

УДК. 549.355(235.85)

**БЛЁКЛЫЕ РУДЫ В ПАЛЕОЗОЙСКИХ «КУРИЛЬЩИКАХ»
ИЗ КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА И РУДНОГО АЛТАЯ**

**В.В. Масленников¹, С.П. Масленникова¹, Г.А. Третьяков¹, А.С. Целуйко^{1,2}, В.А. Котляров¹,
Ю.Д. Крайнев¹, Е.И. Чурин¹, Р.Е. Херрингтон³**

¹Институт минералогии УрО РАН, 456317, Челябинская обл., Миасс, mas@mineralogy.ru

²Южно-Уральский государственный университет, Челябинская область, Челябинск

³Музей Естественной Истории, Лондон

**FAHLORES IN PALEOZOIC VENT CHIMNEYS FROM THE URALS
AND RUDNY ALTAI VOLCANOGENIC MASSIVE SULFIDE DEPOSITS**

**V.V. Maslennikov¹, S.P. Maslennikova¹, G.A. Tret'yakov¹, A.S. Tseluyko^{1,2}, V.A. Kotlyarov¹,
YU. D. Kraynev¹, E.I. Churin¹, R.J. Herrington³**

¹Institute of Mineralogy UB of RAS, 456317, Chelyabinsk district., Miass, mas@mineralogy.ru

²South Ural State University, Chelyabinsk district, Chelyabinsk

³Natural History Museum, London

В среднетемпературных зонах сульфидных труб палеозойских «курильщиков» из палеозойских колчеданных месторождений Урала (Юбилейное, Яман-Касы, Валенторское, Молодёжное, Октябрьское, Узельга-1, Узельга-4, Александринское) и Рудного Алтая (Николаевское, Артемьевское, Зареченское) установлены теннантит, тетраэдрит-теннантит, тетраэдрит и их Ag-, Bi-, Hg-, Te-содержащие разновидности, включая неизвестный в природе конечный член ряда теннантит-голдфилдит. Показано, что железистость (Fe/(Fe+Zn)) блёклых руд уменьшается по мере увеличения в подрудном разрезе доли кислых вулканитов по отношению к базальтам или чёрным сланцам в ряду от медно-цинково-колчеданных месторождений к барит-колчеданно-полиметаллическим. В этом же направлении увеличивается сурьмянистость (Sb/(As+Bi+Te+Sb)) блёклых руд. Предполагается, что состав блёклых руд в «палеокурильщиках» зависит не только от состава вмещающих пород, но и от «зрелости» гидротермальных систем, что подтверждается результатами физико-химического моделирования поведения Fe, Cu, As, Sb, Zn в гидротермальных рециклинговых системах морская вода/базальт и морская вода/осадок.

Илл. 13. Табл. 3. Библ. 62.

Ключевые слова: блёклые руды, палеозойские чёрные курильщики, Урал, Рудный Алтай, вулканогенные колчеданные месторождения.

Tennantite, tetrahedrite-tennantite, tetrahedrite and their Ag-, Bi-, Hg-, and Te-containing fahlore varieties including pure end-member of goldfieldite occur in mid-temperature galena-sphalerite, quartz-marcasite and quartz-chalcopyrite zones of vent chimneys from the Urals (Yubileynoye, Yaman-Kasy, Valentorskoye, Molodezhnoye, Oktyabrskoye, Uzelga-1, Uzelga-4, and Alexandrinskoye) and Rudny Altai (Artemyevskoye, Nikolaevskoye, Zarechenskoye) Paleozoic volcanogenic massive sulphide deposits. The composition of fahlores decrease in Fe/(Fe+Zn) and, commonly, in As/(As+Sb)) while portion of acid volcanic rocks is expanded in relation to basalts or black shales in the range from Cu-Zn to Pb-Zn-Ba-Cu volcanogenic massive sulfide deposits. In this range, the consistent pertain is interpreted in terms of increasing in pH and state of solution oxidation due to most efficient seawater interaction with hydrothermal fluid and acid volcanic host rocks. The dependence of fahlores composition from host rock composition (basalts or sediments) and maturity of the hydrothermal systems are verified by physical-chemical simulation.

Figures 13. Tables 3. References 62.

Key words: fahlores, Paleozoic black smokers, Ural, Rudny Altai, volcanogenic massive sulphide deposits.

Введение

В многогранной истории изучения блёклых руд делались неоднократные попытки установить зависимость их состава от состава рудовмещающих формаций, рудно-формационных типов месторождений и физико-химических условий золоторудного минералообразования (Бортников, Некрасов, 1987; Моралев и др., 1988; Ненашева, 2009; Филимонов, 2009; Спиридонов и др., 2013; Spiridonov et al., 2005). Связь состава блёклых руд с определёнными рудно-формационными типами колчеданных месторождений устанавливается менее отчётливо (Цепин и др., 1978; Мозгова, Цепин, 1983; Еремин, 1983; Бресковска и др., 1984; Спиридонов, 1987; Бахтина и др., 1991; Филимонов, 2009; Eremin et al., 2007). Наиболее удачным примером является выявление связи тетраэдритов с полиметаллическими месторождениями, а теннантитов – с медно-колчеданными (Радкевич, 1940). Причины таких различий не рассмотрены. Мышьяковистая специализация при резком преобладании цинка над железом выявлена для блёклых руд колчеданных месторождений Урала. При этом обращалось внимание, что повышенная «цинкистость» блёклых руд находится в противоречии с формированием их «в высокожелезистой» среде, богатой пиритом и халькопиритом (Цепин и др., 1978). Оказалось, что разнообразие вариаций составов блёклых руд колчеданных месторождений гораздо шире, и выявленные региональные зависимости по мере изучения минералогии колчеданных руд, становятся все менее отчётливыми (Пшеничный и др., 1998). Значительные вариации составов блёклых руд во многом связаны с тем, что в выборки попадают блёклые руды, входящие в различные минеральные ассоциации и рудные фации, сформированные при разных физико-химических условиях. Более корректным было бы сравнение блёклых руд, входящих в состав близких по происхождению рудных фаций или микрофаций, применительно к различным рудно-формационным типам колчеданных месторождений.

Удобным материалом для такого сравнения являются гидротермальные сульфидные трубы «палеокурильщиков», обнаруженные авторами в последние годы на нескольких слабометаморфизованных колчеданных месторождениях Урала, Рудного Алтая, Понтида и Хокуроко (Масленников и др., 2010; Maslennikov et al., 2013). Многие трубы нередко содержат сингенетичные включения блёклых руд, характеризуются хорошей сохранностью тонких

текстур и структур, позволяющей сопоставлять их с современными чёрными и серыми курильщиками (Масленников, 1999, 2006; Масленникова, Масленников, 2007; Herrington et al, 1998; Maslennikov et al., 2009, 2013).

К настоящему времени авторами выполнено более 500 анализов блёклых руд из сульфидных труб колчеданных месторождений Урала и Рудного Алтая. Это позволяет статистически сопоставить составы блёклых руд «палеокурильщиков» применительно к различным типам колчеданных месторождений и получить новые данные об условиях их формирования.

Методы исследований

Анализы выполнялись с помощью рентгеновского микроанализатора JEOL-733, оснащённого волновой приставкой (Институт минералогии УрО РАН): ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 20 нА. Стандартными образцами служили CuFeS_2 , ZnS , Bi_2Te_3 , HgS , Sb_2S_3 , Cu_{Ka} , Zn_{Ka} , Fe_{Ka} (чистые металлы), S_{Ka} (FeS_2), Sb_{La} (Cu_3SbS_3), As_{Ka} (GaAs). Предварительное определение спектра химических элементов и дополнительные анализы мелких зёрен получены с помощью модернизированного электронного микроскопа РЭММА-2002М с энергодисперсионной приставкой (Институт минералогии УрО РАН). Контрольные анализы выполнены на волновых микроанализаторах JEOL JXA 8900RL (Фрайбергская горная Академия), Camebax SX-50 (Музей Естественной Истории, Лондон) при аналогичных стандартных условиях. Определению химического состава предшествовало определение неоднородности зёрен в отражённых электронах или на основе анализа распределения химических элементов. Для сравнительного анализа блёклых руд использованы три известных модуля, рассчитываемые по формульным коэффициентам: железистость – $\text{Fe}^* = 100\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Zn})$, сурьмянистость – $\text{Sb}^* = 100\text{Sb}/(\text{Sb}+\text{As}+\text{Te}+\text{Bi})$ и формальная медистость – $\text{Cu}^* = 100(\text{Cu}-10)/(\text{Fe}+\text{Zn})$ (Спиридонов, 1987).

Геологическая позиция и состав «палеокурильщиков»

Медно-цинково-колчеданные месторождения Урала локализуются в яшмоносных риолит-базальтовых вулканитах энсиматических островных дуг (Зайков, 2006; Пучков, 2010; Серавкин, 2010;

Herrington et al., 2005). Колчеданно-полиметаллические месторождения Рудного Алтая залегают среди вулканитов черносланцевой базальт-риодацитово-формации, которая, как предполагается, сформировалась на коре континентального типа в бассейнах энсиалических островных дуг (Еремин и др., 2000). В обоих регионах колчеданные месторождения приурочены к линейным вулканическим поясам (рис. 1, 2).

На Урале большинство медно-цинково-колчеданных месторождений локализуется среди кислых вулканитов на различном удалении от базальтового основания. В зависимости от расстояния до подрудных базальтов, представленные в данной статье месторождения образуют последовательный ряд: Юбилейное → Яман-Касы → Валентор-

ское → Молодёжное → Октябрьское → Узельга-4 → Узельга-1 → Александринское (рис. 3). В этом же ряду в рудных залежах уменьшается количество колломорфного пирита и марказита, псевдоморфоз пирита по пирротину, теллуридов и сульфоарсенидов, нарастают содержания сфалерита, галенита, барита, борнита, самородного золота и блёклых руд (Maslennikov et al., 2013). Юбилейное месторождение, близкое к кипрскому типу, некоторыми исследователями (Серавкин, 2010; Прокин и др., 2011) отнесено к уральскому типу № 1, поскольку рудные тела, хотя и лежат на базальтах, но перекрываются кислыми вулканитами. Месторождения Молодёжное и Узельга-4, судя по близкой позиции с к подрудным базальтам, могли бы быть отнесены к уральскому типу № 2. Однако, присутствие баритовых руд сближает их с типом № 3 (Прокин и др., 2011). Верхние рудные залежи Октябрьского и Узельгинского месторождений несомненно относятся к уральскому типу № 3 (Прокин и др., 2011), который является переходным к баймакскому типу. Александринское месторождение относится либо к баймакскому типу, либо к более крайнему члену рудно-формационного ряда – типу куроко. В этот ряд не вписывается Сафьяновское свинецсодержащее медно-цинково-колчеданное месторождение, рудовмещающая толща которого сложена вулка-



Рис. 1. Позиция колчеданных месторождений Урала, содержащих сульфидные трубы «палеокурильщиков» с блёклыми рудами (составлено с использованием данных Е.С. Контарь и Л.Е. Либаровой, 1997; В.В. Зайкова, 2006, В.А. Прокина и др., 2011, с упрощением).

1 – раннепалеозойский метаморфизованный фундамент; 2 – среднепалеозойские вулканические пояса; 3 – верхнепалеозойские вулканогенно-осадочные комплексы; 4–7 – колчеданные залежи: 4 – слабо разрушенные холмы, 5 – сильно разрушенные холмы, 6 – рудокластические линзы с включениями реликтов сульфидных холмов; 7 – пластообразные слоистые линзы рудокластитов.

Fig. 1. Position of the Urals massive sulphide deposits containing sulphide chimneys of the «paleosmokers» with fahlores (after E.S. Kontar and L.E. Libarova, 1996; V.V. Zaykov, 2006; Prokin et al., 2011).

1 – Early Paleozoic metamorphosed basement; 2 – Middle Paleozoic Volcanic belts; 3 – Upper Paleozoic Volcanic-sedimentary complexes; 4–7 – massive sulphide deposits: 4 – slightly destroyed mounds; 5 – strongly destroyed mounds; 6 – oreclastic lenses with sulphide mound inclusions relics; 7 – bed like layered lenses of oreclastites.

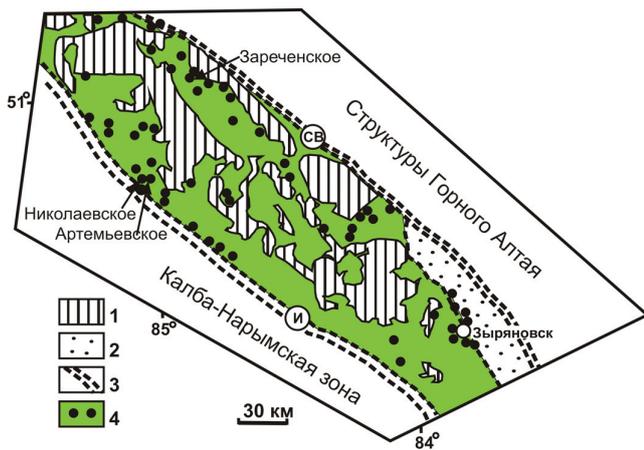


Рис. 2. Позиция колчеданных месторождений Рудного Алтая, содержащих сульфидные трубы «палеокурильщиков» с блёклыми рудами (составлено с использованием данных И.В. Гаскова, 2015, с упрощением).

