

УДК 535.435

DOI:10.35597/2313-545X-2019-5-4-5

**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
СУЛЬФИДНЫХ ТРУБ ЮБИЛЕЙНОГО МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

**А.С. Целуйко¹, В.В. Масленников¹, С.П. Масленникова¹, Л.В. Данюшевский²,
В.А. Котляров¹, И.А. Блинов¹**

¹Южно-Уральский федеральный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; celyukoa@rambler.ru

²Тасманийский университет, г. Хобарт, 7001 Австралия

**MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF SULFIDE CHIMNEYS
OF THE YUBILEYNOE MASSIVE SULFIDE DEPOSIT (SOUTH URALS)**

**A.S. Tseluyko¹, V.V. Maslennikov¹, S.P. Maslennikova¹, L.V. Danyushevsky²,
V.A. Kotlyarov¹, I.A. Blinov²**

¹South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia

²University of Tasmania, Hobart, 7001 Australia

В рудах Юбилейного месторождения обнаружены три минеральных типа гидротермальных сульфидных труб палеокурильщиков, образующих непрерывный минералогический ряд: пирит-халькопиритовые, пирит-сфалерит-халькопиритовые и халькопирит-пирит-сфалеритовые. В пределах ряда по мере уменьшения количества халькопирита нарастают относительные количества сфалерита и пирита, кварц сменяется тальком и кальцитом, теллуридный парагенезис акцессорных минералов переходит в золото-галенит-блекловорудный. В этом же направлении в сульфидах уменьшаются концентрации элементов высокотемпературной ассоциации (Bi, Te, Se, Co) при нарастании содержаний элементов, характерных для низкотемпературной ассоциации (Ag, Sn, Pb). По минеральной зональности, составу и соотношениям Se, Te, Sn и Ag в халькопирите каждый из минеральных типов может быть сравним с соответствующими разновидностями современных черных, серых и бесцветных курильщиков. Палеокурильщики характеризуются высокими содержаниями Bi в халькопирите, Te, Ni, Au – в колломорфном пирите и низкими содержаниями Fe и Co в сфалерите, что сближает их с курильщиками современных островодужных бассейнов.

Илл. 13. Табл. 1. Библ. 45.

Ключевые слова: трубы черных курильщиков, ЛА-ИСП-МС, элементы-примеси, минералы, колчеданные месторождения, Южный Урал

Three mineral types of hydrothermal chimneys (pyrite-chalcopirite, pyrite-sphalerite-chalcopirite and chalcopirite-pyrite-sphalerite) form a continuous mineralogical range in ores from the Yubileynoe deposit. In this range, the amount of chalcopirite decreases, the relative amounts of sphalerite and pyrite increase, quartz is replaced by talc and calcite, telluride assemblage transits into gold-galenite-fahlore assemblage, and the contents of «high-temperature» (Bi, Te, Se, Co) and «low-temperature» (Ag, Sn, Pb) elements decrease and increase in sulfides, respectively. Each mineral type can be compared with corresponding varieties of modern black, gray, and colorless smo-

kers by mineral zoning, composition, ratios of Se, Te, Sn, and Ag in chalcopyrite. In higher Bi content of chalcopyrite, higher Te, Ni, Au content of colloform pyrite and low Fe and Co content of sphalerite, paleosmokers are closer to those of present-day island-arc basins.

Figures 13. Table 1. References 45.

Key words: chimneys of «black» smokers, LA-ISP-MS, trace elements, minerals, VMS deposits, South Urals

Введение

Современным черным курильщикам посвящены многочисленные детальные минералого-геохимические исследования (Шадлун, 1992; Butler, Nesbitt, 1999; Леин и др., 2003; Богданов и др., 2006; Tivey, 2007; Monecke et al., 2016; Maslennikov et al., 2009, 2017 и ссылки в них). Гораздо меньше информации посвящено минералогическим особенностям палеокурильщиков (Hannington et al., 1998; Масленникова, Масленников, 2007; Maslennikov et al., 2009, 2017; и другие). Находки сульфидных труб палеокурильщиков (далее – труб) в рудах колчеданных залежей Урала (Масленников, 1999, 2006; Масленникова, Масленников, 2007; Herrington et al. 1998; Maslennikov et al., 2009; 2017 и ссылки в них), Алтая (Maslennikov et al. 2017), Японии (Shimazaki, Horikoshi, 1990; Shikazono, Kusakabe, 1999), Турции (Revan et al., 2014), Кипра (Oudin, Constantinou, 1984), Калифорнии (Little et al., 1999), Аппалачей (Slack et al., 2003) подтвердили проведенные ранее аналогии между древними колчеданными месторождениями и современными гидротермальными системами черных курильщиков (Зайков, Масленников, 1987; Шадлун, 1992; Зайков, 1991). Тем не менее, трубы, например, колчеданных месторождений Урала, не вполне идентичны современным черным курильщикам как по минералогическим, так и по геохимическим признакам (Maslennikov et al., 2017). Одна из возможных причин – разница в составе рудовмещающих формаций (Масленников и др., 2010). Другая причина – разная «зрелость» рудогенерирующих гидротермальных систем (Гричук, 2000; Мозгова и др., 2005; Третьяков, 2015). Эндогенная гидротермально-метасоматическая «зрелость» отражает продолжительность гидротермального преобразования пород кровли магматического и зависит от режима вулканизма (Масленников, 2012). С эндогенной «зрелостью» коррелирует экзогенная «зрелость» – время экспозиции сульфидных построек на морском дне (Мозгова и др., 2005). С другой стороны, существенное влияние на минеральное разнообразие курильщиков оказывают локальные

вариации физико-химических параметров среды минералообразования, благодаря которым на одном гидротермальном поле одновременно формируются курильщики различного минерального состава (Бортников, 1995).

Каждая находка труб является неординарным событием, но особо интересны трубы, связанные с колчеданными месторождениями, занимающими необычную геологическую позицию. Одним из таких объектов является слабометаморфизованное медноколчеданное месторождение Юбилейное, вторая рудная залежь которого залегает на бонинитах в основании Западно-Магнитогорской островной дуги (Косарев и др., 2018). Трубы колчеданных месторождений подтипа Уральский-1 (Серавкин, 2013), хотя и упоминаются в некоторых публикациях (Целуйко и др., 2017, 2019; Maslennikov et al., 2013; 2017), но к настоящему времени еще слабо изучены.

В настоящей статье нами описаны минеральные типы труб Юбилейного месторождения, изучены особенности их минералого-геохимической зональности и проведено сравнение микроэлементного состава сульфидов с сульфидами современных черных, серых и бесцветных курильщиков гидротермальных полей быстро- и медленно-спрединговых срединно-океанических хребтов (СОХ), горячих точек и островодужных бассейнов. Особенный интерес представляет собой сравнение гидротермальных труб Юбилейного месторождения с обогащенными Bi, Te, Pb, Au и Ag трубами сульфидных построек бассейна Восточного Мануса, где отмечаются многочисленные включения теллуридов, самородного золота и минералов группы блеклых руд (Maslennikov et al., 2017).

Геологическая позиция месторождения

Юбилейное медноколчеданное месторождение расположено в Бурибайском рудном районе Южного Урала, на северо-западном продолжении Макан-Мамбетовской зоны растяжения внутри Западно-Магнитогорского пояса. Месторождение сформировалось в кальдере крупного вулкана центрально-

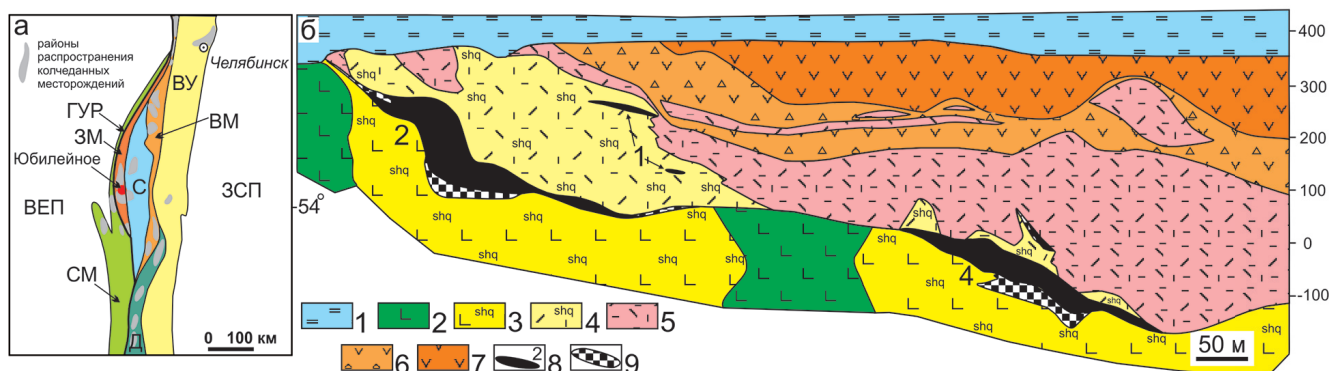


Рис. 1. Позиция Юбилейного месторождения на палеогеодинамической схеме Южного Урала по (Масленников, 1999) (а) и продольный разрез (б) по (Татарко и др., 2011ф).

ВУ – Восточно-Уральское поднятие, ВМ – Восточно-Магнитогорская дуга, ЗМ – Западно-Магнитогорская дуга, ГУР – Главный Уральский разлом, С – Сибайский междугорный бассейн, СМ – Сакмарское окраинное море, Д – Домбаровский задугорный бассейн, Т – Тагильская дуга.

1 – рыхлые кайнозойские и юрские отложения; 2 – базальты и бониниты; 3 – серицит-хлорит-кварцевые метасоматиты по основным породам; 4 – серицит-хлорит-кварцевые метасоматиты по кислым породам; 5 – лавы, вулканокластиты и субвулканические тела дацитов и риолитов; 6 – лавы и вулканокластиты андезибазальтов; 7 – андезибазальты; 8 – массивные рудные залежи и их номера; 9 – вкрапленные руды.

Fig. 1. Position of the Yubileynoe massive sulfide deposit on a paleogeodynamic scheme of the South Urals after (Maslennikov, 1999) (a) and schematic longitudinal section of the deposit (b) after unpublished report of (Tatarko et al., 2011).

ВУ – East Uralian uplift, ВМ – East Magnitogorsk island arc, ЗМ – West Magnitogorsk island arc, ГУР – Main Uralian fault, С – Sibai inter-arc basin, СМ – Sakmara marginal sea, Д – Domborovka back-arc basin, Т – Tagil island arc.

1 – Cenozoic and Jurassic loose sediments; 2 – basalts and boninites; 3 – sericite-chlorite-quartz metasomatites after mafic rocks; 4 – sericite-chlorite-quartz metasomatites after felsic rocks; 5 – lavas, volcanoclastic rocks and subvolcanic bodies of dacites and rhyolites; 6 – lavas and volcanoclastic rocks of basaltic andesites; 7 – basaltic andesites; 8 – massive ores and their numbers; 9 – disseminated ores.

го типа (Серавкин, 1986), осложнившего строение полуграбена внутридугового колчеданового рифта (Масленников, 1999). Рудные залежи залегают в позднеэмском бурибайском вулканическом комплексе (D_{1e_2} br), нижней подсвите баймак-бурибаевской свиты (D_{1ems} b-br₁), и базальтами, андезибазальтами, андезитами, дацитами, риодацитами и риолитами верхнетаналыкского комплекса (D_{2e_2} vtn). В рудовмещающей толще распространены натриевые магнезиальные базальты, бонинитобазальты, бониниты, андезибониниты, магнезиальные андезиты и андезидациты (Косарев и др., 2018).

На месторождении установлено шесть рудных залежей линзообразной формы, залегающих в кровле второй толщи, превращенной в серицит-хлорит-кварцевые метасоматиты (рис. 1). Изученная Вторая рудная залежь имеет линзообразную форму и может быть реконструирована как слабо разрушенный сульфидный холм (Масленников, 2012). Значительная часть холма сложена брекчиевыми, массивными и слоистыми серно- и медноколчеданными рудами. В рудах Второй залежи установлены трубы палеокурильщиков, биоморфные руды, сульфидные диффузеры, гидротермальные корки

и плиты (Целуйко и др., 2017, 2019; Maslennikov et al., 2017). Наибольший интерес представляют собой трубы, среди которых выделены медноколчеданные, медно-цинково-колчеданные и цинково-колчеданные разновидности (рис. 2).

Методы исследований

Нами изучены трубы, отобранные в ходе полевых работ на Юбилейном месторождении в 2011–2014 гг. В ходе исследований было описано три сульфидные трубы пирит-халькопиритового состава (124 ЛА-ИСП-МС анализа), две трубы с многочисленным сфалеритом (100 ЛА-ИСП-МС анализов) и две трубы с преобладанием сфалерита над другими минералами (81 ЛА-ИСП-МС анализ). По количеству находок в рудах месторождения преобладают сфалерит-пирит-халькопиритовые трубы. Из каждой группы была выбрана самая представительная труба и детально охарактеризована в статье. Диаграммы содержаний элементов-примесей построены по всем анализам в каждой группе.

