

*Н. П. Сафина<sup>1,2</sup>, И. Ю. Мелекесцева<sup>1</sup>, Н. Н. Анкушева<sup>1,2</sup>, А. М. Юминов<sup>2</sup>,  
П. Нимис<sup>3</sup>, В. А. Котляров<sup>1</sup>, С. А. Садыков<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> – Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс  
safina@ilmeny.ac.ru*

*<sup>2</sup> – Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе*

*<sup>3</sup> – Университет г. Падуя, Италия*

**Барит из руд Сафьяновского колчеданного месторождения  
(Средний Урал) и гидротермальных полей Семенов-1 и 3  
(Срединно-Атлантический хребет):  
сравнительный анализ условий образования**

**Введение.** Барит является распространенным жильным минералом в рудах древних колчеданных месторождений и современных океанических гидротермальных систем. Особенности его морфологии, химического и изотопного составов, а также состава флюидных включений отражают условия образования минерала и сосуществующих с ним сульфидов. В работе представлены результаты сравнительного изучения барита из серноколчеданных колломорфных и обломочных руд палеозойского Сафьяновского месторождения (Средний Урал) и кайнозойских гидротермальных

ных полей Семенов-1 и Семенов-3 (САХ). Несмотря на различные геодинамические обстановки формирования (задуговой палеобассейн и срединно-океанический рифт), эти объекты характеризуются сходными текстурами руд и минеральными ассоциациями. Кроме того, Сафьяновское месторождение отличается низкой степенью метаморфизма окружающих пород и руд [Язева и др., 1991] и хорошей сохранностью сульфидной постройки [Масленников, 2006], что позволяет сопоставлять объект с современными аналогами.

Сафьяновское месторождение находится в Режевском районе на Среднем Урале и залегает в породах риолит-дацит-андезит-базальтового комплекса [Язева и др., 1991]. Детальное картирование месторождения позволило реконструировать основную залежь месторождения как разрушенный сульфидный холм [Масленников, 2006]. Гидротермальные поля Семенов-1 и -3 рудного узла Семенов (13°30' с.ш., САХ) приурочены к выходу внутриокеанического корового комплекса [Beltenev et al., 2007]. Поле Семенов-1 расположено у подножия горы на глубинах 2570–2620 м и представляет собой единый холм или, возможно, серию рудных холмов и продуктов их разрушения. По данным [Beltenev et al., 2007], поле ассоциирует с серпентинитами, однако руды этого поля более характерны для полей на базальтах [Melekestseva et al., 2014]. Поле Семенов-3 располагается на склоне горы на глубинах 2400–2600 м и ассоциирует с базальтами.

**Текстурно-структурные и минералогические особенности руд.** Преобладание дисульфидов железа, барита и кварца является главной сходной чертой колломорфных и тонкозернистых руд Сафьяновского месторождения и поля Семенов-1. В колломорфных рудах Сафьяновского месторождения, залегающих в кровле сульфидной постройки, таблитчатые кристаллы барита размером до 0.5 мм с хорошо проявленной спайностью ассоциируют с кварцем, замещающим пирит-марказитовые агрегаты. В тонкозернистых и колломорфных рудах поля Семенов-1 барит представлен радиально-лучистыми сростками таблитчатых кристаллов размером до 1 мм, образующими гнезда и прожилковидные агрегаты. Ксеноморфные агрегаты пирита и марказита проникают в межкристаллическое пространство сростков барита и нарастают на него. Барит в цементе пиритовых брекчий Сафьяновского месторождения характеризуется сростками таблитчатых кристаллов размером до 0.25 мм с признаками наложенных деформаций и наличием стилолитовых швов по границам изогнутых кристаллов. Кристаллы барита в брекчиях поля Семенов-3 с кварцем и халькопиритом заполняют многочисленные трещины и пустоты в марказит-пиритовых обломках и цементе в виде щеток толщиной до 0.5 см, сложенных розетками с размером отдельных кристаллов до 1 мм.