1 – раннепалеозойский метаморфический фундамент; 2 – вулканогенно-осадочные и осадочные комплексы верхнего палеозоя; 3 – шовные зоны смятия: И – Иртышская, СВ – Северо-Восточная; 4 – средне- и верхнепалеозойские вулканические пояса с колчеданными месторождениями.

Fig. 2. Position of the Rudny Altai massive sulphide deposits containing sulphide chimneys of the «paleosmokers» with fahlores (after Gaskov I.V., 2015).

1 – Early Paleozoic metamorphic basement; 2 – sedimentary and Volcanic-sedimentary complexes of the Upper Paleozoic; 3 – suture zones: И – Irtysh, СВ – North-East; 4 – Middle and Upper Paleozoic Volcanic belts with massive sulphide deposits.

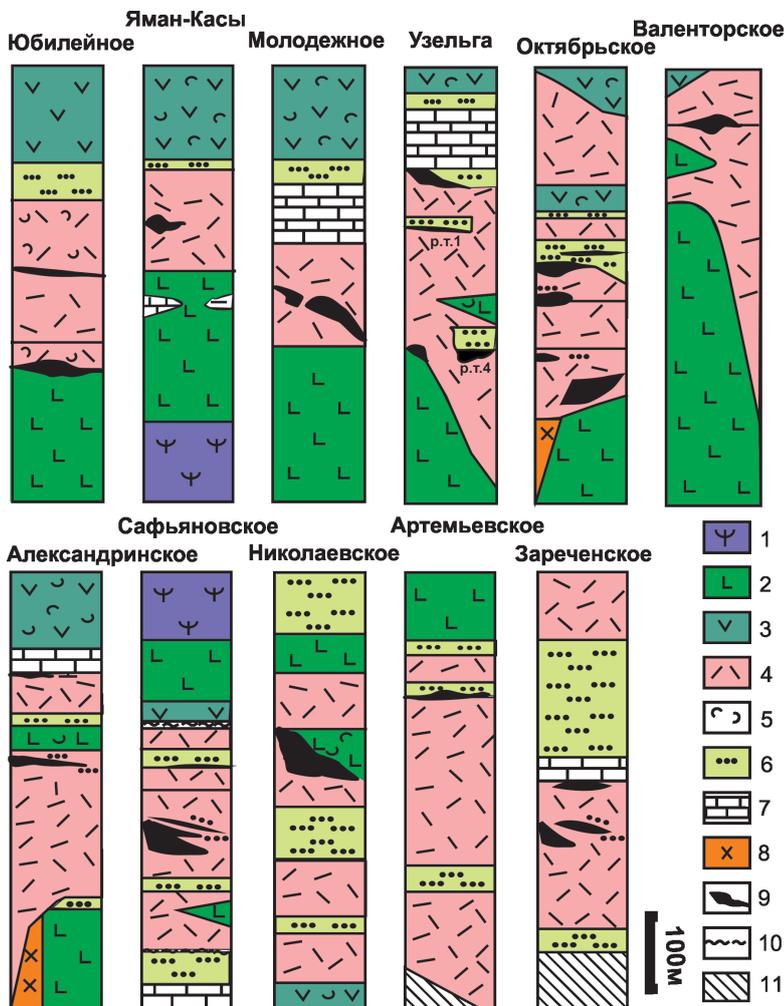


Рис. 3. Схематические геологические колонки колчеданных месторождений Урала и Рудного Алтая.

1 – ультрамафиты и серпентиниты; 2 – базальты, андезибазальты и бониниты; 3 – андезиты и андезибазальты; 4 – андезидациты, дациты и риолиты; 5 – вулканокластиты соответствующих (2–4) составов; 6 – вулканогенно-осадочные слоистые отложения, нерасчленённые; 7 – известняки; 8 – комагматичные плагиограниты; 9 – колчеданные тела; 10 – предполагаемые плоскости шарьяжа; 11 – гнейс-мигматитовый раннепалеозойский фундамент.

Fig. 3. Geological setting of massive sulphide deposits of the Rudny Altai and the Urals in geological columns.

1 – ultramafites and serpentinites; 2 – basalts, andesite-basalts and boninites; 3 – andesites and andesite-basalts; 4 – andesite-dacites, dacites and rhyolites; 5 – volcanoclastites of relevant (2–4) compounds; 6 – volcanic-sedimentary deposits layered undivided; 7 – limestones; 8 – plagiogranites; 9 – massive sulphide bodies; 10 – the supposed of thrust plane; 11 – Early Paleozoic gneiss-migmatite foundation.

нитами базальт-риодацитово́й формации, содержащей не яшмы, а слоистые пачки углеродистых пелитолитов («чёрных сланцев»). По составу руд и рудовмещающей формации оно образует единый ряд с изученными месторождениями Рудного Алтая: Николаевское → Сафьяновское → Артемьевское → Зареченское (см. рис. 3). Так же как и в предыдущем случае, в этом ряду в рудах снижается роль пирит-марказитовых ассоциаций и увеличивается значение золото-галенит-сфалерит-баритовых ассоциаций, содержащих обильные блёклые руды. В подрудных риодацитовых толщах уменьшаются объёмы углеродистых отложений. Псевдоморфозы пирита по пирротину присутствуют только в рудах Николаевского и Сафьяновского месторождений.

Линзообразные рудные залежи изученных колчеданных месторождений реконструируются как слабо и сильно разрушенные сульфидные холмы (Зайков, 2006; Масленников, 2006). «Ядра» холмов сложены массивными зернистыми пиритовыми рудами, содержащими вкрапленность халькопирита, реликты колломорфных агрегатов пирита, сфалерита и гидротермально-преобразованных труб «палеокурильщиков». На «склонах» сульфидных холмов залегают линзы сульфидных брекчий, содержащие фрагменты гидротермальных труб хорошей сохранности. На выклинках сульфидные брекчии сменяются тонкослоистыми сульфидными турбидитами и их диагенитами, переслаиваемыми кремнистогематитовыми (уральский тип), либо углеродистыми (алтайский тип) алевропелитами. В сульфидных турбидитах фрагменты гидротермальных труб изменены процессами субмаринного гипергенеза или диагенеза (Сафина, Масленников, 2008).

Локализация блёклых руд в зонах «палеокурильщиков»

В целом, минеральная зональность гидротермальных труб «палеокурильщиков» по ряду признаков напоминает зональность современных чёрных курильщиков (Зайков, 2006; Масленников, 1999, 2006; Масленникова, Масленников, 2007; Herrington et al., 1998; и др.).

На Юбилейном месторождении доминируют кварц-пирит-халькопиритовые трубы. Особенностью месторождения является наличие кальцит-талк-пирит-сфалерит-халькопиритовых (рис. 4а) и более редких халькопирит-кальцит-талк-пирит-сфалеритовых разновидностей труб. На других месторождениях, наряду с кварц-пирит-

халькопиритовыми трубами, встречаются пирит-сфалерит-халькопиритовые и халькопирит-барит-сфалеритовые. Все три типа труб присутствуют в рудах изученных нами медно-цинково-колчеданных месторождений и образуют гомологический минералогический ряд. Первые два типа труб доминируют в рудах Молодёжного (рис. 4б), Яман-Касы (рис. 4г), Валенторского, Николаевского (рис. 5а) и Сафьяновского месторождений. В середине ряда по составу труб располагаются месторождения Узельга- и Октябрьское, где встречаются как пирит-сфалерит-халькопиритовые, так и халькопирит-пирит-сфалеритовые трубы, содержащие незначительное количество барита и кварца. На колчеданно-полиметаллических месторождениях обнаружены в основном халькопирит-пирит-барит-сфалеритовые трубы (Александринское (рис. 4е), Артемьевское (рис. 5б) и Зареченское (рис. 5в). Однако эта же разновидность труб изредка встречается и на месторождениях уральского типа (Яман-Касы, рис. 4д). Каждый тип труб характеризуется своей минеральной зональностью и ассоциациями редких минералов (рис. 6, табл. 1).

Наружный слой «оболочек» пирит-халькопиритовых труб сложен в основном колломорфным пиритом, который по направлению к внутренней части сменяется субгедральными и ангедральными разновидностями зернистого пирита с многочисленными псевдоморфозами тонкодисперсного и зернистого пирита и марказита по пластинчатым кристаллам гексагонального пирротина. Осевого канала, как правило, последовательно заполнен халькопиритом и кварцем. В агрегатах, запечатавших каналы некоторых труб, встречаются псевдоморфозы пирита и марказита по субгедральным кристаллам пирротина. Для этого типа труб блёклые руды не характерны. Они встречаются только в трубах, где пирит и кварц доминируют над халькопиритом. Например, в халькопирите халькопирит-кварц-пиритовой трубы из месторождения Яман-Касы (см. рис. 4г и б) обнаружены обильные микровключения тетраэдрита. В кварце этих труб присутствуют включения борнита и дигенита. В халькопирите одной из кварц-пирит-халькопиритовых труб Сафьяновского месторождения также обнаружен тетраэдрит в ассоциации с глаукодомом, гесситом и теннантитом (Масленникова, Масленников, 2007).

Пирит-сфалерит-халькопиритовые трубы напоминают по зональности пирит-халькопиритовые. Главным отличием является появление сфалерита во внутренней части оболочки трубы и на внутрен-

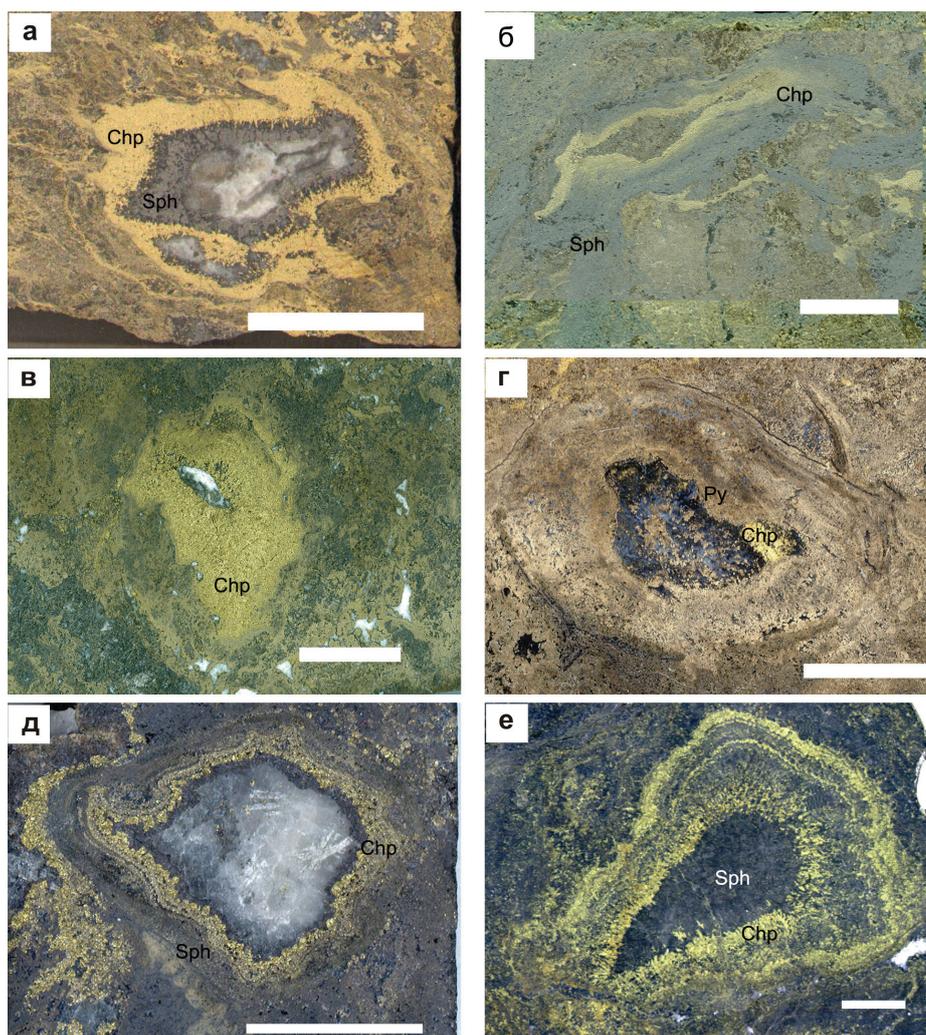


Рис. 4. Примеры гидротермальных труб «палеокурильщиков», содержащих блёклые руды. а-е – голчеданные месторождения Урала.

а – кальцит-талк-сфалерит-халькопиритовая труба из Юбилейного месторождения; б – пирит-халькопирит-сфалеритовая труба из Молодёжного месторождения; в – барит-сфалерит-пирит-халькопиритовая труба из месторождения Узельга-4 (залежь № 4); г – халькопирит-кварц-пиритовая труба из месторождения Яман-Касы; д – халькопирит-пирит-барит-кварц-сфалеритовая труба из месторождения Яман-Касы; е – халькопирит-сфалеритовая труба из Александринского месторождения. Chp – халькопирит, Sph – сфалерит. Поперечные срезы. Длина линейки 1 см.

Fig. 4. Examples of hydrothermal chimneys containing fahlores. The Urals massive sulphide deposits.