Оптические исследования проводились на микроскопе Olympus BX51 с цифровой приставкой

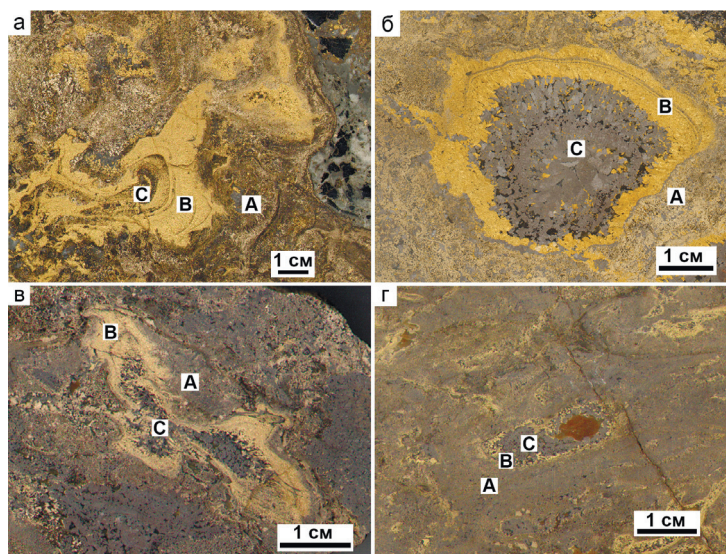


Рис. 2. Поперечные срезы сульфидных труб Юбилейного месторождения.

а – многоканальная кварц-пирит-халькопиритовая труба, обр. Юб-12-19; б – кальцит-пирит-сфалерит-халькопиритовая труба, обр. Юб-11-27; в – тальк-кальцит-сфалерит-пирит-халькопиритовая труба, Юб-11-17; г – тальк-пирит-халькопирит-сфалеритовая труба, обр. Юб-11-41.

Полированные образцы. Здесь и далее: А, В, С – оболочка, внутренняя стенка и осевой канал сульфидных труб, соответственно.

Fig. 2. Cross-sections of sulfide smoker chimneys of the Yubileynoe deposit.

а – multichannel quartz-pyrite-chalcopyrite chimney (sample Юб-12-19); б – calcite-pyrite-sphalerite-chalcopyrite chimney (sample Юб-11-27); в – talc-calcite-sphalerite-pyrite-chalcopyrite chimney (Юб-11-17); г – talc-pyrite-chalcopyrite-sphalerite chimney (Юб-11-41).

Polished samples. Hereinafter: А, В and С – outer and inner walls and axial channel of sulfide chimneys, respectively.

Olympus DP 12. Диагностика редких минералов проведена с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (ИМин УрО РАН, аналитик И.А. Блинов) и растрового электронного микроскопа РЭММА-202М (ИМин УрО РАН, аналитик В.А. Котляров). Пределы обнаружения содержаний химических элементов для всех приборов не превышают 0.2 мас. %. Воспроизводимость определений составляет от 1 до 15 отн. %.

Концентрации элементов-примесей в сульфидах определены методом лазерной масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ЛА-ИСП-МС) в университете Тасмании (г. Хобарт, Австралия, аналитики В.В. Масленников, С.П. Масленникова). Методом ЛА-ИСП-МС изучена геохимическая зональность восьми труб. Анализы выполнены с помощью лазерного микропробоотборника New Wave 213, соединенного с масс-спектрометром Agilent 7500cs. Диаметр лазерного пучка составлял 40–60 мкм, частота – 5 Гц, энергия на поверхности образца 4–5 Дж/см². Время анализа составляло 100 с, из которых 30 с занимало измерение фона. Для калибровки использовались стан-

дарты MASS-1, NIST, GSD, STDGL и др., представляющие собой смесь литий-боратного стекла и сульфидов. Подробно методика описана в работе (Danyushevsky et al., 2011).

Минерально-геохимическая зональность гидротермальных труб

Трубы изредка встречаются в положении *in situ* в кровле Второй рудной залежи. Чаще их фрагменты обнаружены в сульфидных брекчиях. Диаметр труб составляет 2–12 см, высота 5–25 см, форма в поперечном сечении – сглаженно-угловатая, овальная, удлинненно-овальная, часто вытянутая. Трубы состоят из наружной оболочки (зона А), внутренней стенки (зона В) и заполнения осевого канала (зона С). Мощность отдельных зон сильно варьирует, вплоть до полного исчезновения. В каждой зоне выделяются отдельные подзоны, связанные взаимными переходами. Распространены многоканальные трубы, в которых одна общая оболочка охватывает несколько каналов. В зависимости от минерального состава трубы можно подразделить на три типа – медно-колчеданный или пирит-халько-

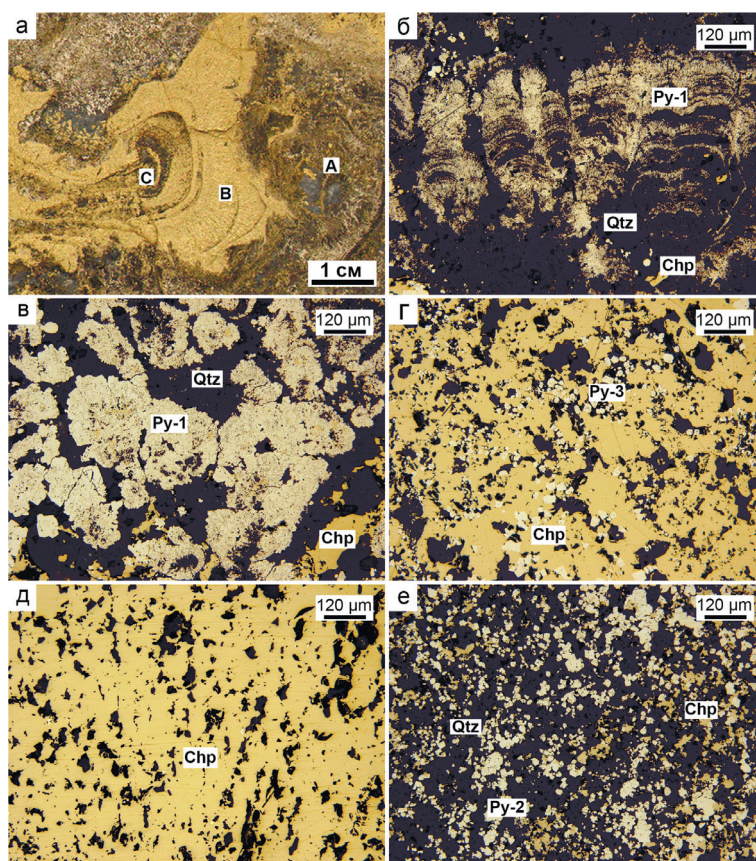


Рис. 3. Кварц-пирит-халькопиритовая труба.

а – поперечный срез; б – почки колломорфного пирита-1 во внешнем слое оболочки трубы (зона А), частично замещенные кварцем и халькопиритом; в – агрегаты тонкозернистого пирита-1, пространство между которыми выполнено кварцем и халькопиритом (зона А); г – пирит-халькопиритовый агрегат промежуточной зоны между оболочкой (зона А) и внутренней стенкой трубы (зона В); д – ориентированный крупнозернистый халькопирит внутренней стенки (зона В); е – мелкая вкрапленность пирита-2 и халькопирита в кварцевом заполнении осевого канала трубы (зона С).

Фото а – полированный образец, б–е – отраженный свет. Здесь и далее: Py-1 – колломорфный и тонкозернистый пирит, Py-2 – субгедральный пирит, Py-3 – эвгедральный пирит, Chp – халькопирит, Qtz – кварц. Обр. Юб-12-19.

Fig. 3. Quartz-pyrite-chalcopyrite chimney.

а – cross-section; б – reniform structure of colloform pyrite-1 in the outer layer of the chimney (zone A) partly replaced by quartz and chalcopyrite; в – aggregates of fine-grained pyrite-1 with quartz and chalcopyrite incrustation (zone A); г – pyrite-chalcopyrite aggregate in zone between the outer zone (zone A) and the inner wall of the chimney (zone B); д – directed coarse-grained chalcopyrite of the inner wall (zone B); е – fine impregnation of pyrite-2 and chalcopyrite in the quartz of the axial channel of chimney (zone C).

Photo a – polished sample, b–e – reflected light. Hereinafter: Py-1 – colloform and fine-grained pyrite, Py-2 – subhedral pyrite, Py-3 – euhedral pyrite, Chp – chalcopyrite, Qtz – quartz. Sample Юб-12-19.

пиритовый (рис. 2а), медно-цинково-колчеданный или пирит-сфалерит-халькопиритовый (рис. 2б, в) и цинково-колчеданный или халькопирит-пирит-сфалеритовый (рис. 2г).

Медноколчеданные трубы сложены слоями халькопирита и пирита с выполнением осевого канала пиритом, халькопиритом, кварцем, кальцитом или тальком.

Многоканальная пирит-халькопиритовая труба представляет собой несколько сросшихся суще-

ственно халькопиритовых каналов с одной оболочкой (рис. 3а). Внешний слой оболочки (подзона А1) состоит из почковидных агрегатов колломорфного пирита, частично замещенных кварцем и халькопиритом (рис. 3б). В подзонах А2 и А3 развиты агрегаты субгедрального пирита-2, а также почковидные и гроздьевидные агрегаты тонкозернистого пирита-1, инкрустированные кристаллами халькопирита (рис. 3в). Контакт оболочки и внутренней стенки сложен халькопиритом с многочисленными вклю-

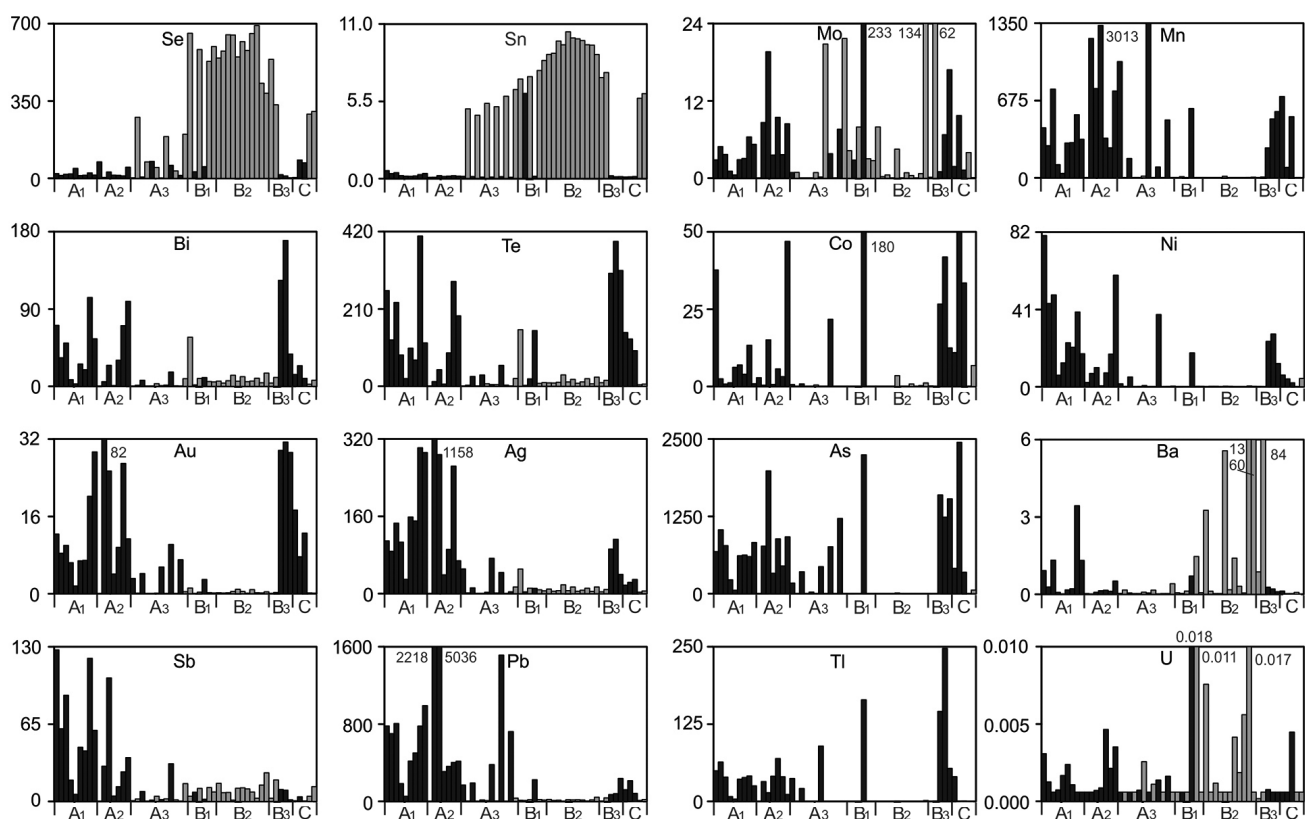


Рис. 4. Распределение химических элементов (в г/т) по зонам в кварц-пирит-халькопиритовой трубе (Юб-12-19). Каждый столбик показывает отдельный ЛА-ИСП-МС анализ в сульфиде.

Черное – пирит, темно-серое – халькопирит.

Fig. 4. Distribution of chemical elements (ppm) by zones in quartz-pyrite-chalcopyrite chimney (Юб-12-19). Each column shows separate LA-ICP-MS analysis in sulfide.

Black – pyrite, dark gray – chalcopyrite.

чениями кварца и мелкозернистого эвгедрального пирита-3 (рис. 3г). Внутренние слои зоны В имеют халькопиритовый состав (рис. 3д). Осевой канал заполнен кварцем с неравномерной вкрапленностью халькопирита и субгедрального пирита-2 (рис. 3е).