**Химический и изотопный состав барита.** По данным микрозондового и ИСП-МС анализов, стронций является главной примесью в составе изученного барита. Барит из руд Сафьяновского месторождения содержит SrO до 1.05 мас. % по данным микрозондового анализа и 2529–3095 г/т Sr по данным ИСП-МС. В барите полей Семенов-1 и -3 содержания SrO достигают 4.12 и 4.73 мас. % и 7051 и 3408 г/т Sr, соответственно. Барит поля Семенов-1 отличается пониженными содержаниями PbO (0.02–0.16 мас. %), CaO (0.01–0.38 мас. %), присутствием ZnO (0.01–0.05 мас. %) и FeO (0.12–0.40 мас. %). В составе зональных кристаллов барита поля Семенов-3 повышенные содержания SrO (до 4.73 мас. %) и PbO (до 0.5 мас. %) установлены в ядре, а пониженные содержания этих элементов (0.24–1.06 мас. % и < 0.1 мас. %, соответственно) – на периферии. Барит из колломорфных руд Сафьяновского место-

рождения содержит меньше CaO (0.03–0.11 мас. %), который не установлен в барите обломочных руд.

Средний изотопный состав серы в барите составляет (‰): +22.9 ( $\sigma$  1.5) и +21.2 ( $\sigma$  0.2) для колломорфных руд Сафьяновского месторождения и поля Семенов-1, соответственно, и +28.1 ( $\sigma$  0.9) и +19.6 ( $\sigma$  0.8) для обломочных руд Сафьяновского месторождения и поля Семенов-3, соответственно.

**Термобарогеохимические исследования.** Первичные флюидные включения (ФВ) 10–40 мкм в барите из колломорфных и брекчиевых руд Сафьяновского месторождения характеризуются формой «негативного кристалла», иногда со сглаженными углами. По фазовому составу выделяются существенно газовые и двухфазные (жидкость + газ) ФВ с объемом газового пузырька 20–30 %. Редкие угловатые, округлые или веретенообразные ФВ размером 8–12 мкм в барите из руд полей Семенов-1 и -3 также разделяются на существенно газовые и двухфазные, состоящие из светлой жидкости и газового пузырька, занимающего 5–10 % объема включения.

Температуры гомогенизации двухфазных ФВ в барите составляют: 162–184 °С (колломорфные руды Сафьяновского месторождения), 58–199 °С (тонкозернистые руды поля Семенов-1), 130–170 °С (брекчии Сафьяновского месторождения), 241–310 °С (брекчии поля Семенов-3). На основании температур плавления последнего кристаллика льда, концентрации солей в растворах составляют (мас. % NaCl-экв.): 1.6–4.5 (колломорфные руды Сафьяновского месторождения), 0.6–3.8 (тонкозернистые руды поля Семенов-1), 1.4–5.4 (брекчии Сафьяновского месторождения) и 4.8–9.2 (брекчии поля Семенов-3). Температуры эвтектики ФВ в барите колломорфных руд Сафьяновского месторождения и поля Семенов-1 варьируют от –21.7 до –22.3 °С и от –2.2 до –6.6 °С, соответственно. Согласно [Борисенко, 1977], такие температуры эвтектики соответствуют солевым системам NaCl–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O для Сафьяновского месторождения, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>O и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–NaHCO<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O – для поля Семенов-1. Температуры эвтектики в барите брекчий изменяются от –22.0 до –22.3 °С на Сафьяновском месторождении и от –21.1 до –21.8 °С – поле Семенов-3, что соответствует солевой системе с преобладанием NaCl.

**Обсуждение результатов и выводы.** В результате изучения установлено сходство образования гидротермального барита из колломорфных руд Сафьяновского месторождения и гидротермального поля Семенов-1. Гидротермальный барит отлагался из низко- до умеренно температурных флюидов, подвергшихся фазовой сепарации, о чем свидетельствует их соленость (как выше, так и ниже морской воды) [de Ronde et al., 2003]. В барите брекчий поля Семенов-3 концентрации солей в растворах в 1.5–2 раза превышают соленость морской воды, что может отражать вклад магматического флюида [de Ronde et al., 2003].