а – chalcopyrite-sphalerite-calcite-talc chimney from the Yubileinoe deposit; б – sphalerite-chalcopyrite-pyrite chimney from the Molodezhnoye deposit; в – chalcopyrite-pyrite-sphalerite-barite chimney from the Uzelga-4 deposit; г – pyrite-quartz-chalcopyrite chimney from the Yaman-Kasy deposit; д – sphalerite-quartz-barite-pyrite-chalcopyrite chimney from the Yaman-Kasy deposit; е – sphalerite-chalcopyrite chimney from the Aleksandrinskoye deposit. Chp – chalcopyrite, Sph – sphalerite. Cross sections. Scale bar 1 cm.

ней стенке пирит-изокубанит-халькопиритового слоя, наростшего на стенку канала трубы. В наиболее полном варианте пирит-сфалерит-халькопиритовые трубы последовательно заполнены халькопиритом, марказитом, сфалеритом и кварцем (Яман-Касы, Молодёжное, или тальком и кальцитом (Юбилейное), реже баритом и галенитом.

В таких трубах блёклые руды встречаются не часто. Их место занимают арсенопирит, кобальтин и лёллингит (Масленникова, Масленников, 2007). Только в тех пирит-сфалерит-халькопиритовых трубах, где появляется барит, присутствуют в сфалерите микровключения теннантита (см. рис. 6). Голдфиллит обнаружен в кварце каналов этого же типа труб

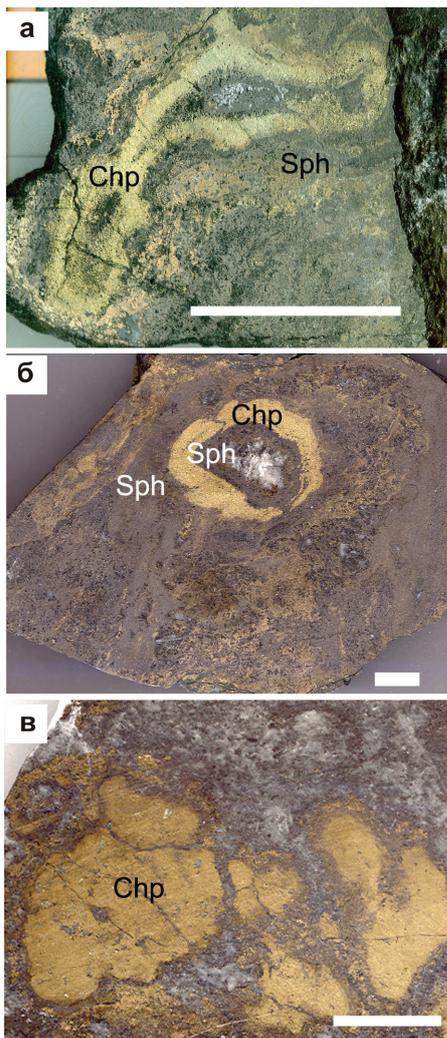


Рис. 5. Примеры гидротермальных труб «палеокурильщиков», содержащих блёклые руды. Колчеданные месторождения Рудного Алтая.

а – галенит-пирит-халькопирит-сфалеритовая труба из месторождения Николаевское; б – пирит-барит-халькопирит-сфалеритовая труба из месторождения Артемьевское; в – фрагменты гидротермальных халькопиритовых труб в баритите Зареченского месторождения. Chp – халькопирит, Sph – сфалерит. Поперечные срезы. Длина линейки 1 см.

Fig. 5. Examples of hydrothermal chimneys containing fahlores. The Rudny Altai massive sulphide deposits.

а – sphalerite-chalcopyrite-pyrite-galena chimney from the Nikolaevskoye deposit; б – sphalerite-chalcopyrite-barite-pyrite chimney from the Artemyevskoye deposit; в – fragments of hydrothermal chalcopyritic chimneys in the baritite of the Zarechenskoye deposit. Chp – chalcopyrite, Sph – sphalerite. Cross section. Scale bar 1 cm.

на Яман-Касинском месторождении в ассоциации с марказитом (Масленникова, Масленников, 2007; Maslennikov et al., 2013).

В оболочках халькопирит-пирит-барит-сфалеритовых труб ламинарный колломорфный пирит встречается крайне редко, его место занимает рассеянная в сфалерите вкрапленность эвгедрального или фрамбоидального пирита (см. рис. 6). Внутренние стенки халькопирит-пирит-барит-сфалеритовых труб инкрустированы в основном сфалеритом, кварцем и баритом. Тонкий слой халькопирита обычно не содержит изокубанит. Псевдоморфозы пирита по пирротину обычно отсутствуют или встречаются крайне редко. Барит и сфалерит – преобладающие минералы оболочек и осевых частей каналов колчеданно-полиметаллических труб. Блёклые руды распространены во всех зонах барит-колчеданно-полиметаллических труб в виде включений в сфалерите, в сростках с галенитом, халькопиритом, самородным золотом и иногда гесситом (Александринское, Октябрьское) или арсенопиритом и самородным висмутом (Артемьевское) (табл. 1).

В целом, в пределах выделенного минералогического ряда по мере нарастания в трубах относительного количества сфалерита, барита и кварца наблюдается смена теллуридных и сульфоарсенидных ассоциаций – золото-галенит-блёкловорудными (Масленникова, Масленников, 2007; Maslennikov et al., 2013). Количество и разнообразие блёклых руд нарастает от первого типа к третьему.

В выявленном рудно-формационном ряду нарастает количество труб третьего минерального типа, а значит и количество блёклых руд. Следует отметить, что в трубах колчеданных месторождений, находящихся в середине уральского рудно-формационного ряда (Молодёжное, Октябрьское, Узельга-4), блёклые руды нередко находятся в сростании с теллуридами (рис. 7). Такие сростания не наблюдаются в трубах месторождений, начинающих рудно-формационный ряд (Юбилейное, Яман-Касы месторождения) и завершающих его (Узельга-1 и Александринское месторождения). Аналогично, в рудно-формационном ряду алтайских месторождений нарастает количество и разнообразие блёклых руд. В середине ряда (Артемьевское и Сафьяновское месторождения), блёклые руды ассоциируют с арсенопиритом (рис. 8). Такие ассоциации отсутствуют в начале (Николаевское месторождение) и в конце (Зареченское месторождение) этого ряда.

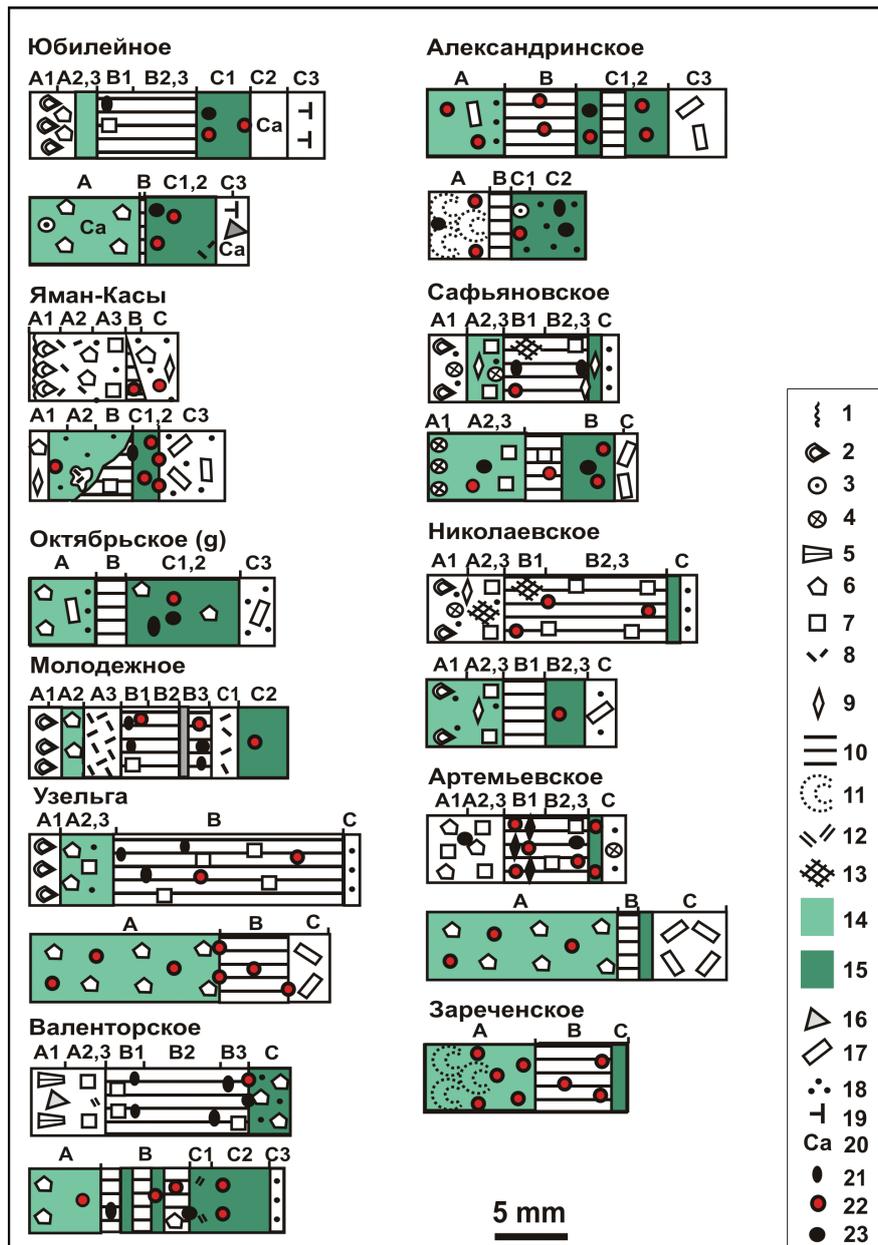


Рис. 6. Локализация включений блёклых руд в зональных стенках труб «палеокурильщиков» из колчеданных месторождений Урала и Рудного Алтая. А, В, С – зоны трубы: А – оболочка, сложенная в разных соотношениях пиритом, сфалеритом, кварцем или баритом; В – крустификация внутренней стенки трубы, представленная в основном халькопиритом; С – осевая часть канала, выполненная пиритом, сфалеритом, кварцем и/или баритом, иногда кальцитом и тальком.

1 – 8 – пирит: 1 – колломорфный ламинарный; 2 – колломорфный почковидный; 3 – колломорфный глобулярный; 4 – фрамбоидальный; 5 – дендритовидный; 6 – субгедральный; 7 – эвгедральный; 8 – псевдоморфный по пирротину; 9 – марказит; 10 – халькопирит друзовый крустификационный; 11 – халькопирит псевдоморфный по колломорфному пириту; 12 – халькопирит цементационный, интерстиционный и вкрапленный; 13 – изокубанит; 14 – сфалерит в оболочке трубы; 15 – сфалерит в канале трубы; 16 – сфалерит вкрапленный; 17 – барит; 18 – кварц; 19 – тальк; 20 – кальцит; 21 – теллуриды; 22 – блёклые руды; 23 – самородное золото и электрум.

Fig. 6. The setting of fahlore inclusions of in zoned walls of «paleosmoker» chimneys from the massive sulphide deposits of Rudny Altai and the Urals: А – outer wall consist of pyrite, sphalerite quartz or barite, В – inner wall covered by chalcopyrite; С – infilling of axial part of conduits by pyrite, sphalerite, quartz and/or barite, calcite and talc.

1 – 8 – pyrite: 1 – colloform laminar; 2 – colloform kidney-shaped; 3 – colloform globular; 4 – framboidal; 5 – dendritic; 6 – subhedral; 7 – euhedral; 8 – pseudomorphic after pyrrhotite; 9 – marcasite; 10 – chalcopyrite drusy crustified; 11 – chalcopyrite pseudomorphic after colloform pyrite; 12 – chalcopyrite cementing, interstitial and disseminated; 13 – isocubanite; 14 – sphalerite from the chimney coating; 15 – sphalerite from the chimney channel; 16 – disseminated sphalerite; 17 – barite; 18 – quartz; 19 – talc; 20 – calcite; 21 – tellurides; 22 – fahlores; 23 – native gold and electrum.