Зона А. Колломорфный пирит внешнего слоя оболочки характеризуется повышенными содержаниями Ag (87.6–302 г/т), Au (6.4–29.3 г/т), Sb (17.9–127 г/т), Te (71.3–408 г/т), Pb (185–991 г/т) (табл.). Суб- и эвгедральные разновидности пирита-2 центрального и внутреннего слоя оболочки содержат высокие концентрации Mn (262–1330 г/т), Au (4.0–82.2 г/т), Pb (309–5036 г/т), As (329–1985 г/т), Ag (39.9–1158 г/т) и Te (5.8–284 г/т). Развитые на контакте оболочки и халькопиритовой стенки эвгедральные зерна пирита-3 обеднены большинством элементов-примесей за исключением Se (29.7–76.7 г/т) и Sn (0.1–6.1 г/т). На гистограммах распределения химических элементов заметно неоднородное распределение Au, Ag, Co, Te, Bi, Pb и Mn и обогащение ими пирита внешнего и центрального

слоя оболочки (рис. 4). Относительно высокие концентрации Zn и Cu в пирите связаны с многочисленными включениями сфалерита и халькопирита. Халькопирит внутреннего слоя оболочки содержит умеренно низкие концентрации элементов-примесей за исключением Se (33.6–276 г/т), Sn (4.5–6.3 г/т), W (0.001–34.1 г/т).

Зона В. Пирит-3, образующий включения в халькопирите внутренней стенки, обогащен Co (12.3–180 г/т), As (1237–2245 г/т), Mo (1.0–233 г/т), Tl (53.4–247 г/т), Te (151–393 г/т), Bi (10.2–169 г/т) и обеднен Mn (262–604 г/т), Sb (1.4–10.1 г/т), Pb (71.3–238 г/т) по сравнению с пиритом оболочки. Халькопирит всех трех подзон отличается повышенными концентрациями Se (до 692 г/т), Ba (до 83.9 г/т) и умеренными Mo (до 134 г/т), Sn (до 10.5 г/т), Te (до 153 г/т), Bi (до 57.2 г/т). На гистограммах распределения элементов-примесей в сульфидах пирит-халькопиритовой трубы отмечаются локальные всплески содержаний Ba, Te, Bi и Mo (рис. 4).

Таблица

Средние содержания элементов-примесей в сульфидах труб Юбилейного месторождения (г/т)
Average trace element contents of sulfides from chimneys of the Yubileynoe deposit (ppm)

Кварц-пирит-халькопиритовая труба, обр. Юб-12-19													
Минерал	Зона	n	V	Mn	Fe*	Co	Ni	Cu*	Zn*	As	Se	Mo	Ag
Py-1	A1	9	1.2	388	45.1	8.4	35	0.39	0.41	672	17	3.8	169
Py-2	A2	6	5.0	782	45.2	12	17	0.52	0.36	889	20	8.9	318
Py-2	A2,3	13	3.7	596	40.6	7.3	11	0.38	0.17	544	28	4.8	158
Py-3	A3	3	0.1	3.5	46.2	1.0	0.8	0.02	0.00	9.1	60	0.9	1.3
Py-2	B	3	4.4	490	46.3	65	21	0.08	0.02	1653	21	64	64
Py-2	C	3	2.3	445	46.2	32	4.2	0.13	0.00	1068	52	4.3	23
Chp	A3	6	2.2	2.9	30.1	0.1	0.2	34.64	0.02	2.7	137	7.4	3.4
Chp	B	17	7.0	2.1	29.9	0.4	0.1	34.76	0.03	2.4	563	14	11
Chp	C	2	0.0	0.1	30.0	3.4	2.3	34.17	0.02	29	297	2.0	4.2
Минерал	Зона	n	Cd	Sn	Sb	Te	Ba	W	Au	Tl	Pb	Bi	U
Py-1	A1	9	21	0.3	70	175	0.97	2.6	13	38	645	46	0.001
Py-2	A2	6	16	0.2	35	105	0.17	3.9	27	35	1458	38	0.002
Py-2	A2,3	13	8.0	0.8	19	55	0.09	4.6	14	23	840	19	0.001
Py-3	A3	3	1.2	2.1	3.0	11	0.03	0.0	0.03	0.01	8.6	0.7	0.001
Py-2	B	3	0.2	0.2	5.7	291	0.32	0.3	23	153	154	85	0.005
Py-2	C	3	0.1	0.1	1.7	124	0.06	0.5	12	14	140	16	0.002
Chp	A3	6	4.9	5.4	4.2	6.6	0.15	5.7	0.1	0.1	9.2	2.6	0.001
Chp	B	17	8.4	8.8	10	22	10	0.05	0.4	0.2	17	11	0.003
Chp	C	2	4.9	5.9	8.4	4.8	0.04	0.01	0.1	0.1	15	4.8	0.001
Кальцит-талк-сфалерит-пирит-халькопиритовая труба, обр. Юб-11-8-5													
Минерал	Зона	n	V	Mn	Fe*	Co	Ni	Cu*	Zn*	As	Se	Mo	Ag
Py-1	A1	10	4.5	507	43.9	0.18	25	0.11	0.25	781	52	3.0	254
Py-2	A2,3	3	1.3	758	45.0	0.13	20	0.13	0.17	6731	4.1	10	62
Py-3	B	5	2.9	271	45.7	0.34	19	0.21	0.35	1652	64	18	25
Py-3	C	7	0.5	192	44.9	0.16	6.1	0.24	0.01	7306	42	14	48
Chp	B	11	4.4	5	30.6	0.01	0.2	33.75	0.03	2.9	77	1.3	44
Chp	C	2	0.04	0.1	30.5	0.00	0.0	34.68	0.02	0.5	91	0.9	50
Sph	A	8	1.8	113	1.3	0.01	0.1	0.26	64.13	344	6.9	2.5	97
Sph	C	6	0.2	195	1.9	0.00	0.0	1.18	62.58	975	30	46	437
Минерал	Зона	n	Cd	Sn	Sb	Te	Ba	W	Au	Tl	Pb	Bi	U
Py-1	A1	10	12	0.8	121	88	5.2	2.7	6.3	32	10308	3.8	0.026
Py-2	A2,3	3	6.0	0.1	21	12	0.2	1.5	25	242	3643	0.5	0.006
Py-3	B	5	17	14	8.5	23	0.0	0.08	18	10	596	2.1	0.001
Py-3	C	7	0.5	0.2	27	7.7	0.1	0.07	46	17	3315	1.0	0.001
Chp	B	11	2.0	20	2.9	3.2	0.1	0.32	0.8	0.04	190	0.13	0.002
Chp	C	2	1.4	18	2.8	8.7	0.0	0.00	0.3	0.01	16	0.04	0.002
Sph	A	8	2761	1.2	111	3.2	0.1	0.21	1.7	0.65	358	0.05	0.007
Sph	C	6	2849	2.7	968	20	0.0	0.02	28	0.43	5518	3.2	0.001
Кальцит-талк-халькопирит-пирит-сфалеритовая труба, обр. Юб-11-39													
Минерал	Зона	n	V	Mn	Fe*	Co	Ni	Cu*	Zn*	As	Se	Mo	Ag
Py-1	A1	22	8.2	556	43	0.2	41	0.3	0.1	892	14	5.9	151
Py-2	A2	16	3.2	1397	42.7	0.07	20	0.11	2.6	2066	3.0	5.6	64
Sph	A1,2	17	1.8	109	1.1	0.02	0.7	0.08	65.6	31	15	4.5	81
Sph	B-C	24	0.10	133	1.7	0.03	0.2	0.92	63.8	138	20.2	14	199
Chp	B-C	33	0.07	0.5	29.4	0.09	0.1	35.5	0.04	2.2	19	0.9	13
Минерал	Зона	n	Cd	Sn	Sb	Te	Ba	W	Au	Tl	Pb	Bi	U
Py-1	A1	22	17	0.4	147	40	41	2.7	6.3	35	2191	0.09	0.03
Py-2	A2	16	75	0.2	68	1.9	0.5	0.38	11	48	3056	0.009	0.004
Sph	A1,2	17	2825	1.5	216	1.3	10	0.03	0.6	0.6	97	0.007	0.003
Sph	B-C	24	4153	1.3	629	10.4	0.1	0.01	3.6	0.03	738	0.058	0.003
Chp	B-C	33	4.7	17	1.5	0.5	1.5	0.01	0.2	0.02	15	0.020	0.008

Примечание. n – количество анализов; * – мас. %. Типы пирита: Py-1 – коллоидный и тонкозернистый, Py-2 – субгидральный, Py-3 – эвгидральный; Chp – халькопирит; Sph – сфалерит. Зоны трубы: A – оболочка; B – внутренняя стенка; C – осевой канал.

Note. n – number of analyses; * – wt. %. Pyrite types: Py-1 – colloform and fine-grained, Py-2 – subhedra, Py-3 – euhedral; Chp – chalcopyrite; Sph – sphalerite. Chimney zones: A – outer wall; B – inner wall; C – axial channel.

Зона С. Состав микропримесей пирита, выполняющего осевой канал трубы, во многом аналогичен пириту оболочки за исключением пониженных концентраций Ag (17.6–29.3 г/т) и Pb (83.7–214.6 г/т). Халькопирит зоны С обеднен большинством из элементов-примесей кроме Se (290–302 г/т).

Медно-цинково-колчеданные трубы характеризуются наличием значительного количества сфалерита в оболочке и заполнении осевого канала.

Пирит-сфалерит-халькопиритовая труба имеет отчетливое зональное строение с заполнением ка-

нала кальцитом и тальком (рис. 5а). Внешняя зона оболочки трубы (подзона А1) состоит из слоев почковидного колломорфного пирита-1, которые к центральной подзоне А2 переходят в сноповидные агрегаты тонкозернистого пирита-1 (рис. 5б, в). На контакте со стенкой трубы (подзона А3) оболочка сложена кальцит-сфалеритовым агрегатом с густой вкрапленностью эвгедральных зерен пирита-3. Мощность всех трех подзон оболочки сильно варьирует в различных частях трубы. Халькопиритовая стенка (зона В) развита крайне неравномерно и

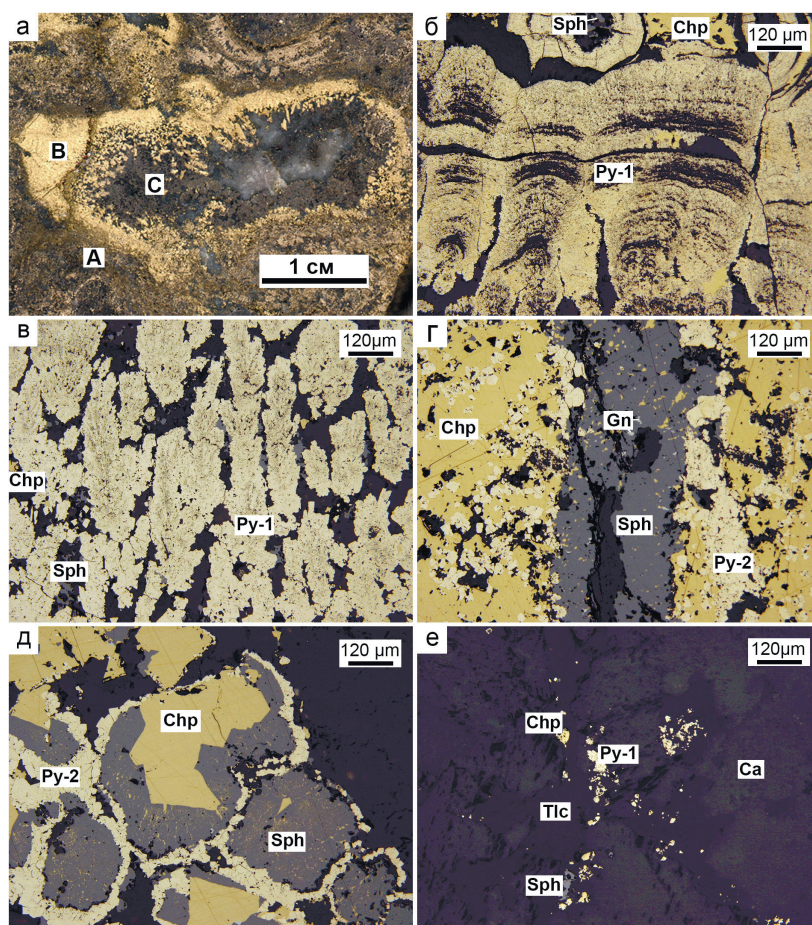


Рис. 5. Кальцит-тальк-сфалерит-пирит-халькопиритовая труба.

а – поперечный срез; б – почковидные агрегаты колломорфного пирита-1 внешней части оболочки трубы (зона А); в – сноповидные агрегаты пирита-1 (зона А); г – пирит-сфалеритовый прожилок с мелкими включениями галенита в халькопиритовом агрегате стенки трубы (зона В); д – зональные пирит-сфалерит-халькопиритовые агрегаты зоны С; е – заполнение осевого канала кальцитом и тальком с включениями пирита-1, халькопирита и сфалерита (зона С). Фото а – полированный образец, б–е – отраженный свет. Здесь и далее: Sph – сфалерит, Gn – галенит, Ca – кальцит, Tlc – тальк. Обр. Юб-11-8-5.

Fig. 5. Calcite-talc-sphalerite-pyrite-chalcopyrite chimney.

а – cross-section; б – reniform aggregates of colloform pyrite-1 in the outer zone of the chimney (zone A); в – sheaf aggregates of pyrite-1 (zone A); г – pyrite-sphalerite veins with small inclusions of galena in chalcopyrite aggregate of the chimney wall (zone B); д – zonal pyrite-sphalerite-chalcopyrite aggregates (zone C); е – axial channel with calcite and talc and inclusions of pyrite-1, chalcopyrite and sphalerite (zone C).

Photo а – polished sample, б–е – reflected light. Hereinafter: Sph – sphalerite, Gn – galena, Ca – calcite, Tlc – talc. Sample Юб-11-8-5.

