal sulfide cluster were studied in order to decipher the evolution of fluid discharge. Iron has a dual origin in core sediments: from hydrothermal plume fallout and mass-wasted sulfide deposits. A novel approach of quantitatively assess the relative amount of plume fallout matter allowed us to reconstruct the temporal variations of hydrothermal activity within the Semenov-1, 2 and 4 fields, which lasted permanently for about ~43 kyr with varying intensity.

Металлоносные осадки, ассоциирующие с современными гидротермальными системами, являются важнейшими хранителями летописи истории гидротермальной деятельности. В то время как результаты изучения сульфидных руд, формирующихся вокруг зон разгрузки гидротермального флюида, позволяют восстанавливать лишь отдельные эпизоды, исследование колонок металлоносных осадков дает возможность расшифровать «непрерывную запись»