Таблица 1

Зависимость составов труб «палеокурильщико» от составов вулканогенных (ВФ) и рудных формаций (РФ) колчеданных месторождений Урала и Рудного Алтая

Table 1

The dependence of «paleosmoker»chimney contents from the ones of volcanogenic (ВФ) and ore formation (РФ) of Ural and Rudniy Altai massive sulphide deposits

Месторождение	ВФ	РФ	Типы труб	Зона	Типичные минеральные ассоциации
Юбилейное	Б	МЦ	МЦК	А, С	Пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, лектрум, тетраэдрит-теннантит, кальцит и тальк, реже теннантит
Яман-Касы	РБ	МЦК	МК МЦК Ва-КП	В	Марказит-халькопиритовая с Fe-, Co-, Pb-, Au-, Ag, Bi теллуридами, Fe, Co-арсенидами и сульфоарсенидами Fe, Co и с неопределенными мышьяковыми сульфосолями Pb, Cu, Ag, Hg
			МК	В	Пирит-халькопиритовая с Fe-тетраэдритом и Fe-теннантитом
			МЦК	С	Марказит-кварцевая с голдфилдитом
			МЦК Ва-КП	А, С	Марказит-галенит-сфалеритовая с самородным золотом и Fe-теннантитом
Молодёжное	РБ	МЦК	МЦК	ВС	Марказит-халькопирит-сфалеритовая с золото-магнетит-гессит-алтаит-галенитовой, с Ag-содержащим Fe-теннантитом и псевдоморфозами пирита по пирротину
Узельгинское	РБ	МЦК	МЦК	В-С	Галенит-пирит-халькопирит-сфалеритовая с гесситом, баритом, колорадоитом, Zn-Fe-теннантитом, Zn-Fe-тетраэдрит-теннантитом
Октябрьское	РБ	МЦК	КП	С	Гессит-галенит-(±алтаит)-сфалеритовая с самородным золотом и теннантитом
Валенторское	БР	МЦК	МК МЦК	В	Халькопирит-сфалеритовая с твёрдыми растворами теллурувисмутита и кочкарита, гесситом, тетрадимитом, самородным золотом и Te-Bi-содержащим теннантитом
			КП	С	Сфалеритовая с гематитом, Fe-Zn –теннантитом
Александринское	БР	КП	Ва-КП	А, В, С	Гессит-галенит-сфалеритовая с Zn-теннантитом
Сафьяновское	Р-Д-ЧС	КП+МЦК	МК, МЦК, КП	В-С	Марказит-пирит-гессит-галенит-халькопиритовая и золото-сфалеритовая с теннантитом и тетраэдритом и псевдоморфозами пирита по пирротину
Николаевское	Р-Д-ЧС	КП+МЦК	МК, МЦК, КП	В-С	Марказит-галенит-халькопиритовая и марказит-галенит-сфалеритовая с теннантитом и псевдоморфозами пирита по пирротину
Артемьевское	Р-Д-ЧС	Ва-КП	Ва-КП	В, С	Золото-галенит-арсенопирит-халькопиритовая и галенит-магнетит-сфалеритовая с серебросодержащим тетраэдритом

Примечание. Формации: РБ – риолит-базальтовая, БР – базальт-риолитовая, Р-Д-ЧС – риолит-дацитовая чёрно-сланцевая. Типы труб: МЦК – медно-цинково-колчеданная, МК – медноколчеданная, КП – колчеданно-полиметаллическая, Ва-КП – барий-колчеданно-полиметаллическая.

Note. Formations: РБ – rhyolite-basaltic, БР – basalt-rhyolitic, R-D-ЧС – rhyolite-dacitic-black slate. The types of chimneys: МЦК – copper-zinc-massive sulphide, МК – copper-massive sulphide, КП – massive sulphide-polymetallic, Ва-КП – barium-massive sulphide-polymetallic.

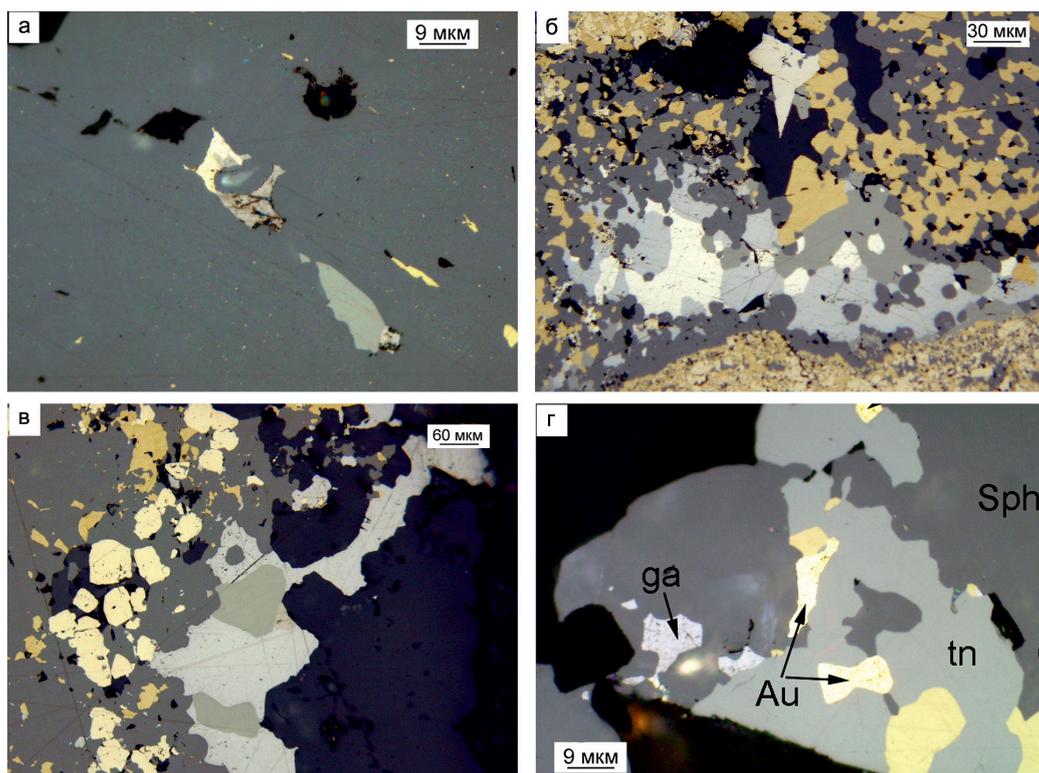


Рис. 7. Минеральные сростания с блёклыми рудами в «палеокурильщиках» колчеданных месторождений Урала а – сростание теннантита (зеленовато-серый) с гесситом (шагреновый серый) в сфалерите; в центре – сросток алтаита (белый) с гесситом; желтые включения в сфалерите – халькопирит, Октябрьское месторождение (обр. О-887-83-1а); б – сложное сростание теннантита (серый) с алтаитом (белый), галенитом (светло-серый), сфалеритом (темно-серый) и халькопиритом; вверху – копьевидный кристалл арсенопирита (белый, но менее яркий, чем алтаит), Молодёжное месторождение (обр. Mol-08-38-21к); в – сростание теннантит-тетраэдрита (зеленовато-серый) с колорадоитом (коричневато-серый) в галените (светло-серый), слева – сфалерит с вкрапленниками пирита и халькопирита, справа – кварц, Узельгинское месторождение, рудное тело № 4 (обр. Уз-09-2ак); г – сростание теннантита с самородным золотом и халькопиритом в сфалерите в ассоциации с алтаитом, Александринское месторождение (обр. А-2001-1). Отраженный свет.

Fig. 7. Mineral intergrowths with fahlores in chimneys from the Urals massive sulphide deposits.

а – tennantite (greenish gray) intergrowth with hessite (gray shagreen) in sphalerite; in the center – altaite (white) growth with hessite; yellow inclusions in sphalerite – chalcopyrite, Oktyabrskoye deposit (O-887-83-1a); б – complex intergrowth of tennantite (gray) with altaite (white), galena (light gray), sphalerite (dark gray), and chalcopyrite; top – spear-shaped crystal of arsenopyrite (white, but less bright than the altaite), Molodezhnoye deposit (Mol-08-38-21k); в – tennantite-tetrahedrite (greenish gray) intergrowth with kolaradoite (brownish gray) in galena (light gray), left – sphalerite with pyrite and chalcopyrite inlets, right – quartz, Uzelginskoye deposit, ore body № 4 (Uz-09-2ak); г – tennantite intergrowth with native gold and chalcopyrite in sphalerite in association with altaite, Alexandrinskoye deposit (A-2001-1). Reflected light.

Таким образом, наблюдается общая зависимость минерального состава труб «палеокурильщиков» от составов рудовмещающих формаций и, соответственно, рудно-формационных типов колчеданных месторождений. Гораздо меньше известно о такой зависимости применительно к конкретным составам блёклых руд, встречающихся в трубах «палеокурильщиков».

Состав блёклых руд

Наиболее отчётливо поля фигуративных точек применительно к каждому из охарактеризованных колчеданных месторождений обособляются на диаграмме Fe – Zn – Sb (рис. 9).

Теннантит – наиболее распространенная разновидность блёклых руд «палеокурильщиков» большинства изученных колчеданных месторождений. Среди остальных разновидностей блёклых руд

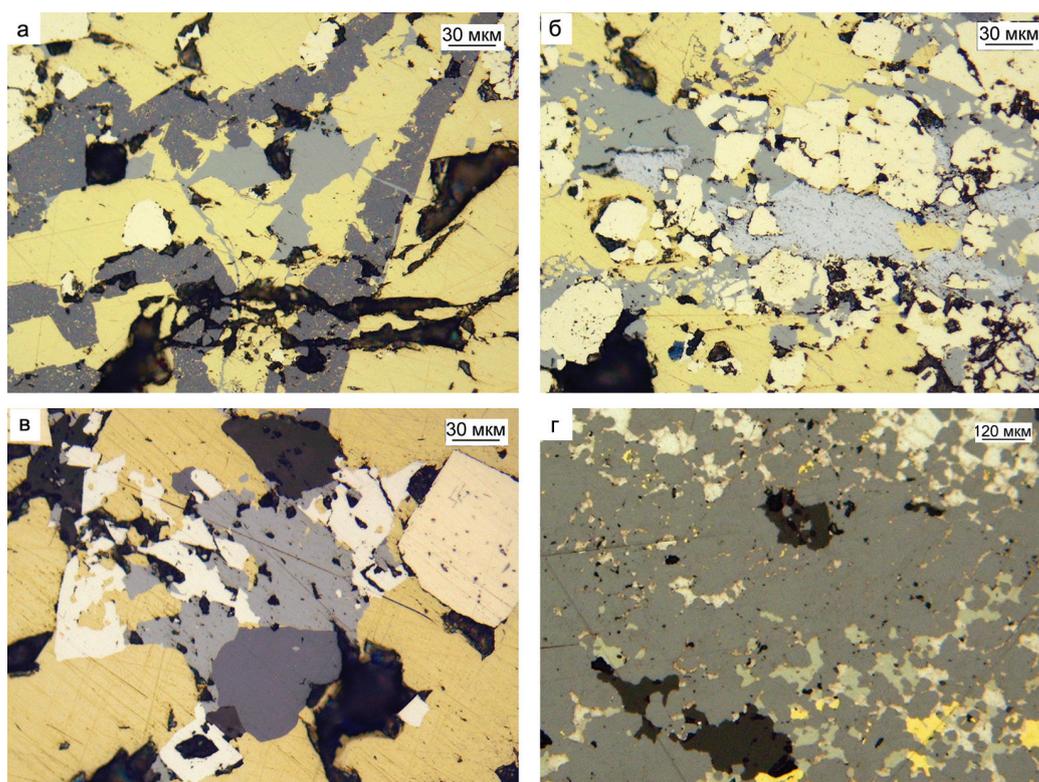


Рис. 8. Минеральные сростания с блёклыми рудами в «палеокурильщиках» колчеданных месторождений Рудного Алтая.

а – поздние выделения теннантита (серый) в сфалерит-халькопиритовом агрегате, Николаевское месторождение (обр. Н-07-60б); б – замещение пирита (светло-желтый) и халькопирита (жёлтый) теннантит-галенистовыми агрегатами (серые), Николаевское месторождение (обр. Н-07-60а); в – сростание тетраэдрита (серый) с арсенипиритом (белое), сфалеритом (темно-серое) в ассоциации с эвгедральным пиритом в халькопирите, Артемьевское месторождение (обр. AP-07-0а); г – сростания тетраэдрит-теннантита и халькопирита в сфалерите, Зареченское месторождение (обр. Zar-08-41а). Отраженный свет.

Fig. 8. Mineral intergrowths with fahlores in chimneys from the Rudny Altai massive sulphide deposits.

а – later allocations of tennantite (gray) in the sphalerite-chalcopyrite unit; Nikolaevskoye deposit (H-07-60b); б – the replacement of pyrite and chalcopyrite by galena-tennantite units, Nikolaevskoye deposit (H-07-60a); в – intergrowth of tetrahedrite (gray) with arsenopyrite (white), sphalerite (dark gray) in association with euhedral pyrite, chalcopyrite, Artemyevskoye deposit (AP-07-0a); г – intergrowths of tetrahedrite-tennantite and chalcopyrite in sphalerite, the Zarechenskoye deposit (Zar-08-41a). Reflected light.

он выделяется повышенными содержаниями As, с отношением $As_{100}/(As+Sb+Te+Bi) > 75$. Теннантит как главный представитель блёклых руд распространён в сульфидных трубах колчеданных месторождений Урала (Валенторское, Александринское, Молодёжное) и Рудного Алтая (Николаевское). Содержания Sb в нём обычно не превышают 2–6 мас. %. Теннантит в сульфидных трубах Юбилейного, Яман-Касинского, Октябрьского, Узельгинского и Сафьяновского месторождений ассоциирует с тетраэдрит-теннантитом или тетраэдритом. Этот минерал «в чистом виде» не найден в трубах Артемьевского и Зареченского месторождений, где

его место занимают серебрясодержащие тетраэдрит-теннантит и тетраэдрит (см. рис. 9).

В соответствии с номенклатурой Н.Н. Мозговой и А.И. Цепина (1983) среди изученных нами вкрапленников блёклых руд выделяются железистые и цинкистые разновидности теннантита. Большая их часть характеризуется повышенными содержаниями Te (0.8–4.6 мас. %) и относится к Te-содержащей Fe-Zn-теннантитовой группе. Другая часть, кроме повышенных содержаний Te (2.1–4.2 мас. %), выделяется присутствием Ag (0.2–1.9 мас. %) и относится к Ag, Te-содержащей Fe-Zn-теннантитовой группе.