участками рассечена прожилками сфалерита и пирита-2 (рис. 5г). Граница с осевым каналом кристаллы халькопирита покрыты тонкими каймами сфалерита. На контакте с осевым каналом (подзона В3) распространены почки сфалерита и зональные агрегаты, в которых на кристаллы халькопирита последовательно нарастает сфалерит и субгедральный пирит-2 (рис. 5д). Осевой канал (зона С) имеет существенно кальцитовое заполнение с вкрапленностью кристаллов сфалерита. Интерстиции между кристаллами кальцита заполнены тальком с включениями мелких сегрегаций тонкозернистого пирита-1, халькопирита и сфалерита (рис. 5е). В сульфидной трубе широко распространено низкопробное самородное золото, которое в ассоциации с галенитом образует включения в халькопирите и прожилках клейофана в сфалеритовых агрегатах.

Зона А. Почковидные агрегаты колломорфного пирита-1 обладают высокими концентрациями Mn (289–797 г/т), As (540–1127 г/т), Sb (54.8–191 г/т), Ag (92.4–432 г/т) и Au (3.2–10.5 г/т). В пирите-1

отмечаются аномальные содержания Ba (0.4–23.1 г/т), W (0.1–8.6 г/т) и Pb (1159–29613 г/т) (табл.). Дендритовидный пирит-2,3 обогащен As, Tl и Pb по сравнению с пиритом-1 и содержит сходные или меньшие концентрации других элементов-примесей. Разновидности пирита оболочки и других зон обеднены висмутом. Сфалерит оболочки содержит значительные количества Sb (46.1–353 г/т) и As (11.7–1034 г/т).

Зона В. Эвгедральные кристаллы пирита-3 в сравнении с колломорфным и дендритовидным пиритом оболочки обеднены Mn (0.2–756 г/т), Ag (17.4–30.0 г/т), Sb (0.2–21.3 г/т), Ba (0.003–0.15 г/т), W (0.007–0.13 г/т), Pb (73.7–1442 г/т). Халькопирит содержит низкие концентрации Se, Sn, Te и других химических элементов за исключением Pb (табл.).

Зона С. В субгедральном пирите-3, развитом на границе халькопиритовой стенки и осевого канала, наблюдаются аномальные содержания Pb (532–6810 г/т) и Au (13.6–62.1 г/т) на фоне невысоких концентраций Ag (9.7–110 г/т). Почковидный

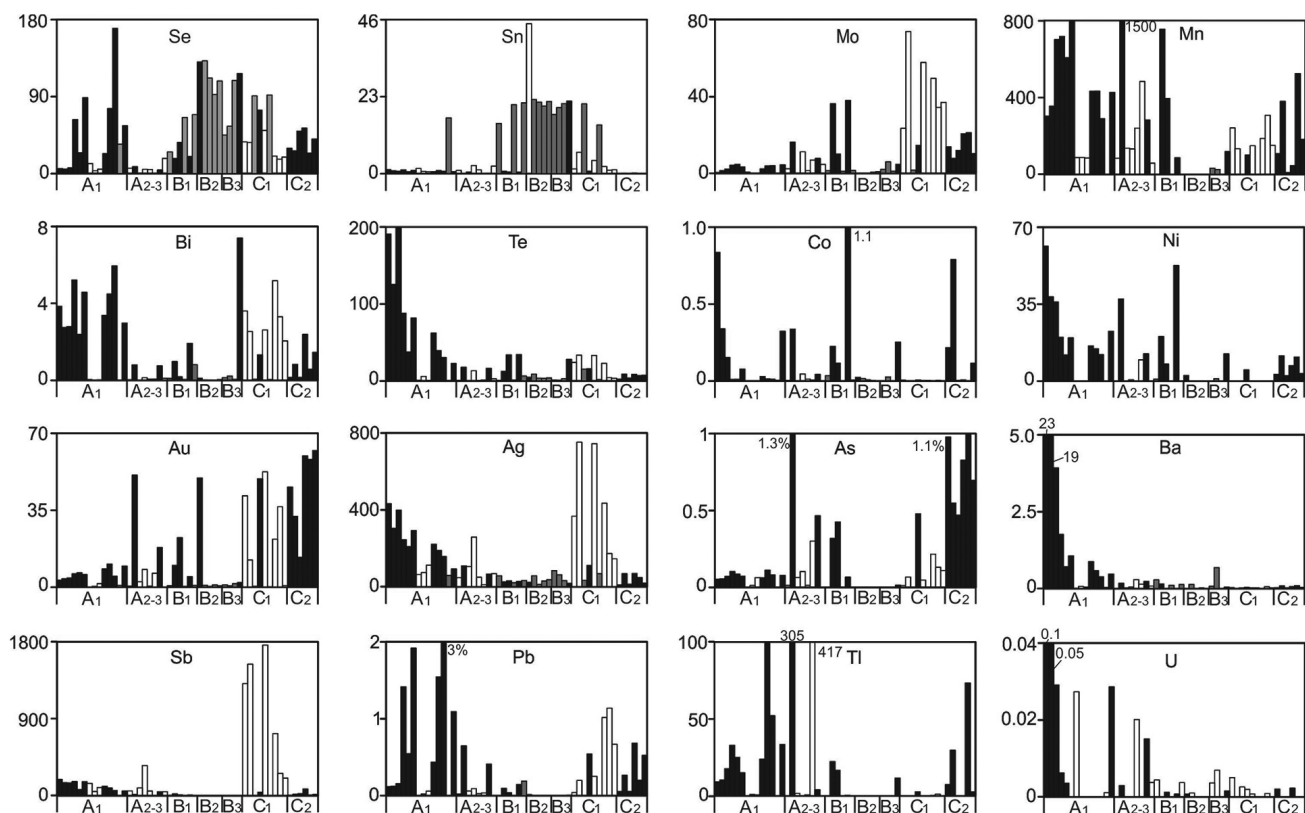


Рис. 6. Распределение химических элементов (в г/т) по зонам в кальцит-тальк-сфалерит-пирит-халькопиритовой трубе (ЮБ-11-8-5). Каждый столбик показывает отдельный ЛА-ИСП-МС анализ в сульфиде.

Черное – пирит, темно-серое – халькопирит, белое – сфалерит.

Fig. 6. Distribution of chemical elements (ppm) by zones in calcite-talc-sphalerite-pyrite-chalcopyrite chimney (IOB-11-8-5). Each column shows separate LA-ICP-MS analysis in sulfide.

Black – pyrite, dark gray – chalcopyrite, white – sphalerite.

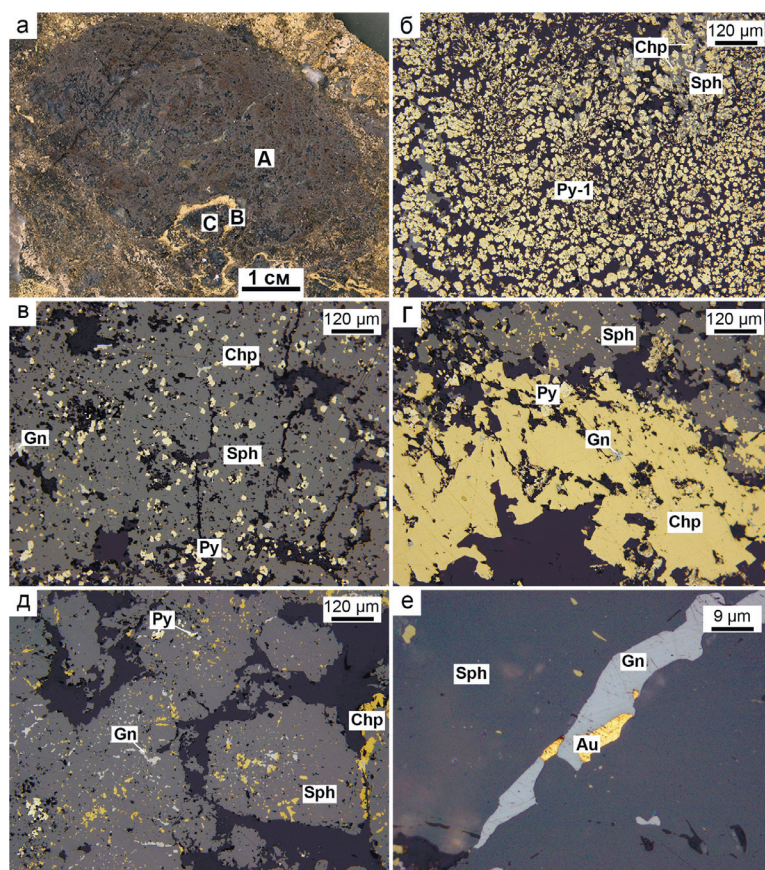


Рис. 7. Кальцит-талк-халькопирит-пирит-сфалеритовая труба.

а – поперечный срез; б – внешний тонкозернистый халькопирит-сфалерит-пиритовый слой оболочки трубы (зона А); в – агрегат сфалерита с вкрапленностью зерен пирита-2 в центральной части оболочки трубы (зона А); г – внутренняя стенка, сложенная крупнозернистым агрегатом халькопирита с включениями пирита и галенита (зона В); д – друзовый сфалерит с густой вкрапленностью халькопирита, галенита и пирита в центральной части канала трубы (зона С); е – золото-галенитовый прожилок в гидротермальном сфалерите (зона С).

Фото а – полированный образец, б–е – отраженный свет. Здесь и далее: Au – самородное золото. Обр. Юб-11-39.

Fig. 7. Calcite-talc-chalcopyrite-pyrite-sphalerite chimney.

а – cross-section; б – outer fine-grained chalcopyrite-sphalerite-pyrite zone A of the chimney; в – sphalerite aggregate with inclusions of pyrite-2 in the central part of the chimney (zone A); г – coarse-grained chalcopyrite with inclusions of pyrite and galenite in the inner wall of the chimney (zone B); д – druse sphalerite with inclusions of chalcopyrite, galena and pyrite in the central part of the chimney channel (zone C); е – gold-galena veins in hydrothermal sphalerite (zone C).

Photo а – polished sample, б–е – reflected light. Hereinafter: Au – native gold. Sample Yub-11-39.

и друзовый сфалерит-1 характеризуется повышенными содержаниями Au (0.7–52.5 г/т), Ag (145–753 г/т), Pb (405–11376 г/т), Sb (205–1763 г/т). Концентрации Mo, Bi, Sb и Ag в сфалерите снижаются от периферии к центру осевого канала (рис. 6).

Цинково-колчеданные гидротермальные трубы характеризуются незначительным количеством халькопирита и обилием сфалерита во всех зонах (рис. 7а).

Оболочка халькопирит-пирит-сфалеритовой трубы сложена мелкозернистым пирит-сфалеритовым агрегатом (зона А). Внешний слой оболочки (зона А1) сложен мелкими почками, глобулями и

дендритами тонкозернистого пирита-1, часто замещенными халькопиритом или сфалеритом (рис. 7б). Центральная и внутренняя части оболочки (зоны А2, А3) состоят из талк-кальцит-сфалеритовых агрегатов с мелкой вкрапленностью зерен пирита-2 (рис. 7в). В сфалерите распространены включения галенита, халькопирита и теннантита. Внутренняя стенка трубы (зона В) мощностью не более 1–2 мм сложена халькопиритом с включениями сфалерита, галенита и пирита (рис. 7г). Значительная часть осевого канала (зона С) заполнена агрегатами друзового и дендритовидного сфалерита с обильной вкрапленностью халькопирита, галенита и теннан-

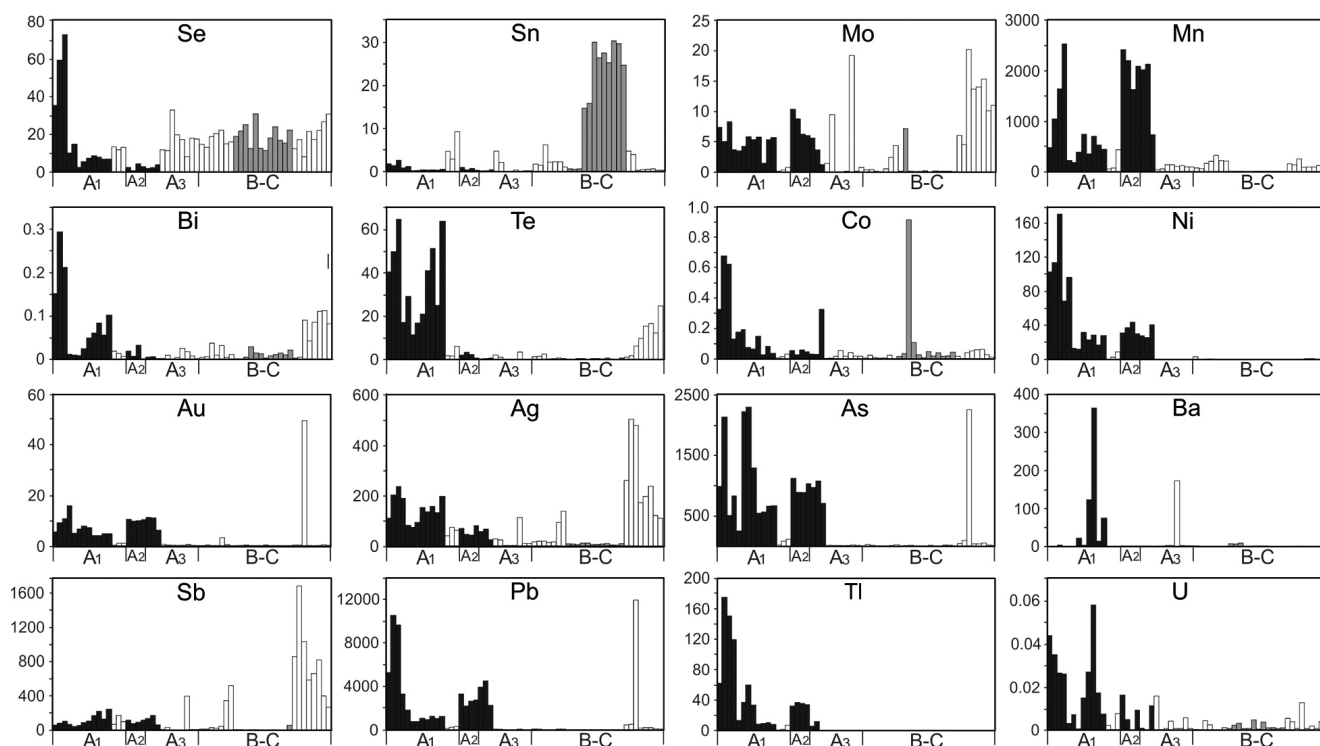


Рис. 8. Распределение химических элементов (в г/т) по зонам в кальцит-тальк-халькопирит-пирит-сфалеритовой трубе (Юб-11-39). Каждый столбик показывает отдельный ЛА-ИСП-МС анализ в сульфиде.