В брекчиях Сафьяновского месторождения кристаллизация барита связывается с катагенетическими процессами, тогда как барит в обломочных рудах поля Семенов-3 – продукт поздней гидротермальной активности. Главным отличием между катагенетическим и гидротермальным баритом является морфология. Для гидротермальных разновидностей характерны недеформированные кристаллы и их радиально-лучистые агрегаты. Катагенетический барит представлен кристаллами с признаками деформаций и стилолитовыми швами, что свидетельствует о стесненных условиях роста и увеличении давления в условиях катагенеза [Япаскерт, 2005]. В пользу образования барита из брекчий поля Семенов-3 из гидротермальных растворов свидетельствуют развитие минерала в порах рудных обломков и цементе, радиально-лучистое строение агрегатов, ассоциация с селеносодержащим халькопиритом (со-

держание Se 638–1208 г/т по данным ЛА-ИСП-МС анализов, неопубликованные данные И. Ю. Мелекесцевой). Повышенные содержания Se в халькопирите считаются одним из индикаторов высокотемпературных (>300 °C) условий образования халькопирита [Maslennikov et al., 2009].

Химический состав изученного барита не информативен при определении условий образования минерала, так как содержания элементов, в частности, Sr, характеризуются значительными вариациями. Причинами вариаций Sr может быть как различное содержание Sr во флюиде, так и разная степень смешения флюида с морской водой. Для катагенетического барита в обломочных рудах Сафьяновского месторождения повышенные содержания Sr также могут быть связаны с присутствием обломков вмещающих пород.

Изучение изотопного состава серы в барите отражает различные источники сульфат-иона. Изотопный состав серы гидротермального барита из ранних колломорфных руд соответствует сульфату серы девонской (+23 до +24 ‰, [Claypool et al., 1980]) и современной (+21.2 ‰, [Rees et al., 1978]) морской воды. Пониженные значения  $\delta^{34}\text{S}$  в барите брекчий поля Семенов-3 относительно современной морской воды связаны с заимствованием сульфат-иона при частичном окислении  $\text{H}_2\text{S}$  гидротермального флюида [Shanks et al., 1995], что также согласуется с ассоциацией барита с высокотемпературным халькопиритом. Для барита из брекчий Сафьяновского месторождения характерны повышенные значения сульфат-иона. Это, скорее всего, является результатом термохимической сульфат-редукции при катагенетическом преобразовании осадка, которая может происходить при температурах до 180 °C в отличие от бактериальной сульфат-редукции [Machel, 2001]. Этому также не противоречат температуры гомогенизации изученного барита, которые сопоставимы с температурами катагенеза (до 200 °C) [Япаскурт, 2005].

В целом, несмотря на различные геодинамические обстановки формирования изученных объектов, первичные гидротермальные баритсодержащие пиритовые руды были образованы в сходных условиях, а условия образования барита в каждом изученном случае совпадают с условиями образования сосуществующих сульфидов.

*Исследования поддержаны РНФ (проект № 14-1700691).*

## Литература

- Борисенко А. С. Изучение солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–18.
- Масленников В. В. Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 384 с.
- Язева Р. Г., Молошаг В. П., Бочкарев В. В. Геология и рудные парагенезисы Сафьяновского колчеданного месторождения в среднеуральском ретрошарьяже // Геология рудных месторождений. 1991. Т. 33. № 4. С. 76–58.
- Япаскурт О. В. Аспекты теории постседиментационного литогенеза // Литосфера. 2005. № 3. С. 3–30.
- 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.
- Claypool G. E., Holser W. T., Kaplan I. R. et al. The age curves of sulphur and oxygen isotopes in marine sulphates and their mutual interpretation // Chemical Geology. 1980. Vol. 28. P. 199–260.
- de Ronde C. E. J., Faure K., Bray C. J. et al. Hydrothermal fluids associated with seafloor mineralization at two southern Kermadec arc volcanoes, offshore New Zealand // Mineralium Deposita. 2003. Vol. 38. P. 217–233.

*Machel H. G.* Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings – old and new insights // *Sedimentary Geology*. 2001. Vol. 140. P. 143–175.

*Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Large R. R., Danyushevsky L. V.* Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) // *Economic Geology*. 2009. Vol. 104. P. 1111–1141.

*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.

*Rees C. E., Jenkins W. J., Monster J.* The sulfur isotope geochemistry of ocean water sulfate // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1978. Vol. 42. P. 377–382.

*Shanks W. C. III, Böhlke J. K., Seal R. R. II* Stable isotopes in mid-ocean ridge hydrothermal systems: interactions between fluids, minerals and organisms / In: *Humphris S. E., Zierenberg R. A., Mullineaux L. S., Thomson R. E.* (eds). *Seafloor hydrothermal processes*. Geophysical Monograph. 1995. Vol. 91. P. 194–221.