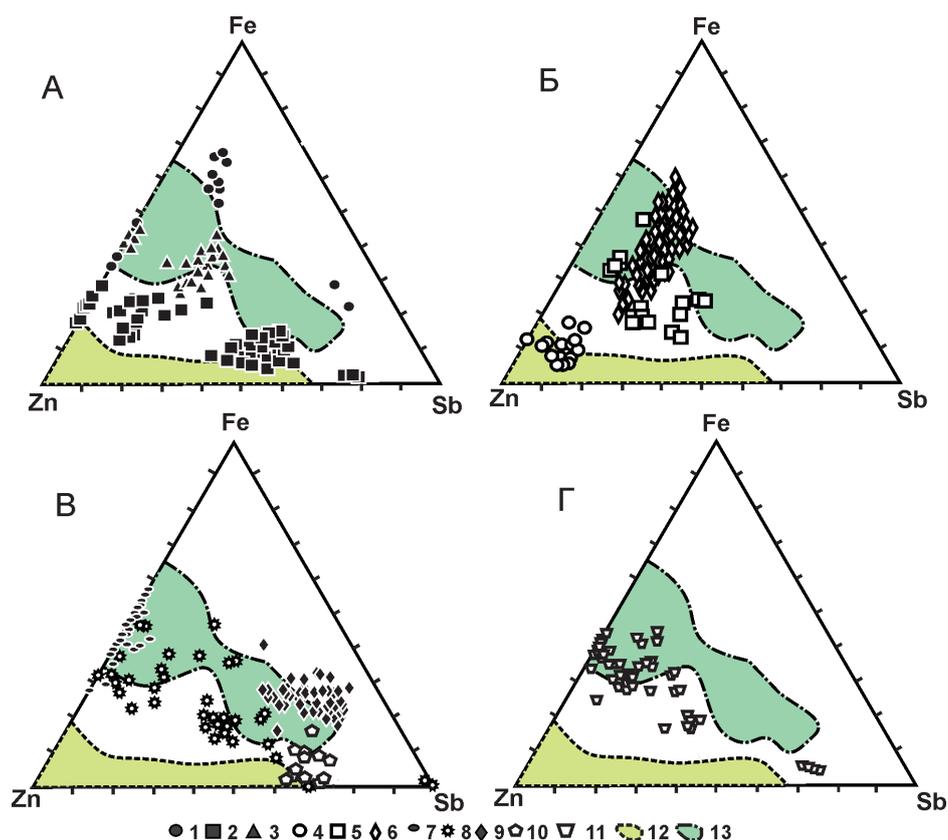


Рис. 9. Тройные диаграммы Fe-Zn-Sb (мас. %), показывающие особенности составов блёклых руд в сульфидных трубах «палеокурильщиков» колчеданных месторождений Урала и Рудного Алтая, принадлежащих к различным вулканогенным формациям.

А – риолит-базальтовая формация: 1 – Яман-Касы, 2 – Узельга-4, 3 – Молодёжное; Б – базальт-риолитовая формация: 4 – Александринское, 5 – Октябрьское; 6 – Валенторское; В – риодацитовая (с черными сланцами) формация: 7 – Николаевское, 8 – Артемьевское, 9 – Сафьяновское, 10 – Зареченское; Г – бонинит-базальтовая формация: 11 – Юбилейное; Дополнительные поля: 12 – Хокуроко и Понтиды (базальт-риолитовая формация с яшмами); 13 – поле ТАГ (базальтовая формация) (по Мозговой и др., 1996).

Fig. 9. Ternary diagrams Fe-Zn-Sb (wt. %), showing the particular compositions of fahlores in sulphide chimneys of «paleosmokers» from the Urals and Rudny Altai massive sulphide deposits, belonging to different Volcanic formations.

А – rhyolite-basalt formation: 1 – Yaman-Kasy, 2 – Uzelga-4, 3 – Molodezhnoye; Б – basalt-rhyolite formation: 4 – Alexandrinskoye 5 – Oktyabrskoye, 6 – Valentorskoye; В – rhyodacitic (with black shale) formations: Nikolaevskoye, 8 – Artemyevskoye 9 – Safyanovskoye, 10 – Zarechenskoye; Г – boninite-basalt formation: 11 – Yubileinoye; Additional fields: 12 – Hokuroko and Pontida (basalt-rhyolite formation with jasper); 13 – TAG field (basalt formation) (after Мозгова и др., 1996).

По уменьшению средней железистости теннантита колчеданные месторождения Урала выстраиваются в следующий ряд: Яман-Касы (до 63–85 %) → Молодёжное (до 45–49 %) → Юбилейное (до 18–42 %) → Валенторское (до 31–42 %) → Октябрьское (до 25–43 %) → Узельга-4 (до 12–18 %) → Узельга-1 (до 7–16 %) → Александринское (до 8–11 %). Ряд железистости теннантита совпадает с рядом удаленности колчеданных месторождений от базальтового основания. Исключением являются Сафьяновское и Николаевское месторождения, залегающие на риодацитовом основании.

Сульфидные трубы этих месторождений включают разновидности теннантита, характеризующиеся повышенными средними значениями Fe* (32 % и 46 %, соответственно). В подрудной толще этих месторождений залегают углеродистые алевропелиты, которые, так же как и базальты, могли обеспечивать сильно восстановительные свойства гидротермального флюида, благоприятные для переноса Fe²⁺.

Медистость (формальное Cu²⁺) теннантита в сульфидных трубах большинства изученных колчеданных месторождений невысокая: (Cu²⁺100/(Fe²⁺+Zn²⁺) < 0–34 %.

Te-содержащий теннантит условно выделяется по содержаниям $Te > 0.3$ мас. % (по Trudu, Knittel, 1998). Единичные анализы показывают повышенные содержания Te в теннантите из сульфидных труб месторождений Яман-Касы (до 0.37 мас. %) и Сафьяновского (до 0.97 мас. %) (fahlores). Теллурсодержащий теннантит широко представлен в сульфидных трубах Валенторского месторождения (Te 0.4–4.6 мас. %). В теннантите борнитовых продуктов придонного преобразования обломочных сульфидных отложений содержания Te гораздо

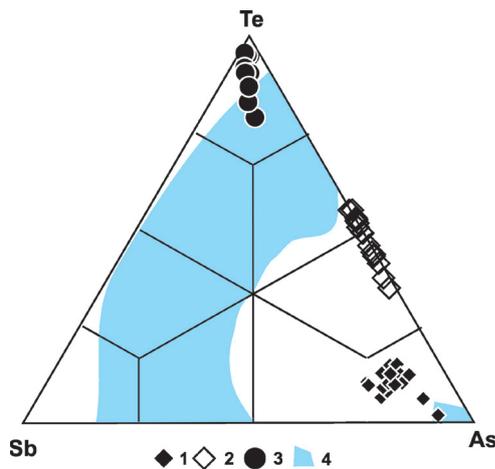


Рис. 10. Состав блёклых руд на тройной диаграмме Sb-Te-As.

1 – Te-содержащий теннантит в сфалерите сульфидных труб Валенторского и Яман-Касинского месторождений; 2 – Te-содержащий теннантит в борнитовых рудах Валенторского месторождения; 3 – голдфилдит в трубах из Яман-Касинского месторождения; 4 – поля фигуративных точек составов теллурсодержащих блёклых руд золоторудных и колчеданно-полиметаллических месторождений мира (Новгородова и др., 1978; Сахарова и др., 1984; Спиридонов, Округин, 1985; Коваленкер и др., 1980, 1986; Борисова и др., 1986; Плотинская и др., 2005; Ненашева, 2009; Trudu, Knittel, 1998).

Fig. 10. Composition of the fahlores is on ternary diagram Sb-Te-As.

1 – Te-containing tennantite in sphalerite sulphide chimneys from the Valentorskoye and Yaman-Kasy deposits; 2 – Te-containing tennantite in bornite ores from the Valentorskoye deposit; 3 – goldfeldite chimneys from the Yaman-Kasy deposit; 4 – fields of data points of Te-containing fahlores from the gold and massive sulphide-polymetallic deposits of the world (Novgorodova et al., 1978; Sakharova et al., 1984; Spiridonov, Okrugin, 1985; Kovalenker et al., 1980, 1986; Borisova et al., 1986; Plotinskaya et al., 2005; Nenasheva 2009 – all in Russian herein references; Trudu, Knittel, 1998 – In English).

выше, чем в теннантите сульфидных труб (рис. 10). Концентрации ($As+Sb+Bi$) убывают по мере нарастания количества Te за счет изоморфных замещений (рис. 11). Значения Cu в теллурсодержащем теннантите Валенторского месторождения также являются функцией изоморфных замещений. Формульные коэффициенты Cu возрастают от 9.5 до 11.95 мас. % по мере нарастания количества Te до формульного коэффициента, равного 2. В этом же направлении уменьшается количество $Fe+Zn$ (см. рис. 11). Увеличение содержаний Cu^+ происходит, очевидно, за счет замещения Fe^{2+} и Zn^{2+} на Cu^+ . Очевидно, что Te^{4+} , обладающий избыточной валентностью по отношению к $(Sb, As)^{3+}$, частично компенсирует недостаток Fe^{2+} и Zn^{2+} . Непрерывный характер такой компенсации подтверждается отчетливой обратной корреляцией формульных коэффициентов $(Fe^{2+}+Zn^{2+})$ и Te^{4+} , если включить в выборку теллурсодержащие блёклые руды других месторождений. В целом, отрицательная корреляция Cu с $Fe+Zn$ и положительная связь Cu с Te, наблюдающаяся вплоть до получения формульного коэффициента теллура, равного 2 (см. рис. 11), является обычной для теллурсодержащих блёклых руд (Trudu, Knittel, 1998).

Bi-содержащий теннантит обнаружен в сфалерите сульфидных труб месторождений Валенторское и Октябрьское в ассоциации с самородным золотом, галенитом, гесситом и тетрадимитом (табл. 2). Содержания Bi в теннантите Октябрьского месторождения не превышают 0.059–0.83 мас. %. В Bi-Te-содержащих теннантитах Валенторского месторождения максимальные содержания Bi достигают 2.4–4.6 мас. %. Очевидно, они представляют начальные члены изоморфного ряда теннантит–аннивит.

Ag-содержащий теннантит – $(Cu,Ag)_{10}(Fe, Zn)_2(As_4)S_{13}$. Серебросодержащий теннантит с концентрациями Ag 0.3–2.6 мас. % встречается в сульфидных трубах Молодёжного, Узельгинского и Валенторского месторождений. Единичные определения значимых содержаний Ag отмечаются в теннантите Яман-Касинского (0.12 мас. %), Октябрьского (1.65 мас. %) и Сафьяновского (0.1–2 мас. %) месторождений.

Co(Ag,Te)-содержащий теннантит замещает более ранние выделения глаукодота и кобальтина в сульфидных трубах Сафьяновского и Яман-Касинского месторождений, соответственно (Масленникова, Масленников, 2007). На Сафьяновском месторождении Co-содержащий теннантит пред-

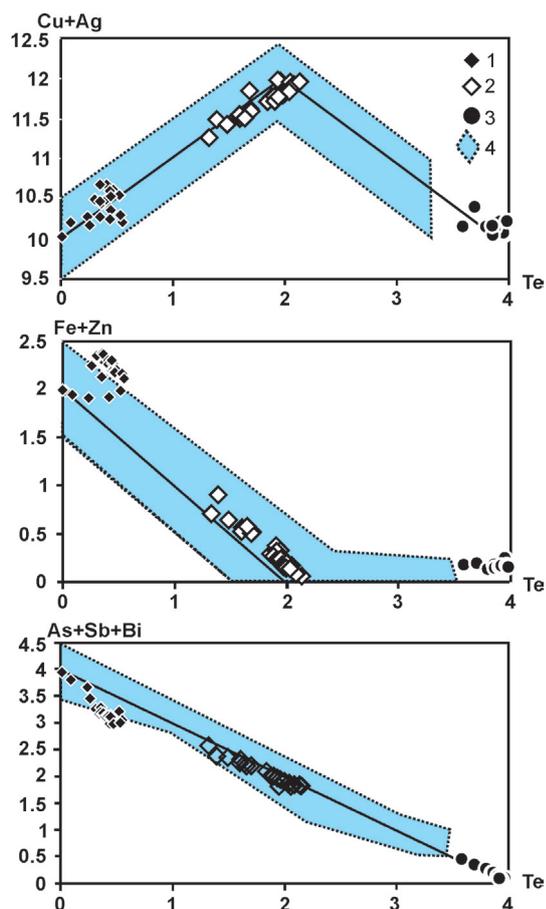


Рис. 11 Соотношение коэффициентов атомов в составе блёклых руд:

1 – Te-содержащий теннантит, 2 – теннантит-голдфиллит (теллуристый теннантит и мышьяковистый голдфиллит и 3 – голдфиллит – конечный член изоморфного ряда (Maslennikov et al., 2013); 4 – поля фигуративных точек теллурсодержащих блёклых руд золоторудных и колчеданных месторождений мира (см. рис. 10).

Fig. 11. Ratio of the coefficients of atoms in the fahlores:

1 – Te-containing tennantite, 2 – tennantite-goldfieldite (telluride tennantite and arsenic goldfieldite and 3 – goldfieldite – the end member of the isomorphous serie (Maslennikov et al., 2013), 4 – fields of data points of Te-containing fahlores from the gold and massive sulphide-polymetallic deposits of the world (the same on fig. 10)

ставлен цинковистой, а на месторождении Яман-Касы – железистой разновидностями теннантита. Содержания Co в теннантите варьируют от 0.22 до 3.73 мас. %. Возможно, Co^{2+} изоморфно замещает Fe^{2+} и Zn^{2+} , как это предполагается для аналогичных разновидностей теннантита и тетраэдрита золоторудных месторождений (Мозгова, Цепин, 1983).