Черное – пирит, темно-серое – халькопирит, белое – сфалерит.

Fig. 8. Distribution of chemical elements (ppm) by zones in calcite-talc-chalcopyrite-pyrite-sphalerite chimney (Юб-11-39). Each column shows separate LA-ICP-MS analysis in sulfide.

Black – pyrite, dark gray – chalcopyrite, white – sphalerite.

тита (рис. 7д). Кристаллы сфалерита зачастую обрастают каймами субгидрального пирита-2. Агрегаты сфалерита в осевом канале цементируются кальцитом или тальком. В крустификационном сфалерите встречаются включения электрума и самородного золота в ассоциации с галенитом (рис. 7е).

Зона А. Тонкозернистые агрегаты пирита-1 обогащены широким спектром элементов-примесей: V (0.4–68.1 г/т), Ni (11.8–171 г/т), As (254–2297 г/т), Ag (44.7–237 г/т), Sb (44.1–250 г/т), Ba (0.2–365 г/т), W (0.01–17.7 г/т), Pb (705–10540 г/т). Субгидральный пирит-2 превосходит тонкозернистый пирит-1 по содержаниям Mn (390–2429 г/т) и As (705–3607 г/т), но уступает ему по содержаниям других химических элементов (табл.). Характерной чертой пирита-1 и пирита-2 оболочки цинково-колчеданных труб являются низкие содержания Co и Bi при умеренно высоких содержаниях Ni, Ag и Pb. Содержания Au в субгидральном пирите-2 (4.1–27.1 г/т) несколько выше чем в пирите-1 (2.7–15.9 г/т). На гистограммах распределения примесей заметно концентрирование Se, Bi, Te, Co, Tl, Ni, Ba во внешнем слое оболочки трубы (рис. 8). Сфалерит оболочки

за исключением Sb (0.1–1784 г/т) и Ba (0.01–173 г/т) обеднен другими элементами-примесями.

Зоны В и С. Сфалерит, составляющий стенку трубы и заполняющий осевой канал, отличается высокими содержаниями Ag (15.1–506 г/т), Sb (5.5–1687 г/т) и Pb (11.6–11950 г/т) при умеренных содержаниях As (1.0–2258 г/т), Te (0.4–37.2 г/т), Au (0.02–49.3 г/т). Содержания Mo, Ag и Sb в сфалерите возрастают от стенки трубы к центру осевого канала (рис. 8). Халькопирит обеднен большинством химических элементов.

Акцессорные минеральные ассоциации труб палеокурьщиков

Трубы Юбилейного месторождения отличаются по набору акцессорных минералов. Пирит-халькопиритовые трубы содержат микровключения теллуридов висмута Bi_2Te_3 , колорадоита HgTe , гессита Ag_2Te и штютцита Ag_5Te_3 размером до 30–50 мкм (чаще 10–15 мкм) (рис. 9а, б). Теллуриды, как правило, связаны с агрегатами халькопирита и сфалерита периферийных частей внутренних сте-

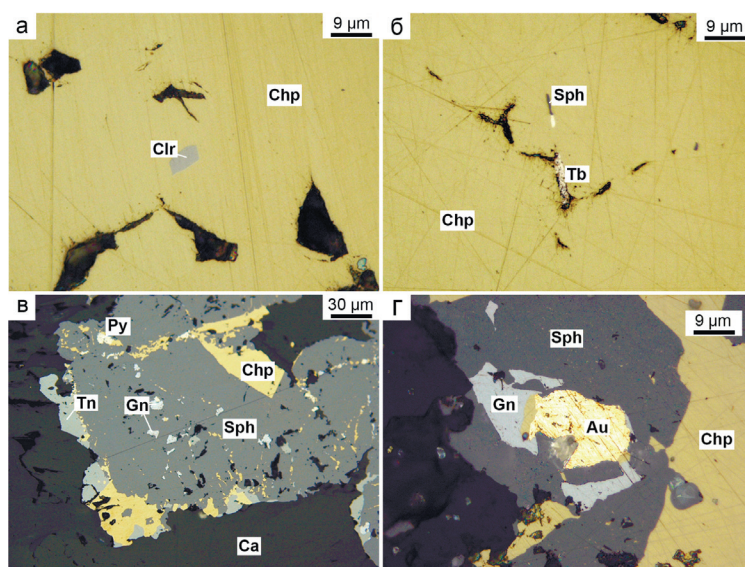


Рис. 9. Акцессорные минералы труб Юбилейного месторождения.

а – включения колорадоита в халькопирите; б – пластинки теллуrowисмутита в халькопирите; в – обрастание теннантитом галенит-халькопирит-сфалеритового агрегата; г – ассоциация самородного золота и галенита в агрегате сфалерита и халькопирита.

Отраженный свет. Clr – колорадоит, Tb – теллуrowисмутит, Tn – теннантит.

Fig. 9. Accessory minerals of chimneys of the Yubileynoe deposit.

а – inclusions of coloradoite in chalcopyrite; б – plates of tellurobismuthite in chalcopyrite; в – tennantite around galena-chalcopyrite-sphalerite aggregate; г – assemblage of native gold and galena in sphalerite-chalcopyrite aggregate.

Reflected light. Clr – coloradoite, Tb – tellurobismuthite, Tn – tennantite.

нок труб. Агрегаты колломорфного и тонкозернистого пирита-1 оболочек труб медноколчеданного типа содержат включения колорадоита HgTe. Состав теллуридов Ag и Hg близок к стехиометрическому. Теллуrowисмутит иногда содержит примесь Pb (до 2.4–6.5 мас. %).

В сфалерит-пирит-халькопиритовых и халькопирит-пирит-сфалеритовых трубах теллуридная ассоциация сменяется галенит-блекловорудной (рис. 9в). Минералы группы блеклых руд (теннантит, теннантит-тетраэдрит, тетраэдрит-теннантит) образуют включения в халькопирите и сфалерите пирит-халькопиритовых, сфалерит-пирит-халькопиритовых и халькопирит-пирит-сфалеритовых труб (Целуйко и др., 2018). Наиболее распространен теннантит, который образует включения размером до 200–300 мкм, а также тонкую эмульсионную вкрапленность в сфалерите из осевых каналов труб. В халькопиритовой крустификации труб теннантит присутствует в виде мелких включений размером до 50–100 мкм и часто обрастает кристаллы халькопирита. Теннантит-тетраэдрит и тетраэдрит-теннантит встречаются совместно с теннантитом, галенитом, самородным золотом и образует включения размером до 50 мкм в сульфидных агрегатах

в сфалерит-пирит-халькопиритовых и пирит-сфалерит-халькопиритовых трубах. Галенит в пирит-халькопиритовых трубах встречается в виде мелких (до 50–100 мкм) ксеноморфных включений в интерстициях кристаллов халькопирита. В палеокурильщиках, обогащенных сфалеритом, галенит находится в агрегатах сфалерита, где развит либо в виде секущих прожилков, либо в виде мелкой вкрапленности или обрастаний.

Мелкие включения самородного золота размером 30–50 мкм обнаружены во всех типах палеокурильщиков. Наиболее высокопробное самородное золото (Au 77.9–85.3 мас. %, Ag 14.7–21.1 мас. %) найдено в халькопирите и колломорфном пирите-1 медноколчеданных труб. Низкопробное самородное золото распространено в медно-цинково-колчеданных и цинково-колчеданных палеокурильщиках с кальцитовым (Au 73.1–78.7 мас. %, Ag 21.1–25.9 мас. %) и тальк-кальцитовым (Au 48–62.5 мас. %, Ag 34.8–46.1 мас. %, Hg 2.1–5.3 мас. %) заполнением осевого канала. Низкопробное самородное золото чаще всего ассоциирует с галенитом и блеклыми рудами в сфалерите (рис. 9г).

Обсуждение результатов

Сопоставление минералогических особенностей сульфидов труб. Сульфидные трубы современных гидротермальных построек и древних колчеданных месторождений характеризуются присутствием акцессорной минерализации, представленной сульфидами, сульфоарсенидами, сульфатами, арсенидами, оксидами, хлоридами, теллуридами, селенидами и самородными элементами (Monecke et al., 2016). Минеральный состав труб Юбилейного месторождения обладает сходными и отличительными чертами с трубами курильщиков гидротермальных полей Мирового океана, особенно с сульфидными трубами гидротермальных полей задуговых бассейнов Западной Пацифики, где обнаружены многочисленные включения минералов блеклых руд, самородного золота, теллуридов висмута и гессита (Maslennikov et al., 2017). Гидротермальное поле Пакманус находится в восточной части задугового бассейна Манус и залегает на вулканических породах, варьирующими по составу от базальтов до риолитов (Yeats et al., 2014). На поле выделены девять основных сульфидных построек, образованных гидротермальными трубами высотой 1–3 м (до 20 м), обогащенными халькопиритом, сфалеритом, золотом и серебром (Binns et al., 2007). Руды построек состоят из пирита, марказита, халькопирита, барита при меньших количествах ангидрита, сфалерита, борнита и блеклых руд (Богданов и др., 2006).

Исходя из практически полного отсутствия псевдоморфоз сажистого пирита в трубах Юбилейного месторождения по пластинчатым кристаллам пирротина, можно утверждать об отсутствии на месторождении аналогов высокотемпературных черных курильщиков (Масленникова, Масленников, 2007). В изученных трубах не обнаружены марказит и псевдоморфозы по нему, что, вероятно, свидетельствует об образовании труб из слабокислых растворов ($\text{pH} > 4.5$) и, как следствие, существенном разбавлении флюида субщелочной морской водой (Масленникова, Масленников, 2007). На это же указывает широкое распространение кальцита и талька в изученных трубах (Еремин, 1983). Сульфидные трубы современных построек, например, поля Пакманус формировались при большей кислотности ($\text{pH} 2.3\text{--}2.7$) флюидов (Богданов и др., 2006).

Важным отличием современных курильщиков от труб Юбилейного месторождения является

состав ассоциирующего самородного золота. Например, содержания Ag в самородном золоте труб гидротермального поля Пакманус составляют 1.4–4.2 мас. %. Высокопробное самородное золото характерно и для полей бассейна Лау в Тихом океане (в среднем, 2.5 мас. % Ag), поля ТАГ (в среднем, 4.4 мас. % Ag) и Семенов-2 (в среднем, 9.95 мас. % Ag) в Срединно-Атлантическом хребте (САХ) (Herzig et al., 1993; Hannington et al., 1995; Firstova et al., 2019). Низкопробное золото (до 37.5 мас. % Ag) отмечено в сфалерит-халькопиритовых трубах гидротермального поля Семенов-2 (Firstova et al., 2019). Самородное золото Юбилейного месторождения характеризуется широкими вариациями состава, зависящим от минеральной ассоциации, но, в целом, оно более низкопробное (Ag 14.7–46.1 мас. %).

В последние годы сделаны многочисленные находки теллуридов Bi, Au, Ag, Hg, Ni и Pb в сульфидных трубах гидротермальных полей СОХ и островодужных бассейнов (Леин и др., 2003; Богданов и др., 2006; Berkenbosch et al., 2012; Monecke et al., 2016; Maslennikov et al., 2017; Firstova et al., 2019). На Юбилейном месторождении теллуриды Bi, Hg и Ag связаны с пирит-халькопиритовыми трубами. Позиция теллуридов в зональности труб во многом сходна с современными аналогами: включения обнаруживаются в агрегатах халькопирита и сфалерита внутренней стенки и заполнения осевого канала.

Минеральный состав труб палеокурильщиков значительно меняется в процессе эпигенеза сульфидной постройки (Масленникова, Масленников, 2007), который проявляется в частичной перекристаллизации агрегатов колломорфного пирита и замещении их диагенетическим халькопиритом, а также трансформации изокубанита, X и Y фаз в халькопирит (Масленников, 1999, 2006). Одним из отличий в минеральном составе является отсутствие в трубах Юбилейного месторождения иорданита, аурипигмента и реальгара, обнаруженных в сульфидных постройках бассейна Восточный Манус (Maslennikov et al., 2017). На поле Пакманус широко распространен теннантит, тогда как в трубах Юбилейного минеральных разновидностей блеклых руд больше и помимо теннантита установлены также теннантит-тетраэдрит и тетраэдрит-теннантит (Целуйко и др., 2018).

Сопоставление геохимических особенностей сульфидов труб. Сравнительный анализ микроэлементного состава сульфидов труб Юбилейного месторождения выявил черты сходства и отличия

от труб современных гидротермальных полей различных геодинамических обстановок. Так, например, халькопирит по сравнению со своим аналогом на гидротермальных полях высоко- и низкосрединных районов обогащен примесями Au, Pb, Bi, Sb, W, Ba и обеднен широким спектром элементов, в которые входят Se, Tl, Co, Ni, Mo, As, Ag и U (Maslennikov et al., 2017). Относительно полей, связанных с горячими точками, халькопирит Юбилейного месторождения содержит больше Te, Bi, Pb, Sn и меньше Se, Co, Ni, Tl, As, Mn. В халькопирите сульфидных построек островодужных бассейнов (Пакманус) отмечаются аналогичные содержания Te, Bi, Pb, Au, Ag, Mo (Maslennikov et al., 2017).

Халькопирит из труб Юбилейного месторождения характеризуется широким разбросом содержаний Se, Te, Co и Sn (рис. 10а, б). Судя по содержаниям Se и Te, большая часть халькопирита из медноколчеданных и медно-цинково-колчеданных труб близка к серым курильщикам островодужных бассейнов (рис. 10а). Только в некоторых анализах медноколчеданных труб халькопирит соответствует таковому из черных курильщиков полей САХ и ВТП 9°50' с.ш. По содержаниям Se и Te цинково-колчеданные трубы занимают промежуточное положение между сульфидными диффузерами и

серыми курильщиками островодужных бассейнов. Средние содержания Se в халькопирите медно-цинково-колчеданных (265 г/т) и цинково-колчеданных труб (37.6 г/т) снижаются по сравнению с медноколчеданными трубами. Относительно невысокие содержания Se по сравнению с колчеданными месторождениями Урала, залегающими на базальтовом основании, могут быть связаны с высокой стадией зрелости магматогенно-гидротермальной системы Юбилейного месторождения (Масленников, 2012).

По содержаниям Co и Sn халькопирит медно-цинково-колчеданных и цинково-колчеданных труб сходен с халькопиритом полей островодужных бассейнов и, частично, сульфидных диффузеров рассматриваемых гидротермальных полей (рис. 10б). Сильно вытянутая область точек халькопирита медноколчеданных труб, пересекающая области значений современных курильщиков горячих точек и островных дуг, обусловлена широкими вариациями Co (0.01–41.3 г/т). Содержания Co в халькопирите труб обычно составляют 0.01–0.1 г/т, что соответствует халькопиритам серых курильщиков полей Лаки Страйк, горы Осевой, Менез Гвен и сульфидных диффузеров рассматриваемых гидротермальных полей. Стоит отметить, что хоть кристаллизационный халькопирит и не содержит мно-

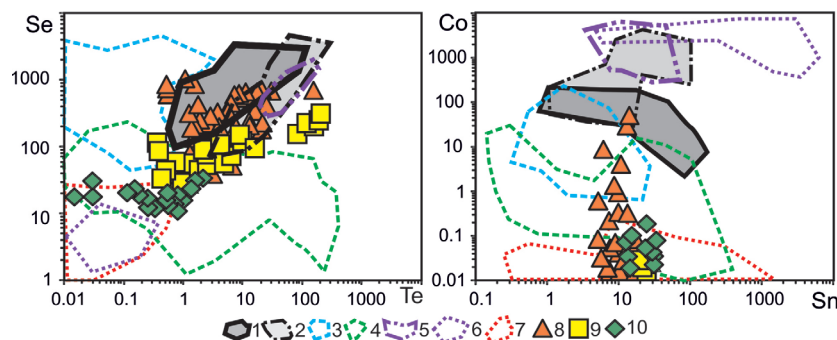


Рис. 10. Диаграммы Se–Te (а) и Co–Sn (б) для халькопирита труб Юбилейного месторождения и курильщиков современных гидротермальных полей (Maslennikov et al., 2017):

1 – черные курильщики поля ВТП 9°50' с.ш.; 2 – черные и серые курильщики полей Брокен Спур и Снейк Пит; 3 – серые курильщики полей Лаки Страйк, горы Осевая и Менез Гвен; 4 – серые и бесцветные курильщики полей Суййо, Пакманус и Сюзетта; 5 – черные курильщики поля Рейнбоу; 6 – диффузеры поля Рейнбоу; 7 – бесцветные курильщики и диффузеры рассматриваемых полей; 8–10: трубы Юбилейного месторождения: 8 – медноколчеданные; 9 – медно-цинково-колчеданные; 10 – цинковоколчеданные.

Fig. 10. Se–Te (a) and Co–Sn (b) diagrams for chalcopyrite from chimneys of the Yubileynoe deposit and smoker chimneys from modern hydrothermal fields:

1 – black smokers of EPR 9°50' N; 2 – black and gray smokers of the Broken Spur and Snake Pit fields; 3 – gray smokers of the Lucky Strike, Axial Mountain, and Menez Gwen fields; 4 – gray and clear smokers of the Suiyo, Pacmanus, and Suzette fields; 5 – black smokers of the Rainbow field; 6 – sulfide diffusers of the Rainbow field; 7 – clear smokers and diffusers of discussed fields; 8–10 – chimneys of the Yubileynoe deposit: 8 – Cu type; 9 – Cu–Zn type; 10 – Zn type.

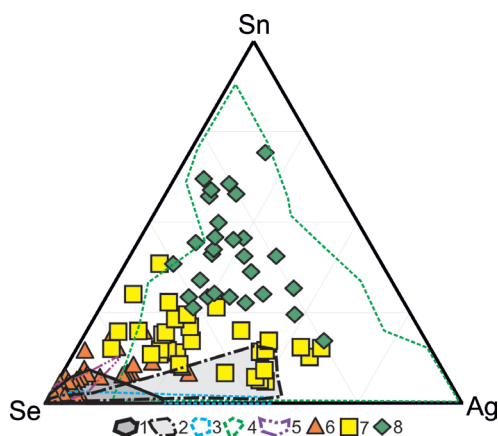


Рис. 11. Диаграмма Se–Ag–Sn для халькопирита труб Юбилейного месторождения и курильщиков современных гидротермальных полей (Maslennikov et al., 2017):

1 – черные курильщики поля ВТП 9°50' с.ш.; 2 – черные и серые курильщики полей Брокен Спур и Снейк Пит; 3 – серые курильщики полей Лаки Страйк, горы Осевая и Мenez Гвен; 4 – серые и бесцветные курильщики полей Суийо, Пакманус и Сюзетта; 5 – черные курильщики поля Рейнбоу; 6–7 – трубы Юбилейного месторождения: 6 – медноколчеданные; 7 – медно-цинково-колчеданные; 8 – цинковоколчеданные.

Fig. 11. Se–Ag–Sn diagram for chalcopyrite of chimneys of the Yubileynoe deposit and smoker chimneys of modern hydrothermal fields:

1 – black smokers of EPR 9°50' N; 2 – black and gray smokers of the Broken Spur and Snake Pit fields; 3 – gray smokers of the Lucky Strike, Axial Mountain, and Menez Gwen fields; 4 – gray and clear smokers of the Suiyo, Pacmanus, and Suzette fields; 5 – black smokers of the Rainbow field; 6–7 – chimneys of the Yubileynoe deposit: 6 – Cu type 7 – Cu–Zn type, 8 – Zn type.

го Co, он содержит зерна эвгедрального пирита-3, обогащенные Co.

Содержания Sn в халькопирите медноколчеданных труб (4.5–19.9 г/т) несколько уступают сфалеритсодержащим трубам (11.1–49.6 г/т). В целом, содержания Co и Sn в халькопирите сопоставимы с колчеданными месторождениями уральского типа (Масленников и др., 2016).

На диаграмме Se–Ag–Sn состав халькопирита труб разных типов отличается (рис. 11). Фигуративные точки медноколчеданных труб, обогащенных Se, занимают область значений курильщиков ВТП 9°50' и поля Рейнбоу. Обогащенные Se, но содержащие повышенные концентрации Sn и Ag медно-цинково-колчеданные и цинково-колчеданные трубы на диаграмме совпадают с составом сульфидов из построек островодужных бассейнов.

Колломорфный пирит-1 аккумулирует в себе как низкотемпературные (Mn, Tl, Pb, Ba), так и высокотемпературные элементы-примеси (Ag, Au, As, Sb). Аномальные содержания химических элементов в колломорфном пирите-1 связаны с включениями халькопирита (Cu), сфалерита (Zn, Cd), самородного золота (Au, Ag), галенита (Pb, Ag, Tl), теллуриовисмутита (Bi, Te), колорадоита (Hg, Te), минералов группы блеклых руд (Sb, As), барита (Ba), урансодержащих минералов (U). Содержания элементов-примесей в колломорфном пирите-1 слабо варьируют в трубах различного состава. Относительно современных аналогов колломорфный пирит-1 Юбилейного месторождения значительно обогащен Te, Bi и истощен Co, Tl, U, Mo, Mn

Содержания Tl (1.4–366 г/т) и Mn (105–2540 г/т) в колломорфном пирите-1 находятся на одном уровне с современными курильщиками (рис. 12a). Отдельное поле на диаграмме сформировано постройками островодужных бассейнов, выделяющихся по повышенным содержаниям Tl. Его главным носителем, по-видимому, является галенит, многочисленные включения которого обычно находятся в колломорфном пирите-1. Низкие концентрации Tl, вероятно, связаны с позицией месторождения на базальтовом основании и согласуются с высокой биопродуктивностью руд Юбилейного месторождения (Maslennikov et al., 2017).

Незначительный тренд на снижение концентраций Se и Te в пирите-1 прослеживается в ряду от медноколчеданных (Se 4.1–407 г/т; Te 14.7–408 г/т) к медно-цинково-колчеданным (Se 5.3–169 г/т; Te 10.7–198 г/т) и цинково-колчеданным (Se 2.7–73.1 г/т; Te 11.5–76.6 г/т) трубам. Отчетливые отличия пирита-1 по содержаниям Se от современных аналогов не наблюдаются (рис. 12б). Благодаря включениям теллуридов и, соответственно, высоким содержаниям Te, колломорфный пирит-1 Юбилейного месторождения близок к трубам гидротермального поля Пакманус (рис. 12б). Вместе с тем, обогащение колломорфного пирита-1 Te типично для колчеданных месторождений уральского типа (Масленников и др., 2016).

По данным ЛА-ИСП-МС, содержания Co (0.02–37.7 г/т) в колломорфном пирите-1 максимальны в медноколчеданных трубах. На порядки меньше Co содержится в колломорфном пирите-1 медно-цинково-колчеданных и цинково-колчеданных труб. Концентрации Ni (0.6–171 г/т) слабо варьируют в трубах различного состава. Поле фигуративных точек колломорфного пирита-1 соответствует полям

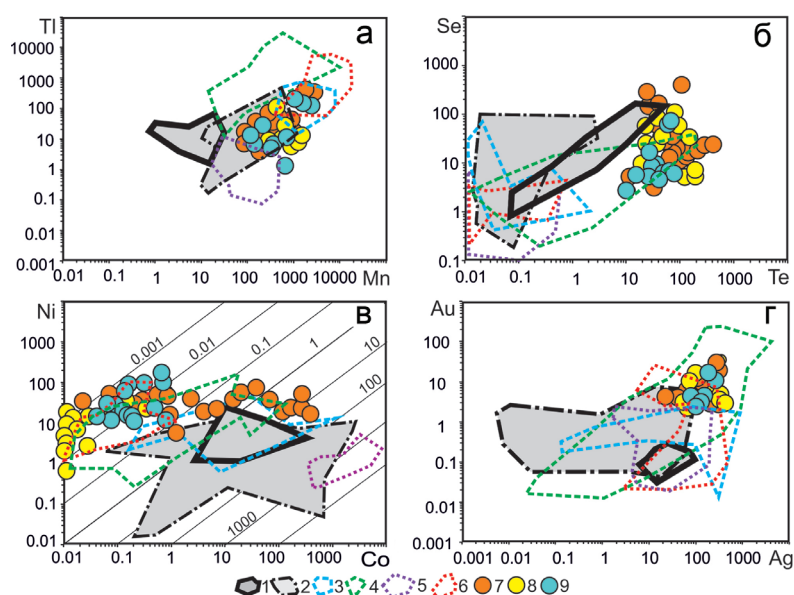


Рис. 12. Диаграммы Tl–Mn (а), Se–Te (б), Ni–Co (в) и Au–Ag (г) для колломорфного пирита труб Юбилейного месторождения и курильщиков современных гидротермальных полей (Maslennikov et al., 2017):

1 – черные курильщики поля ВТП 9°50' с.ш.; 2 – черные и серые курильщики полей Брокен Спур и Снейк Пит; 3 – серые курильщики полей Лаки Страйк, горы Осевая и Менез Гвен; 4 – серые и бесцветные курильщики полей Суийо, Пакманус и Сюзетта; 5 – диффузоры поля Рейнбоу; 6 – бесцветные курильщики и диффузоры рассматриваемых полей; 7–9 – трубы Юбилейного месторождения: 7 – медноколчеданные; 8 – медно-цинково-колчеданные; 9 – цинково-колчеданные.

Fig. 12. Tl–Mn (a), Se–Te (b), Ni–Co (v) and Au–Ag (g) diagrams for colloform pyrite of chimneys of the Yubileynoe deposit and smoker chimneys of modern hydrothermal fields:

1 – black smokers of EPR 9°50' N; 2 – black and gray smokers of the Broken Spur and Snake Pit fields; 3 – gray smokers of the Lucky Strike, Axial Mountain, and Menez Gwen fields; 4 – gray and clear smokers of the Suiyo, Pacmanus, and Suzette fields; 5 – diffusers of the Rainbow field; 6 – clear smokers and diffusers discussed fields; 7–9 – chimneys of the Yubileynoe deposit: 7 – Cu type; 8 – Cu–Zn type; 9 – Zn type.

значений островодужных серых и бесцветных курильщиков (рис. 12в).