Однако, химические анализы с высокими содержаниями Co, судя по пересчётам, отвечают смесям минералов (Спиридонов, 1985б). Сумма $Co+Fe+Zn$ во всех анализах выше идеального формульного коэффициента. Вероятно, часть Co в анализах может быть связана с «невидимыми» реликтами глаукодота и кобальтина. На это указывает корреляция Co и As. Кобальт исчезает в зёрнах тетраэдрита, ассоциирующих с Co-содержащим теннантитом.

Содержания Se в теннантите появляются на границе пределов обнаружения (0.01–0.11 мас. %) микрондовым анализом. Определения остальных возможных элементов-примесей (Cd, Se, Sn, Ni, Hg) в теннантите сульфидных труб находятся ниже пределов обнаружения микрондового анализа.

Теннантит-тетраэдрит и тетраэдрит-теннантит включают, соответственно, две переходных разновидности в ряду от сурьмянистого теннантита ($1 < Sb < 2$) к мышьяковистому тетраэдриту ($2 < Sb < 3$). Выделение широко распространённых переходных разновидностей в ряду теннантит-тетраэдрит является полезным для понимания минералогической специализации колчеданных месторождений (Пшеничный и др., 1998). Обе разновидности тетраэдрит-теннантита распространены в сульфидных трубах Узельгинского (58 %) и Сафьяновского (45 %) месторождений. Обильные включения (33 %) мышьяковистого тетраэдрита и редкие (4 %) включения сурьмянистого теннантита рассеяны в сульфидных трубах Артемьевского месторождения. Единичные включения сурьмянистого теннантита обнаружены в сульфидных трубах Яман-Касинского и Октябрьского месторождений. Микровключения мышьяковистого тетраэдрита распространены в халькопирите барит-сфалерит-халькопиритовых труб Зареченского и Узельгинского (Узельга-1) месторождений (см. табл. 2). На Юбилейном месторождении мышьяковистый тетраэдрит встречается в сфалерите только тех труб, которые характеризуются повышенными содержаниями талька и кальцита.

Модули железистости тетраэдрит-теннантита и теннантита Яман-Касинского, Октябрьского и Узельгинского месторождений показывают близкие значения. Тетраэдрит-теннантит Артемьевского месторождения, так же как и тетраэдрит, характеризуется высокой железистостью (в среднем 59 %). Низкая медистость – характерная черта тетраэдрит-теннантита изученных сульфидных труб: модуль медистости в большинстве анализов не превышает 11–18 % (см. табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Примеры составов блеклых руд из палеогидротермальных труб колчеданных месторождений Урала (мас. %)

Examples of fahllore contents from the Urals massive sulphide deposit paleohydrothermal chimneys (wt. %)

N аншлафа	Cu	Ag	Fe	Zn	As	Sb	Te	Bi	S	Se	Сумма	Fe*	Sb*	Cu*	Формула
ЮБ12-115-5	38.14	0.23	1.27	6.64	5.25	22.00	-	-	26.68	-	100.2	18.3	71.9	-20.0	$(Cu_{9,60}Ag_{0,04}Zn_{9,64}(Fe_{0,36}Zn_{1,62})_{1,99}(As_{1,13}Sb_{2,89})_{4,02}S_{13,35})$
ЮБ12-115-5	37.94	0.17	1.37	6.66	6.33	20.40	-	-	27.46	-	100.4	19.4	66.3	-28.9	$(Cu_{9,42}Ag_{0,02}Zn_{9,45}(Fe_{0,39}Zn_{1,61})_{2,00}(As_{1,34}Sb_{2,64})_{3,99}S_{13,57})$
ЮБ12-115-5	38.27	0.18	1.52	6.62	7.63	18.10	-	-	26.85	-	99.29	21.2	59.1	-20.4	$(Cu_{9,58}Ag_{0,03}Zn_{9,61}(Fe_{0,43}Zn_{1,61})_{2,04}(As_{1,63}Sb_{2,36})_{3,99}S_{13,36})$
ЮБ12-115-5	40.40	0.05	3.59	5.78	20.90	0.30	-	-	28.77	-	99.86	42.1	0.9	-28.8	$(Cu_{9,35}Ag_{0,01}Zn_{9,36}(Fe_{0,95}Zn_{1,30})_{2,25}(As_{4,12}Sb_{0,04})_{4,16}S_{13,23})$
ЮБ12-115-5	40.23	0.05	3.39	6.32	20.80	0.18	-	-	29.10	-	100.1	38.6	0.5	-31.8	$(Cu_{9,27}Ag_{0,01}Zn_{9,27}(Fe_{0,89}Zn_{1,4})_{2,30}(As_{4,09}Sb_{0,02})_{4,11}S_{13,31})$
Яман-Касинское															
УК-7390-5	42.64	0.14	4.95	2.08	19.13	-	0.70	-	28.45	0.64	99.46	73.7	-	-0.1	$(Cu_{9,98}Ag_{0,02}Zn_{10,00}(Fe_{1,32}Zn_{0,47})_{1,79}(As_{3,80}Te_{0,08})_{3,88}(Se_{0,12}S_{13,21})_{13,33})$
УК-7390-5	43.15	0.00	4.15	2.07	21.38	-	0.18	-	29.12	0.61	100.9	70.2	-	-6.3	$(Cu_{9,90}(Fe_{1,08}Zn_{0,46})_{1,54}(As_{4,16}Te_{0,02})_{4,18}(Se_{0,11}S_{13,26})_{13,37})$
УК-7390-5	43.64	0.00	5.03	1.00	20.90	-	0.19	-	29.08	0.74	100.8	85.6	-	0.5	$(Cu_{10,01}(Fe_{1,31}Zn_{0,22})_{1,53}(As_{4,06}Te_{0,02})_{4,09}(Se_{0,14}S_{13,24})_{13,37})$
УК-SV-47	40.00	0.01	4.96	2.41	4.68	21.85	-	-	25.93	-	99.83	70.7	74.2	5.6	$(Cu_{10,11}(Fe_{1,43}Zn_{0,59})_{2,02}(As_{1,00}Sb_{2,88})_{3,88}S_{12,98})$
Валенторское															
Val-11-2	42.17	0.06	2.90	4.66	14.65	2.43	1.94	4.34	26.87	0.04	100.1	42.2	7.9	13.9	$(Cu_{10,26}(Fe_{0,80}Zn_{1,10})_{1,90}(As_{3,02}Sb_{0,31}Te_{0,23})_{3,88}S_{12,94})$
Val-11-4	41.41	0.67	2.51	4.63	14.68	2.04	2.06	4.65	25.85	0.02	98.52	38.8	6.7	23.1	$(Cu_{10,32}Ag_{0,10}Zn_{10,42}(Fe_{0,71}Zn_{1,12})_{1,83}(As_{3,10}Sb_{0,27}Te_{0,26}Bi_{0,35})_{3,98}S_{12,76})$
Val-11-5	42.60	0.03	2.25	5.68	15.99	2.13	0.75	3.90	27.34	0.04	100.7	31.7	6.9	10.7	$(Cu_{10,20}(Fe_{0,61}Zn_{1,32})_{1,93}(As_{3,25}Sb_{0,27}Te_{0,09}Bi_{0,28})_{3,89}S_{12,97})$
Val-11-6	42.42	0.03	2.47	5.77	16.99	2.93	0.07	2.44	27.87	0.04	101.0	33.4	9.2	1.2	$(Cu_{10,02}(Fe_{0,66}Zn_{1,32})_{1,99}(As_{3,40}Sb_{0,36}Bi_{0,18})_{3,95}S_{13,04})$
Молодежное															
Mol-08-21k	43.46	0.11	3.46	4.74	16.29	4.35	-	-	27.29	-	99.70	46.1	14.1	16.3	$(Cu_{10,32}Ag_{0,02}Zn_{10,34}(Fe_{0,93}Zn_{1,09})_{2,03}(As_{3,28}Sb_{0,54})_{3,82}S_{12,83})$
Mol-08-38	43.52	-	3.29	4.55	15.97	5.01	-	-	27.22	-	99.56	45.8	16.2	19.0	$(Cu_{10,37}(Fe_{0,89}Zn_{1,05})_{1,94}(As_{3,22}Sb_{0,62})_{3,85}S_{12,84})$
Mol-08-38	42.47	-	3.19	4.34	15.63	6.84	-	-	27.44	-	99.91	46.3	21.2	7.5	$(Cu_{10,14}(Fe_{0,87}Zn_{1,01})_{1,88}(As_{3,16}Sb_{0,85})_{4,01}S_{12,97})$
Mol-08-38	42.64	-	3.63	4.38	15.24	6.45	-	-	27.59	-	99.93	49.2	20.7	7.1	$(Cu_{10,14}(Fe_{0,98}Zn_{1,01})_{1,99}(As_{3,07}Sb_{0,80})_{3,87}S_{12,99})$
Октябрьское															
0-876-82с	39.40	0.01	2.20	7.88	16.17	6.16	-	0.71	27.30	-	99.82	24.6	18.8	-22	$(Cu_{9,46}(Fe_{0,60}Zn_{1,84})_{2,44}(As_{3,29}Sb_{0,77})_{4,12}S_{12,98})$
0-887-4	43.16	0.14	2.39	3.68	12.99	9.72	-	0.69	27.85	0.31	100.9	43.2	31.1	21	$(Cu_{10,32}Ag_{0,02}Zn_{10,34}(Fe_{0,65}Zn_{0,85})_{1,50}(As_{2,63}Sb_{1,21})_{3,89}S_{12,84})$
0-887-8	42.05	0.00	2.26	4.13	13.42	9.19	-	1.03	27.36	0.53	99.96	39.1	29.1	11.1	$(Cu_{10,18}(Fe_{0,62}Zn_{0,97})_{1,59}(As_{2,75}Sb_{1,16})_{3,99}(Se_{0,10}S_{13,14})_{13,24})$
Узельга-4															
UZ-09-4'	42.84	-	1.30	6.79	18.27	2.89	-	-	27.54	-	99.63	18.3	8.9	7.7	$(Cu_{10,15}(Fe_{0,35}Zn_{1,56})_{1,91}(As_{3,67}Sb_{0,36})_{4,03}S_{12,92})$
UZ-09-4'	43.42	-	1.22	7.06	17.65	2.79	-	-	27.72	-	99.86	16.8	8.9	12.4	$(Cu_{10,24}(Fe_{0,33}Zn_{1,62})_{1,95}(As_{3,53}Sb_{0,34})_{3,87}S_{12,94})$
UZ-09-zf	41.44	-	0.82	6.75	9.32	15.10	-	-	26.39	-	99.82	12.5	49.9	14.9	$(Cu_{10,27}(Fe_{0,23}Zn_{1,63})_{1,86}(As_{1,96}Sb_{1,95})_{3,91}S_{12,96})$
UZ-09-zf	41.36	-	0.91	6.91	8.32	16.07	-	-	26.23	-	99.80	13.4	54.3	15.47	$(Cu_{10,30}(Fe_{0,26}Zn_{1,67})_{1,93}(As_{1,76}Sb_{2,09})_{3,95}S_{12,93})$