Колломорфный пирит-1 Юбилейного месторождения демонстрирует относительно высокие содержания Au (2.3–36.4 г/т) и Ag (9.0–433 г/т). Поле пирита-1 островодужных бассейнов на диаграмме Au–Ag занимает вытянутую область, отражающую корреляцию этих элементов (рис. 12г). Содержания Au и Ag в колломорфном пирите-1 палеокурильщиков сопоставимы с обогащенными микровключениями самородного золота агрегатами пирита-1 пирит-борнит-халькопиритовыми трубами гидротермального поля Пакманус (Maslennikov et al., 2017).

Сфалерит из труб Юбилейного месторождения концентрирует в себе умеренные количества Fe (0.9–3.8 мас. %) и Cd (2408–4111 г/т). Для него характерны широкие вариации содержаний Ag (15.1–1409 г/т), Au (0.02–1069 г/т), Sb (5.6–2580 г/т), As (1.01–2162 г/т) и Pb (11.6–11377 г/т), связанные с

микровключениями самородного золота, галенита и минералов группы блеклых руд. По содержаниям ряда элементов-примесей (Se, Co, Sn, Ba, W) сфалерит уступает халькопириту. В тоже время, в сфалерите установлены аномальные концентрации Au, Ag, Pb, Sb, As. Цинково-колчеданные трубы обеднены As, Se, Mo, Bi относительно сфалерита медно-цинково-колчеданных труб. По сравнению со сфалеритом курильщиков бассейна Восточный Манус сфалерит Юбилейного месторождения обогащен Mn, Mo, Te, Au и Bi, обеднен Co, Pb и Tl и содержит сопоставимые количества Ag, As, Se и Sb. Фигуративные точки сфалерита Юбилейного месторождения на диаграмме Co–Sn образуют небольшую область с крайне низкими содержаниями Co и средними концентрациями Sn (рис. 13). Это поле соответствует значениям сульфидных диффузоров и бесцветных курильщиков современных гидротермальных полей. Низкие содержания Co в сфалерите могут указывать на относитель-

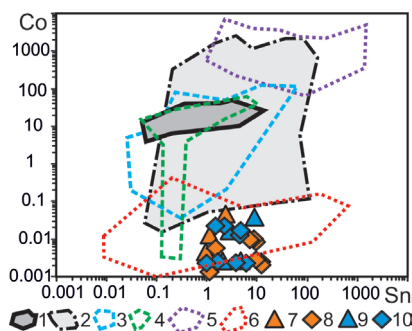


Рис. 13. Диаграммы Co–Sn для сфалерита труб Юбилейного месторождения и курильщиков современных гидротермальных полей (Maslennikov et al., 2017):

1 – черные курильщики поля ВТП 9°50' с.ш.; 2 – черные и серые курильщики полей Брокен Спур и Снейк Пит; 3 – серые курильщики полей Лаки Страйк, горы Осевая и Менез Гвен; 4 – серые и бесцветные курильщики полей Суийо, Пакманус и Сюзетта; 5 – черные курильщики поля Рейнбоу; 6 – диффузоры поля Рейнбоу; 7 – бесцветные курильщики и диффузоры рассматриваемых полей; 7–10 – трубы Юбилейного месторождения: 7, 8 – медно-цинково-колчеданные; 9, 10 – цинково-колчеданные. Треугольники – оболочка, ромбы – крустификации и заполнение канала труб.

Fig. 13. Co–Sn diagrams for sphalerite of chimneys of the Yubileynoe deposit and smoker chimneys of modern hydrothermal fields:

1 – black smokers of EPR 9°50' N; 2 – black and gray smokers of the Broken Spur and Snake Pit fields; 3 – gray smokers of the Lucky Strike, Axial Mountain, and Menez Gwen fields; 4 – gray and clear smokers of the Suiyo, Pacmanus, and Suzette fields; 5 – black smokers of the Rainbow field; 6 – sulfide diffusers of the Rainbow field; 7 – clear smokers and diffusers of discussed fields; 7–10 – chimneys of the Yubileynoe deposit: 7, 8 – Cu–Zn type; 9, 10 – Zn type. Triangles – outer wall, rhomb – crustification and filling of axial channel of chimneys.

но низкую температуру минералообразования (Maslennikov et al., 2009; Wohlgemuth-Ueberwasser et al., 2015).

Дифференциация элементов-примесей в процессе роста сульфидных труб различного состава имеет ряд отличий. Наиболее контрастная картина распределения химических элементов характерна для медноколчеданных труб (рис. 4). Пирит-халькопиритовые трубы накапливают Se, Sn, Ba и U в халькопирите внутренней стенки, остальные элементы-примеси сконцентрированы в колломорфном пирите-1 и субгедральном пирите-2. Распределение Se в минералах труб зависит от температуры минералообразования, поэтому его максимальные кон-

центрации фиксируются в центральных, наиболее высокотемпературных, частях халькопиритовых крустификаций (Maslennikov et al., 2017). В меньшей степени обогащены Se сульфиды, образующие оболочку и заполняющие осевой канал труб. В медно-цинково-колчеданных и цинково-колчеданных трубах большая часть элементов (Se, Sn, Mo, Mn, Au, Ag, Sb, Pb, U) относительно равномерно распределена в пирите, сфалерите и, в меньшей степени, халькопирите (рис. 6, 8). Содержания Se в пирите оболочки цинково-колчеданных труб иногда выше, чем в халькопирите стенки. Примеси Ni, Te, Bi и Tl сконцентрированы преимущественно в пирите во всех типах труб Юбилейного месторождения. Обогащение колломорфного пирита-1 и субгедрального пирита-2 Te может быть связано с высокой степенью окисленности флюидов, в которых Te окислялся до стадии Te^0 (Масленников и др., 2016). По сравнению с современными аналогами в трубах Юбилейного месторождения большинство элементов-примесей (за исключением Se и Cd) накапливаются именно в пирите, а не в халькопирите, борните или сфалерите.

Закключение

Проведен сравнительный минералого-геохимический анализ разновидностей труб палеокурильщиков Юбилейного месторождения. Показано, что минеральные типы труб отличаются друг от друга содержаниями элементов-примесей и геохимической зональностью. Сульфиды медно-колчеданных труб обогащены Au, Te, Bi, Se и Co, а медно-цинково-колчеданных и цинково-колчеданных труб – Ag, Sn и Pb. В медно-колчеданных трубах большинство элементов-примесей (Mn, Bi, Te, Co, Ni, Au, Ag, As, Sb, Pb, Tl) сконцентрировано в пирите и только незначительная часть в халькопирите (Se, Sn). В медно-цинково-колчеданных и цинково-колчеданных трубах пирит и сфалерит накапливают большинство элементов-примесей.

По содержаниям Te, Bi, Pb, Au, Ag и Mo сульфиды труб Юбилейного месторождения сходны с таковыми из труб современного гидротермального поля Пакманус в задуговом бассейне Манус. Сходство также подчеркивается близким набором аксессуарных минералов, таких как галенит, теннантит, самородное золото, теллуриды Bi и Ag.

Исходя из относительно невысоких содержаний Se, предполагается, что рудогенерирующая гидротермальная система Юбилейного место-

рождения достигла высокого уровня «зрелости». Вместе с тем, практически полное отсутствие на месторождении барита и низкие концентрации Тl указывают на то, что полевые шпаты в системе не разложились под воздействием флюидов. Это может свидетельствовать о меньшей, по сравнению с другими колчеданными месторождениями Урала, зрелости гидротермальной системы.

Авторы благодарны И.Ю. Мелекесцевой и Н.Р. Аюповой за помощь в работе, а также рецензенту и редакторам за ценные замечания. Работа выполнена по бюджетной программе ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № АААА-А19-119061790049-3.

Литература

- Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалеви́ч А.М., Гурвич Е.Г.** (2006) Гидротермальный рудогенез океанского дна. М., Наука. 527 с.
- Бортников Н.С.** (1995) Парагенетический анализ минеральных ассоциаций в рудах гидротермальных месторождений цветных и благородных металлов. Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М., ИГЕМ, 54 с.
- Гричук Д.В.** (2000) Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М., Научный мир, 304 с.
- Еремин Н.И.** (1983) Дифференциация вулканогенного сульфидного оруденения. М., МГУ, 256 с.
- Зайков В.В.** (1991) Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин (на примере колчеданозон Урала и Сибири). М., Наука. 206 с.
- Зайков В.В., Масленников В.В.** (1987) О придонных сульфидных постройках на колчеданных месторождениях Урала. *Доклады АН СССР*, 293(1), 181–184.
- Косарев А.М., Светов С.А., Чаженгина С.Ю., Шафигуллина Г.Т.** (2018) Бонинитовые вариолиты Бурбайского вулканического комплекса Южного Урала: минералогия, геохимия и условия образования. *Литосфера*, 18(2), 246–279.
- Леин А.Ю., Черкашев Г.А., Ульянов А.А., Ульянова Н.В., Степанова Т.В., Сагалеви́ч А.М., Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г., Торохов М.П.** (2003) Минералогия и геохимия сульфидных руд полей Логачев-2 и Рейнбоу: черты сходства и различия. *Геохимия*, (3), 304–328.
- Масленников В.В.** (1999) Седиментогенез, гальмирозиз и экология колчеданозонных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс., Геотур. 348 с.
- Масленников В.В.** (2006) Литогенез и колчеданобразование. Миасс., ИМин УрО РАН. 384 с.
- Масленников В.В.** (2012) Морфогенетические типы колчеданных залежей как отражение режима вулканизма. *Литосфера*, (5), 96–113.
- Масленников В.В., Леин А.Ю., Масленникова С.П., Богданов Ю.А.** (2010) Фанерозойские «черные курильщики» как индикаторы состава рудовмещающих комплексов. *Литосфера*, (3), 153–162.
- Масленников В.В., Мелекесцева И.Ю., Масленникова С.П., Масленникова А.В., Третьяков Г.А., Аюпова Н.Р., Сафина Н.П., Филиппова К.А., Удачин В.Н., Аминов П.Г., Целуйко А.С.** (2016) Дифференциация токсичных элементов в условиях литогенеза и техногенеза колчеданных месторождений. Екатеринбург, РИО УрО РАН. 368 с.
- Масленникова С.П., Масленников В.В.** (2007) Сульфидные трубы палеозойских «черных курильщиков» (на примере Урала). Екатеринбург УрО РАН, 2007. 317 с.
- Мозгова Н.Н., Бородаев Ю.С., Габлина И.Ф., Черкашев Г.А., Степанова Т.В.** (2005) Минеральные ассоциации как показатели степени зрелости океанских гидротермальных сульфидных построек. *Литология и полезные ископаемые*, (4), 339–367.
- Серавкин И.Б.** (1986) Вулканизм и колчеданные месторождения Южного Урала. М., Наука. 268 с.
- Серавкин И.Б.** (2013) Корреляция состава руд и рудовмещающих пород в вулканогенных колчеданных месторождениях (на примере Южного Урала). *Геология руд. месторождений*, 55(3), 238–258.
- Татарко Н.И. и др.** (2011ф) Проект на доразведку запасов по объекту «Юбилейное медно-цинково-колчеданное месторождение» на 2011–2013 гг. ОАО Башкиргеология. Сибайский филиал.
- Третьяков Г.А.** (2015) Минеральные ассоциации и поведение рудообразующих элементов при взаимодействии пород с морской водой в гидротермальных условиях. *Литосфера*, (6), 142–147.
- Целуйко А.С., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Котляров В.А.** (2018) Блеклые руды рудных фаций Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал). *Минералогия*, 4(4), 82–95.
- Целуйко А.С., Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П.** (2017) Минеральные и текстурно-структурные особенности рудных фаций Юбилейного медно-колчеданного месторождения (Южный Урал). *Известие вузов. Серия: Геология и разведка*, (4), 50–56.
- Целуйко А.С., Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Данюшевский Л.В.** (2019) Теллуридная минерализация в обломочных рудах медноколчеданного месторождения Юбилейное (Южный Урал). *Геология рудных месторождений*, 61(2), 40–71.
- Шадлун Т.Н.** (1992) Сходство и различие строения и состава современных океанических и древних колчеданных руд. М., Изд-во ЦНИГРИ и НТК «Геоэкспорт». 65–81.
- Berkenbosch H.A., de Ronde C.E.J., Gemmel J.B., McNeil A.W., Goemann K.** (2012) Mineralogy and formation of black smoker chimneys from Brothers

submarine volcano, Kermadec arc. *Economic Geology*, **107**, 1613–1633.

Binns R.A., Barriga F.J.A.S., Miller D.J. (2007) Leg 193 synthesis: Anatomy of an active felsic-hosted hydrothermal system, eastern Manus basin, Papua New Guinea. *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, **193**, 1–71.

Butler I.B., Nesbitt R.W. (1999) Trace element distributions in the chalcopyrite wall of black smoker chimney: insights from laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **167**(3), 335–345.

Danyushevsky L., Robinson P., Gilbert S., Norman M.D., Large R.R., McGoldric P.J., Shelley M. (2011) Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: Standard development and consideration of matrix effect. *Geochim. Explor. Environm. Anal.*, **11**(1), 51–60.

Firstova A., Stepanova T., Sukhanova A., Cherkashov G., Poroshina I. (2019) Au and Te minerals in seafloor massive sulphides from Semenov-2 hydrothermal field, Mid-Atlantic ridge. *Minerals*, **9**, 294.

Hannington M.D., Galley A.G., Herzig P.M., Petersen S. (1998) Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits // In: *TAG: Drilling an Active Hydrothermal System on a Sediment-Free Slow-Spreading Ridge* (eds. P.M. Herzig et al.) // Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results, 1998. Vol. 158. P. 389–415.

Hannington M.D., Jonasson I.R., Herzig P.M., Petersen S. (1995) Physical, chemical processes of sea floor mineralization at midocean ridges // In: *Seafloor hydrothermal systems: physical, chemical, biological and geological interactions* / Ed. S.E. Humphris et al. Geophys. Monograph., Washington, DC, Am. Geophys. Union, **91**, 115–157.