Окончание таблицы 2

N	англифа	Cu	Ag	Fe	Zn	As	Sb	Te	Bi	S	Se	Сумма	Fe*	Sb*	Cu*	Формула
Узельга-1																
UZ-1	39.30	0.54	6.86	4.81	22.73	-	26.12	-	-	101.0	9.3	74.3	-3.6	74.3	-3.6	$(Cu_{9,95}Ag_{0,08})(Fe_{0,17}Zn_{1,68})(As_{1,04}Sb_{3,00})S_{13,10}$
UZ-1	38.68	0.70	6.88	1.90	26.86	-	25.38	-	-	100.9	7.4	89.6	-0.6	89.6	-0.6	$(Cu_{9,99}Ag_{0,11})(Fe_{0,14}Zn_{1,73})(As_{0,42}Sb_{3,62})S_{13,01}$
UZ-1	41.38	-	6.65	12.12	11.89	-	27.44	-	-	100.6	16.4	37.5	-0.4	37.5	-0.4	$Cu_{9,99}(Fe_{0,31}Zn_{1,56})(As_{2,49}Sb_{1,50})S_{13,15}$
UZ-1	38.19	0.68	6.8	1.8	27.38	-	25.61	-	-	100.8	5.8	90.3	-7.3	90.3	-7.3	$(Cu_{9,87}Ag_{0,10})(Fe_{0,11}Zn_{1,81})(As_{0,40}Sb_{3,69})S_{13,13}$
Александринское																
566-42c	43.84	-	0.83	8.16	18.50	2.47	27.49	0.27	101.7	10.6	7.6	10.05	10.05	7.6	10.05	$Cu_{10,21}(Fe_{0,22}Zn_{1,85})(As_{3,65}Sb_{0,30}Te_{0,02})S_{9,95}$ $(Se_{0,05}S_{12,70})S_{12,75}$
566-42c	42.98	-	0.65	7.96	18.57	0.99	28.33	0.00	99.64	8.8	3.2	2.53	2.53	3.2	2.53	$Cu_{10,05}(Fe_{0,17}Zn_{1,81})(As_{3,68}Sb_{0,12}Te_{0,02})S_{13,15}$
566-42c	43.00	-	0.65	7.97	18.59	0.99	28.39	0.17	99.93	8.8	3.2	1.55	1.55	3.2	1.55	$Cu_{10,03}(Fe_{0,17}Zn_{1,81})(As_{3,68}Sb_{0,12}Te_{0,02})S_{13,14}$
Сафьяновское																
Saf-069-1b	43.61	-	2.51	6.90	16.97	1.57	28.34	-	99.90	29.8	5.4	7.1	7.1	5.4	7.1	$Cu_{10,16}(Fe_{0,66}Zn_{1,56})(As_{3,35}Sb_{0,19})(S_{13,07})S_{13,07}$
Saf-069-28a	41.04	1.04	2.21	6.82	11.64	10.14	26.98	-	99.87	27.5	34.9	5.3	5.3	34.9	5.3	$(Cu_{9,97}Ag_{0,15})(Fe_{0,61}Zn_{1,61})(As_{2,40}Sb_{1,28})S_{12,98}$
Saf-069-50a	36.20	2.60	0.13	5.99	3.75	26.40	25.01	-	100.1	2.5	81.2	-4.4	-4.4	81.2	-4.4	$(Cu_{9,53}Ag_{0,40})(Fe_{0,04}Zn_{1,53})(As_{0,84}Sb_{3,62})S_{13,03}$
Saf-069-50a	35.14	3.16	0.05	6.04	-	30.65	24.34	-	99.38	1.0	99.9	1.0	1.0	99.9	1.0	$(Cu_{9,51}Ag_{0,50})(Fe_{0,02}Zn_{1,59})(Sb_{4,33})S_{13,05}$
Saf-069-50a	34.03	6.87	0.00	6.67	-	28.24	24.22	-	100.0	-	99.9	16.8	16.8	99.9	16.8	$(Cu_{9,20}Ag_{1,09})(Zn_{10,29}Sb_{3,98})S_{12,97}$
Николаевское																
H-07-60	43.82	-	3.67	5.41	18.96	0.01	28.13	-	99.99	44.3	0.0	7.6	7.6	0.0	7.6	$Cu_{10,16}(Fe_{0,97}Zn_{1,22})(As_{3,73}S_{12,92})S_{12,92}$
H-07-60	43.90	-	3.46	5.48	18.40	0.55	28.14	-	99.93	42.5	1.8	9.6	9.6	1.8	9.6	$Cu_{10,20}(Fe_{0,91}Zn_{1,24})(As_{3,63}Sb_{0,07})S_{12,95}$
H-07-60	43.45	-	4.43	4.74	19.02	0.01	28.25	-	99.89	52.3	0.0	3.1	3.1	0.0	3.1	$Cu_{10,07}(Fe_{1,17}Zn_{1,07})(As_{3,74}S_{12,96})S_{12,96}$
H-07-60	42.44	-	4.98	5.48	18.66	0.01	28.19	-	99.75	51.6	0.0	-6.2	-6.2	0.0	-6.2	$Cu_{9,84}(Fe_{1,31}Zn_{1,23})(As_{3,67}S_{12,94})S_{12,94}$
Артемьевское																
Ap-07-4д	37.91	4.18	3.83	3.15	8.53	16.12	26.15	-	99.87	58.7	53.8	8.7	8.7	53.8	8.7	$(Cu_{9,54}Ag_{0,62})(Fe_{1,10}Zn_{0,77})(As_{1,82}Sb_{2,12})S_{13,03}$
Ap-07-4г	32.21	9.62	4.97	2.02	7.10	17.89	25.42	-	99.23	74.2	60.8	-6.1	-6.1	60.8	-6.1	$(Cu_{8,40}Ag_{1,48})(Fe_{1,47}Zn_{0,51})(As_{1,57}Sb_{2,43})S_{13,13}$
Ap-07-4г	29.76	12.25	4.29	2.79	1.34	25.48	23.95	-	99.86	64.3	92.1	3.7	3.7	92.1	3.7	$(Cu_{8,11}Ag_{1,97})(Fe_{1,33}Zn_{0,74})(As_{0,31}Sb_{3,62})S_{12,92}$
Ap-07-4д	27.90	14.29	4.19	2.43	-	27.26	23.60	-	99.67	66.9	99.9	4.4	4.4	99.9	4.4	$(Cu_{7,75}Ag_{2,34})(Fe_{1,32}Zn_{0,66})(Sb_{3,95})S_{12,98}$
Ap-07-0a	29.58	12.49	3.67	3.01	0.04	27.40	23.69	-	99.88	58.8	99.8	9.0	9.0	99.8	9.0	$(Cu_{8,15}Ag_{2,03})(Fe_{1,15}Zn_{0,81})(Sb_{3,94})S_{12,92}$
Зареченское																
ZAR-08-	38.10	0.28	2.20	6.26	5.79	20.10	26.30	-	99.03	29.2	68.0	-16.1	-16.1	68.0	-16.1	$(Cu_{9,65}Ag_{0,04})(Fe_{0,63}Zn_{1,54})(As_{1,25}Sb_{2,65})S_{13,22}$
ZAR-08-	39.10	0.57	0.65	7.35	10.00	15.90	26.60	-	100.2	9.4	49.3	-15.6	-15.6	49.3	-15.6	$(Cu_{9,70}Ag_{0,08})(Fe_{0,18}Zn_{1,77})(As_{2,11}Sb_{4,06})S_{13,09}$
ZAR-08-	39.20	0.44	2.03	6.31	10.20	14.40	26.10	-	98.68	27.4	46.3	-9.4	-9.4	46.3	-9.4	$(Cu_{9,80}Ag_{0,06})(Fe_{0,58}Zn_{1,53})(As_{2,11}Sb_{1,88})S_{12,95}$
ZAR-08-	39.70	0.37	2.02	6.11	12.20	12.10	26.70	-	99.20	27.9	37.8	-11.7	-11.7	37.8	-11.7	$(Cu_{9,76}Ag_{0,05})(Fe_{0,57}Zn_{1,46})(As_{2,56}Sb_{1,55})S_{13,03}$
ZAR-08-	39.60	0.37	2.22	5.95	12.00	12.30	27.10	-	99.54	30.4	38.5	-15.7	-15.7	38.5	-15.7	$(Cu_{9,68}Ag_{0,05})(Fe_{0,62}Zn_{1,41})(As_{2,50}Sb_{1,57})S_{13,15}$

Примечание. Протерк – ниже предела обнаружения. Fe* = Fe/(Fe+Zn), Sb* = Sb/(As+Bi+Te+Sb), Cu* = 100(Cu-10)/(Fe+Zn).

Note. Dash – below of detection limit. Fe* = Fe/(Fe+Zn), Sb* = Sb/(As+Bi+Te+Sb), Cu* = 100(Cu-10)/(Fe+Zn).

В целом, в тетраэдрит-теннантите изученных труб содержания других элементов-примесей, характерных для блёклых руд (Te, Se, Co, Cd, Ni, Tl, Sn и др.), находятся ниже предела обнаружения микронзондовым анализом. В некоторых случаях исключение представляет Ag. Серебросодержащий мышьяковистый тетраэдрит (Ag 2–8 мас. %), наряду с собственно тетраэдритом («фрейбергитом») являются основными представителями блёклых руд в барит-колчеданно-полиметаллических трубах Артемьевского месторождения. На Октябрьском и Сафьяновском месторождениях в сурьмянистом теннантите появляются повышенные содержания Ag (до 1.65 мас. %). Однако, в целом, содержания Ag в тетраэдрит-теннантите гораздо ниже, чем в тетраэдрите этих же месторождений (см. табл. 2; рис. 12). В большинстве случаев содержания Ag в тетраэдрит-теннантите находятся ниже чувствительности микронзондового анализа.

Несмотря на то, что характерной чертой изученного ранее тетраэдрит-теннантита Узельгинского месторождения являются следы Hg (до 0.4–0.5 мас. %) (Мозгова др., 1979), в тетраэдрит-теннантите изученных сульфидных труб ощутимых количеств Hg не выявлено. Это обусловлено, вероятно, тем, что Hg концентрируется в колорадоите, ассоциирующем с тетраэдрит-теннантитом. Содержания Hg в тетраэдрит-теннантите Зареченского месторождения достигают 0.3 мас. %.

Тетраэдрит выделен по соотношению $Sb/(Sb+As+Te) > 3$. Встречаемость тетраэдрита по отношению к теннантиту и тетраэдрит-теннантиту Сафьяновского месторождения составляет 6 %. Среди блёклых руд сульфидных труб Артемьевского месторождения тетраэдрит является преобладающей разновидностью блёклых руд (63 %).

На Сафьяновском месторождении тетраэдрит представлен цинкистой разновидностью. Железистость тетраэдрита Сафьяновского месторождения гораздо ниже ($Fe/(Fe+Zn) = 0.01$) по сравнению с железистостью тетраэдрит-теннантита (0.29) и теннантита (0.32). На диаграмме Zn – Fe – Sb показано, что в блёклых рудах Сафьяновского, Узельгинского месторождений и поля ТАГ нарастают содержания Zn по мере увеличения количества Sb. Исключение составляет фрейбергит Артемьевского месторождения, характеризующегося более высокими отношениями Fe/Zn.

Тетраэдрит Артемьевского месторождения относится к железистой разновидности: модуль железистости в тетраэдрите варьирует незначительно

(0.54–0.74) при среднем значении 0.6. Медистость тетраэдрита изученных сульфидных труб определяется как низкая и лишь иногда достигает 16–27 %. В тетраэдрите отсутствуют ощутимые примеси Co и Te.

Ag-содержащий тетраэдрит выделен по содержаниям $Ag > 0.2$ мас. %. Содержания Ag (2.26–6.9 мас. %) в тетраэдрите сульфидных труб Сафьяновского месторождения на два порядка выше, чем в тетраэдрит-теннантите и теннантите. Гораздо более высокие концентрации Ag (до 18–29 мас. %) отмечаются в цинкистом тетраэдрите, ассоциирующем с буланжеритом, пираргиритом, полибазитом, фаматинитом и диафоритом в барит-сфалеритовых жилах (Мурзин и др., 2010).

Тетраэдрит, характеризующийся высокими содержаниями Ag (10–15.7 мас. %), широко представлен в сульфидных трубах Артемьевского барит-колчеданно-полиметаллического месторождения в ассоциации с арсенопиритом, самородным золотом и самородным висмутом. Судя по клас-

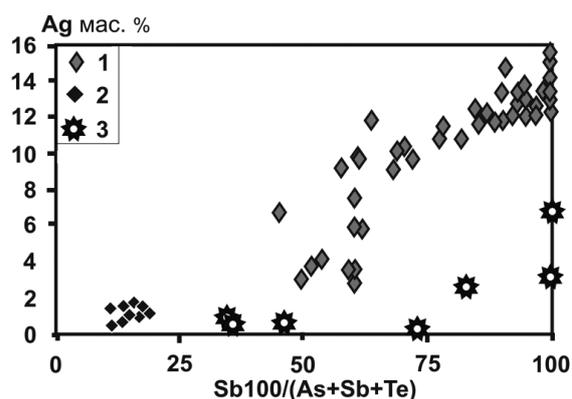


Рис.12. Зависимость концентрации Ag (мас. %) от процентного соотношения формульных коэффициентов полуметаллов $Sb100/(As+Sb+Te)$ в Ag-содержащих блёклых рудах:

1 – серебросодержащие тетраэдрит-теннантит (и мышьяковистый тетраэдрит) и тетраэдрит из сульфидных труб Артемьевского месторождения; 2, 3 – Ag-содержащий теннантит из «палеокурильщико» Валенторского и Сафьяновского колчеданных месторождений.

Fig. 12. The concentration of Ag (wt. %) versus ratio of formula coefficients (apfu) of semimetals $Sb100/(As+Sb+Te)$ in Ag-bearing fahlores:

1 – silver-tetrahedrite-tennantite (and arsenic tetrahedrite) and tetrahedrite from the sulphide chimneys of the Artemyevskoye deposit; 2, 3 – Ag-bearing tennantite in chimneys from the Valentorskoye and Safyanovskoye massive sulphide deposits.