Herrington R.J., Maslennikov V.V., Spiro B., Zaykov V.V., Little C.T. (1998) Ancient vent chimneys structures in the Silurian massive sulphides of the Urals. *Modern Ocean Floor Proc. Geol. Rec.*, **148**, 241–257.

Herzig P.M., Hannington M.D., Fouquet Y., Stackelberg U., Petersen S. (1993) 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*, **88**(8), 2182–2209.

Little C.T.S., Herrington R.J., Haymon R.M., Danelian T. (1999) Early Jurassic hydrothermal vent community from the Franciscan Complex, San Rafael Mountains, California. *Geology*, **27**(2), 167–170.

Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. (2009) Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian YamanKasy VHMS (the Southern Urals, Russia) using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Economic Geology*, **104**(8), 1111–1141.

Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V., Herrington R.J., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Lein A.T., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Tessalina S.G. (2017) Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers. *Ore Geology Reviews*, **85**, 64–106.

Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevskiy L.V., Herrington R.J., Stanley C.J. (2013) Tellurium-bearing minerals in zoned sulfide chimneys from CuZn massive sulfide deposits of the Urals, Russia. *Mineralogy and Petrology*, **107**(1), 67–99.

Monecke T., Petersen S., Hannington M.D., Grant H., Samson I.M. (2016) The minor element endowment of modern sea-floor massive sulfides and comparison with deposits hosted in ancient volcanic successions. *Economic Geology*, **18**(8), 245–306.

Oudin E., Constantinou G. (1984) Black smoker chimney fragments in Cyprus sulphide deposits. *Nature*, **308**, 349–353.

Revan M.K., Genc Yu., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. (2014) Mineralogy and trace-element geochemistry of sulfide minerals in hydrothermal chimneys from the Upper-Cretaceous VMS deposits of the eastern Pontide orogenic belt (NE Turkey). *Ore Geology Reviews*, **63**, 129–149.

Shikazono N., Kusakabe M. (1999) Mineralogical characteristics and formation mechanism of sulfate-sulfide chimneys from Kuroko area, Mariana trough and Mid-Ocean ridges. *Resource Geology Special Issue*, **20**, 1–11.

Shimazaki H., Horikoshi E. (1990) Black ore chimney from the Hanaoka Kuroko deposits, Japan. *Mining Geology*, **40**(5), 313–321.

Slack J.F., Foote M.P., Flohr J.H. (2003) Exhalative and subseafloor replacement processes in formation of the Bald Mountain massive sulfide deposits, northern Main. *Economic Geology Monographs*, **11**, 513–547.

Tivey M.K. (2007) Generation of Seafloor Hydrothermal Vent Fluids and Associated Mineral Deposits. *Oceanography*, **20**(1), 50–65.

Wohlgemuth-Ueberwasser C.C., Vijojoen F., Petersen S., Vorster C. (2015) Distribution and solubility limits of trace elements in hydrothermal black smoker sulfides: An in-situ LA-ICP-MS study. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **159**, 16–41.

Yets C.J., Parr J.M., Binns R.A., Gemmell J.B., Scott S.D. (2014) The SuSu Knolls hydrothermal field, eastern Manus basin, Papua New Guinea: An actively forming submarine high-sulfidation copper-gold system. *Economic Geology*, **109**, 2207–2226.

References

- Berkenbosch H.A., de Ronde C.E.J., Gemmel J.B., McNeil A.W., Goemann K.** (2012) Mineralogy and formation of black smoker chimneys from Brothers submarine volcano, Kermadec arc. *Economic Geology*, **107**, 1613–1633.
- Binns R.A., Barriga F.J.A.S., Miller D.J.** (2007) Leg 193 synthesis: Anatomy of an active felsic-hosted hydrothermal system, eastern Manus basin, Papua New Guinea. *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, **193**, 1–71.
- Bogdanov Yu.A., Lisitsyn A.P., Sagalevich A.M., Gurvich E.G.** (2006) [Hydrothermal ore genesis of the seafloor]. Moscow, Nauka. 527 p. (in Russian)
- Bortnikov N.S.** (1995) [Paragenetic analysis of mineral associations in ores of hydrothermal deposits of nonferrous and noble metals]. Abstract of Doctor of Science thesis. Moscow, IGM, 54 p.
- Butler I.B., Nesbitt R.W.** (1999) Trace element distributions in the chalcopyrite wall of black smoker chimney: insights from laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **167**(3), 335–345.
- Danyushevsky L., Robinson P., Gilbert S., Norman M.D., Large R.R., McGoldric P.J., Shelley M.** (2011) Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: Standard development and consideration of matrix effect. *Geochim. Explor. Environm. Anal.*, **11**(1), 51–60.
- Eremín N.I.** (1983) [Differentiation of volcanogenic sulfide mineralization]. Moscow, MGU, 256 p. (in Russian)
- Firstova A., Stepanova T., Sukhanova A., Cherkashov G., Poroshina I.** (2019) Au and Te minerals in seafloor massive sulphides from Semenov-2 hydrothermal field, Mid-Atlantic ridge. *Minerals*, **9**, 294.
- Grichuk D.V.** (2000) [Thermodynamic models of submarine hydrothermal systems]. Moscow, Nauchnyy mir, 304 p. (in Russian)
- Hannington M.D., Galley A.G., Herzig P.M., Petersen S.** (1998) Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits // In: *TAG: Drilling an Active Hydrothermal System on a Sediment-Free Slow-Spreading Ridge* (eds. P.M. Herzig et al.) // Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results, 1998. Vol. 158. P. 389–415.
- Hannington M.D., Jonasson I.R., Herzig P.M., Petersen S.** (1995) Physical, chemical processes of sea floor mineralization at midocean ridges // In: *Seafloor hydrothermal systems: physical, chemical, biological and geological interactions* / Ed. S.E. Humphris et al. Geophys. Monograph., Washington, DC, Am. Geophys. Union, **91**, 115–157.
- Herrington R.J., Maslennikov V.V., Spiro B., Zaykov V.V., Little C.T.** (1998) Ancient vent chimneys structures in the Silurian massive sulphides of the Urals. *Modern Ocean Floor Proc. Geol. Rec.*, **148**, 241–257.
- Herzig P.M., Hannington M.D., Fouquet Y., Stackelberg U., Petersen S.** (1993) 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*, **88**(8), 2182–2209.
- Kosarev A.M., Svetov S.A., Chazhengina S.Yu., Shafigullina G.T.** (2018) [Boninitic variolites of the Buribay volcanic complex the Southern Urals: mineralogy, geochemistry and formation conditions]. *Litosfera [Litosfera]*, **18**, 246–279. (in Russian)
- Lein A.Yu., Cherkashev G.A., Ulyanov A.A., Ulyanova N.V., Stepanova T.V., Sagalevich A.M., Bogdanov Yu.A., Gurvich E.G., Torokhov M.P.** (2003) Mineralogy and geochemistry of sulfide ores from the Logachev-2 and Rainbow fields: Similar and distinctive features. *Geochemistry International*, **41**(3), 271–294.
- Little C.T.S., Herrington R.J., Haymon R.M., Danelian T.** (1999) Early Jurassic hydrothermal vent community from the Franciscan Complex, San Rafael Mountains, California. *Geology*, **27**(2), 167–170.
- Maslennikov V.V.** (1999) [Sedimentogenesis, halmyrolysis and ecology of massive sulfide paleohydrothermal fields]. Miass, Geotur, 348 p. (in Russian)
- Maslennikov V.V.** (2006). [Lithogenesis and massive sulfide deposits formation]. Miass, Institute of Mineralogy, IMin UrO RAN, 348 p. (in Russian)
- Maslennikov V.V.** (2012) [Morphogenetic types of massive sulfide deposits as a reflection of volcanic regimes]. *Litosfera [Litosfera]*, (5), 96–113. (in Russian)
- Maslennikov V.V., Lein A.Yu., Maslennikova S.P., Bogdanov Yu.A.** (2010) Phanerozoic «black smokers» as indicators of the composition of ore-hosting complexes. *Litosfera [Lithosphere]*, (3), 153–162. (in Russian)
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V.** (2009) Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian YamanKasy VHMS (the Southern Urals, Russia) using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Economic Geology*, **104**(8), 1111–1141.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevskiy L.V., Herrington R.J., Stanley C.J.** (2013) Tellurium-bearing minerals in zoned sulfide chimneys from CuZn massive sulfide deposits of the Urals, Russia. *Mineralogy and Petrology*, **107**(1), 67–99.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V., Herrington R.J., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Lein A.T., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Tessalina S.G.** (2017) Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers. *Ore Geology Reviews*, **85**, 64–106.
- Maslennikov V.V., Melekestseva I.Yu., Maslennikova S.P., Maslennikova A.V., Tret'yakov G.A., Ayupova N.R., Safina N.P., Filippova K.A., Udachin V.N., Aminov P.G., Tseluyko A.S.** (2016). [Differentiation of toxic

elements during lithogenesis and technogenesis of massive sulfide deposits]. Yekaterinburg, RIO UrO RAN 368 p. (in Russian)

Maslennikova S.P., Maslennikov V.V. (2007) [Paleozoic «black smoker» sulfide chimneys]. Yekaterinburg, UrO RAN, 312 p. (in Russian)

Monecke T., Petersen S., Hannington M.D., Grant H., Samson I.M. (2016) The minor element endowment of modern sea-floor massive sulfides and comparison with deposits hosted in ancient volcanic successions. *Economic Geology*, **118**(8), 245–306.

Mozgova N.N., Borodaev Yu.S., Gablina I.F., Cherkashev G.A., Stepanova T.V. (2005) Mineral assemblages as indicators of the maturity of oceanic hydrothermal sulfide mounds. *Lithology and Mineral Resources*, **40**(4), 293–319.

Oudin E., Constantinou G. (1984) Black smoker chimney fragments in Cyprus sulphide deposits. *Nature*, **308**, 349–353.

Revan M.K., Genc Yu., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. (2014) Mineralogy and trace-element geochemistry of sulfide minerals in hydrothermal chimneys from the Upper-Cretaceous VMS deposits of the eastern Pontide orogenic belt (NE Turkey). *Ore Geology Reviews*, **63**, 129–149.

Seravkin I.B. (1986) [Volcanism and VMS deposits of the South Urals]. Moscow, Nauka, 268 p. (in Russian)

Seravkin I.B. (2013) Correlation between composition of ore and host rocks in volcanogenic massive sulfide deposits of Southern Urals. *Geology of Ore deposits*, **55**(3), 207–244.

Shadlun T.N. (1992) [Similarity and difference of structure and composition of modern oceanic and ancient massive sulfide ores]. Moscow, TSNIGRI i NTC «Geoexpert», 65–81. (in Russian)

Shikazono N., Kusakabe M. (1999) Mineralogical characteristics and formation mechanism of sulfate-sulfide chimneys from Kuroko area, Mariana trough and Mid-Ocean ridges. *Resource Geology Special Issue*, **20**, 1–11.

Shimazaki H., Horikoshi E. (1990) Black ore chimney from the Hanaoka Kuroko deposits, Japan. *Mining Geology*, **40**(5), 313–321.

Slack J.F., Foose M.P., Flohr J.H. (2003) Exhalative and subseafloor replacement processes in formation of the Bald Mountain massive sulfide deposits, northern Main. *Economic Geology Monographs*, **11**, 513–547.

Tatarko N.I. et al. (2011f) [Project for additional exploration of reserves on the object «Yubileynoe copper-zinc VMS deposit» for 2011–2013]. Sibai branch of Bashkirgeologia.

Tivey M.K. (2007) Generation of Seafloor Hydrothermal Vent Fluids and Associated Mineral Deposits. *Oceanography*, **20**(1), 50–65.

Tret'yakov G.A. (2015) [Mineral assemblages and behavior of ore-forming elements at rock-seawater

interaction in hydrothermal conditions]. *Litosfera [Litosphere]*, (6), 142–147. (in Russian)

Tseluyko A.S., Ayupova N.R., Maslennikova S.P., Kotlyarov V.A. (2018) [Fahlores of ore facies of Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **4**(4), 82–95. (in Russian)

Tseluyko A.S., Maslennikov V.V., Aupova N.R., Maslennikova S.P. (2017) [Mineral and textural-structural features of the ore facies of Yubileynoe massive sulfide deposit (the Southern Urals)]. *Izvestie vuzov. Seriya Geologiya i Razvedka [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]*. (4), 50–56. (in Russian)

Tseluyko A.S., Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Maslennikova S.P., Danyushevsky L.V. (2019) Tellurium-bearing mineralization in clastic ores at the Yubileynoe copper massive sulfide deposit (Southern Urals). *Geology of Ore Deposits*, **61**(2), 133–161.

Wohlgemuth-Ueberwasser C.C., Vijoer F., Petersen S., Vorster C. (2015) Distribution and solubility limits of trace elements in hydrothermal black smoker sulfides: An in-situ LA-ICP-MS study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **159**, 16–41.

Yets C.J., Parr J.M., Binns R.A., Gemmell J.B., Scott S.D. (2014) The SuSu Knolls hydrothermal field, eastern Manus basin, Papua New Guinea: An actively forming submarine high-sulfidation copper-gold system. *Economic Geology*, **109**, 2207–2226.

Zaykov V.V. (1991) [Volcanism and sulfide mounds of paleoceanic margins: on example of massive sulfide bearing zones of the Urals and Siberia]. Moscow, Nauka, 206 p. (in Russian)

Zaykov V.V., Maslennikov V.V. (1987) [Seafloor sulfide mounds of massive sulfide deposits of the Urals]. *Doklady Akademii Nauk SSSR [Reports Academy of Sciences USSR]*, **293**(1), 181–184. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2019 г.