Таблица 3
Table 3

Состав голдфилдита из сульфидной трубы «палеокурильщика» (обр. 7380-90-16) месторождения Яман-Касы

Goldfieldite content of «paleosmoker» sulphide chimney (sample 7380-90-16) from the Yaman-Kasy deposit

Cu	Te	S	As	Sb	Fe	Zn	Ag	Hg	Σ	Fe*	Sb*	Cu*	Формулы
40.5	32.14	25.9	0.20	0.47	0.5	0.0	0.08	0.54	100.3	75.0	1.5	24.5	$(\text{Cu}_{10.04}\text{Ag}_{0.01}\text{Sb}_{0.04}\text{Fe}_{0.13}\text{Hg}_{0.04})_{0.17}(\text{Te}_{3.97}\text{As}_{0.04}\text{Sb}_{0.06}\text{S}_{12.71})_{0.07}$
41.4	31.96	25.8	0.19	0.52	0.5	0.0	0.03	0.39	100.8	80.4	1.7	125.2	$(\text{Cu}_{10.21}\text{Fe}_{0.13}\text{Hg}_{0.03})_{0.17}(\text{Te}_{3.92}\text{As}_{0.04}\text{Sb}_{0.07}\text{S}_{12.59})_{0.07}$
41.3	31.98	26.0	0.24	0.73	0.5	0.0	0.13	0.15	101.0	92.6	2.3	82.7	$(\text{Cu}_{10.13}\text{Ag}_{0.02}\text{Sb}_{0.15}\text{Fe}_{0.15}\text{Hg}_{0.01})_{0.16}(\text{Te}_{3.91}\text{As}_{0.05}\text{Sb}_{0.09}\text{S}_{12.64})_{0.05}$
41.7	29.85	25.1	0.94	1.22	0.6	0.0	0.06	0.30	99.8	84.5	3.9	212.1	$(\text{Cu}_{10.39}\text{Ag}_{0.01}\text{Sb}_{0.16}\text{Fe}_{0.16}\text{Hg}_{0.02})_{0.18}(\text{Te}_{3.70}\text{As}_{0.20}\text{Sb}_{0.16}\text{S}_{12.36})_{0.16}$
41.0	32.33	26.1	0.00	0.54	0.6	0.2	0.02	0.40	101.1	70.0	1.7	28.9	$(\text{Cu}_{10.07}\text{Fe}_{0.17}\text{Zn}_{0.04}\text{Hg}_{0.03})_{0.24}(\text{Te}_{3.95}\text{Sb}_{0.07}\text{S}_{12.67})_{0.02}$
41.3	31.09	26.0	0.73	0.97	0.4	0.0	0.07	0.47	100.9	72.8	3.0	104.0	$(\text{Cu}_{10.14}\text{Ag}_{0.01}\text{Sb}_{0.15}\text{Fe}_{0.10}\text{Hg}_{0.04})_{0.13}(\text{Te}_{3.80}\text{As}_{0.15}\text{Sb}_{0.12}\text{S}_{12.64})_{0.08}$
41.3	32.33	25.6	0.11	0.52	0.5	0.0	0.13	0.32	100.8	80.9	1.6	130.7	$(\text{Cu}_{10.20}\text{Ag}_{0.02}\text{Sb}_{0.13}\text{Fe}_{0.13}\text{Hg}_{0.03})_{0.16}(\text{Te}_{3.98}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.07}\text{S}_{12.55})_{0.07}$
40.6	28.87	25.6	1.40	1.24	0.5	0.0	0.22	0.32	98.68	85.4	4.0	69.7	$(\text{Cu}_{10.12}\text{Ag}_{0.03}\text{Sb}_{0.15}\text{Fe}_{0.15}\text{Hg}_{0.03})_{0.17}(\text{Te}_{3.59}\text{As}_{0.30}\text{Sb}_{0.16}\text{S}_{12.63})_{0.04}$
40.6	31.21	25.7	0.48	0.74	0.5	0.0	0.24	0.15	99.56	91.7	2.4	66.6	$(\text{Cu}_{10.09}\text{Ag}_{0.04}\text{Sb}_{0.13}\text{Fe}_{0.13}\text{Hg}_{0.01})_{0.14}(\text{Te}_{3.86}\text{As}_{0.10}\text{Sb}_{0.10}\text{S}_{12.67})_{0.10}$
40.1	30.97	25.7	0.40	0.79	0.5	0.1	0.09	0.47	99.03	71.1	2.5	17.3	$(\text{Cu}_{10.03}\text{Ag}_{0.01}\text{Sb}_{0.15}\text{Fe}_{0.14}\text{Zn}_{0.02}\text{Hg}_{0.04})_{0.20}(\text{Te}_{3.86}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.10}\text{S}_{12.71})_{0.05}$

Примечание. Анализы выполнены на микрозонде Camebax SX-50 в Музее Естественной Истории (Лондон, Великобритания), аналитик К. Стенли. Формула минерала рассчитана на 27 формульных коэффициентов.

Note. Analyses were carried out in Camebax SX-50 (NHM, London, England), analyst K. Stanley. Mineral formula designed for 27 formula coefficients.

сификации Э.М. Спиридонова (1985), тетраэдрит Артемьевского месторождения по содержаниям Ag должен называться «фрейбергит» (Ag 10–24 мас. %). Однако в последнее время статус «фрейбергита» обсуждается (Moëlo et al., 2008). Судя по диаграмме Ag–Sb/(As+Sb) тетраэдрит образует непрерывный ряд с Ag-содержащим тетраэдрит-теннантитом (см. рис. 12).

Таким образом, для Сафьяновского и Артемьевского месторождений наблюдается положительная корреляция Ag с Sb, широко известная в блёклых рудах ряда золоторудных месторождений (Спиридонов, 1987). В блёклых рудах современной колчеданообразующей системы ТАГ такая корреляция не проявляется (Мозгова и др., 1995).

Содержания других химических элементов, характерных для блёклых руд, в тетраэдрите изученных труб находится ниже чувствительности микрозондового анализа. Следует заметить, что в сульфидных трубах отсутствует Cd-содержащий тетраэдрит, ранее обнаруженный на Сафьяновском месторождении (Бахтина и др., 1991).

Голдфилдит. К голдфилдиту в данной статье отнесены блёклые руды с формульным коэффициентом $Te > 2$. Его свинцово-серые тетраэдрические кристаллы размером менее 5 мкм встречены в кварце, заполнившем интерстиции в агрегатах марказита в осевой части пирит-кварц-марказит-халькопирит-сфалеритовых и халькопирит-сфалерит-пирит-марказит-кварцевых труб Яман-Касинского месторождения (Масленников, 1999; Масленникова, Масленников, 2007; Maslennikov et al., 2013).

В большинстве случаев голдфилдит, обнаруженный на месторождении Яман-Касы, характеризуется крайне низкими содержаниями As, Sb, Fe, Zn и максимальными содержаниями Te (28.87–32.33 мас. %) (табл. 3). Они превышают максимальные значения, известные в литературе (24.04 мас. %) (Новгородова и др., 1978; Мозгова, Цепин, 1983; Сахарова и др., 1984; Плотинская и др., 2005; Ненашева, 2009) (см. рис. 10). Максимальные формульные коэффициенты Te, известные в природном голдфилдите, не превышают значение 3.4 (Ненашева, 2009).

Согласно экспериментальным данным, для Te можно ожидать существование полной смешимости с As или Sb вплоть до крайней теллу-

ристой блёклой руды, подобной тетраэдриту и теннантиту (Мозгова, Цепин, 1983). Множество химических данных, полученных по изоморфному ряду тетраэдрит-голдфилдит, показывает изоморфное замещение $(\text{Sb,As})^{3+}$ на Te^{4+} (Shimizu, Stanley, 1991). Формула голдфилдита в своем полном выражении должна иметь вид $\text{Cu}^{12-y}\text{Te}^{4+}_{2+y}(\text{Sb,As})^{3+}_{2-y}\text{S}_{13}$, где $y = 0-2$. Идеальный синтетический голдфилдит имеет формулу $\text{Cu}_{10.23}\square\text{Te}_{4.12}\text{S}_{13}$, где \square – вакансия (Kagur-Möller, 1994). Формула яман-касинского голдфилдита $\text{Cu}_{10.22}\text{Te}_{4.12}\text{S}_{13}$, рассчитанная на 13 атомов серы, близка к формуле синтетического аналога (Масленникова, Масленников, 2007). Однако более совершенной представляется формула, рассчитанная на 27 атомов (см. табл. 4).

Содержания меди в проанализированном голдфилдите варьируют от 40.25 до 41.24 мас. %. Корреляция Cu и Te в формуле голдфилдита обратная по сравнению с той, которая наблюдается для теллурсодержащих разновидностей теннантита, характеризующихся низкими значениями формульного коэффициента теллура ($\text{Te} < 2$). В голдфилдите формульный коэффициент Cu^+ уменьшается от 12 до 10 по мере нарастания количества теллура в связи с появлением вакансий в позиции Me^{2+} (Trudu, Knittel, 1998), чтобы сбалансировать увеличение заряда, вызванное значительным изоморфным замещением трехвалентных полуметаллов четырехвалентным теллуром. Действительно, изученный нами голдфилдит характеризуется низкими значениями формульного коэффициента Cu (10.04–10.21), что соответствует синтетическим аналогам этого минерала. Вместе с тем, голдфилдит, в отличие от других видов блёклых руд, встречающихся в изученных сульфидных трубах, характеризуется высокими значениями модуля медистости, поскольку содержания Fe+Zn в данном случае крайне низкие (см. табл. 4).

Содержания серебра в яман-касинском голдфилдите редко превышают 0.2 мас. %, что соответствует максимальному формульному коэффициенту 0.04 (см. табл. 4).

Обычно, повышенные содержания Fe, так же как и Zn в известных анализах голдфилдита, имеющих формульные коэффициенты $\text{Te} > 2$, не встречаются (Trudu, Knittel, 1998). В отличие от теллурсодержащего теннантита, в яман-касинском голдфилдите определены незначительные содержания Fe (0.24 до 0.87 мас. %) (см. табл. 4). Влияние матрицы на анализ железа следует исключить, поскольку, кристаллы голдфилдита встречены в кварце «вдали»

от зерен марказита. В целом, отношение $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Zn})$ в голдфилдите (0.88–1) лишь немного ниже, чем в теллурсодержащем теннантите из этого же месторождения.

Цинк в большинстве кристаллов голдфилдита либо не обнаружен, либо определен в незначительных количествах (менее 0.01–0.17 мас. %) (см. табл. 4). Лишь в некоторых мелкозернистых агрегатах голдфилдита содержания Zn достигают 2 мас. %, вероятно, за счёт микровключений сфалерита (Масленникова, Масленников, 2007). Выделение цинкистого голдфилдита как разновидности требует дальнейших исследований.

За исключением Hg (0.15–0.54 мас. %) в яман-касинском голдфилдите не обнаружены возможные металлы такие, как Pb, Cd и Mn. Ртуть является типичным представителем серии тетраэдрит → шватцит. Из литературных источников известны находки теллуристого тетраэдрита, содержащего Hg (Минералы, 1960; Мозгова и др., 1979; Trudu, Knittel, 1998;). Двухвалентная ртуть обычно замещает другие двухвалентные металлы, такие как Fe и Zn (Kalbscopf, 1971). Основными носителями ртути в теллуридно-халькопиритовой ассоциации труб является колорадоит, в теннантит-сфалеритовой – сфалерит. В отсутствие сфалерита и колорадоита в марказит-кварцевой ассоциации носителем ртути оказывается голдфилдит.

Обсуждение результатов

Установленная ранее зависимость минерального состава «курильщиков» от состава рудовмещающих формаций (Масленников и др., 2010), дополняется и подтверждается данными по блёклым рудам. В рудно-формационном ряду колчеданных месторождений по мере нарастания в геологическом разрезе кислых вулканитов по отношению к основным меняется минеральный состав сульфидных труб «курильщиков» от медно-колчеданных и медно-цинково-колчеданных к барит-колчеданно-полиметаллическим. В этом же направлении по мере нарастания количества сфалерита, кварца и барита наблюдается смена теллуридных и сульфидных ассоциаций галенит-блёкловорудными с самородным золотом или электрумом.

Полученные материалы, за исключением данных по Николаевскому и Сафьяновскому месторождениям согласуются с выводами Е.А. Радкевич (1940) о преимущественно мышьяковой специализации блёклых руд колчеданных месторождений

Урала, и сурьмянистой – Рудного Алтая. В изученных сульфидных трубах из медно-цинковоколчеданных месторождений Урала, залегающих на породах яшмоносной риолит-базальтовой формации, преобладает теннантит, реже встречается тетраэдрит-теннантит. Основное количество тетраэдрит-теннантита связано с гидротермальными трубами, богатыми либо сфалеритом (Узельга-1), либо пиритом (Яман-Касы).

Изученные колчеданные месторождения черносланцевой риодацитово-формации могут быть упорядочены по увеличению содержания Sb в блёклых рудах: Николаевское (теннантит) → Сафьяновское (теннантит, теннантит-тетраэдрит, тетраэдрит) → Артемьевское (тетраэдрит-теннантит, при доминировании тетраэдрита) → Зареченское (мышьяковистый тетраэдрит). В данном ряду в рудах месторождений увеличиваются содержания барита и галенита, а в блёклых рудах возрастает количество серебра. В этом же ряду уменьшаются объемы углеродистых пелитолитов в подрудной риодацитовой толще месторождений. Предполагается, что состав блёклых руд зависит от соотношения риолитов и черных сланцев.

В целом, значительная часть блёклых руд, обнаруженных в сульфидных трубах, характеризуется дефицитом (Sb+As), который может достигать 0.5 атома на формулу, что в 1.5 раза превышает максимальный дефицит, отмечавшийся в блёклых рудах месторождений континентов (Мозгова, Цепин, 1983). Аналогичный дефицит, установленный в блёклых рудах черных курильщиков гидротермальных полей ТАГ и ВТП, объясняется низкой концентрацией этих элементов в минералообразующих растворах (Мозгова и др., 1995). Другое объяснение может быть связано с возможным частичным участием As^{5+} , вместо As^{3+} . Это предположение требует специального обоснования.

Судя по ассоциации с марказитом, в большинстве случаев теннантит формировался в условиях с низким pH (Murowchick, Barnes, 1986). Тетраэдрит обычно встречается в трубах, где появляются барит, кальцит и тальк. Ассоциация с тальком, кальцитом и баритом свидетельствует о том, что тетраэдрит формировался в более окислительных, низкотемпературных субщелочных условиях, чем теннантит. Такие условия могут быть обеспечены смешением гидротермальных флюидов с большим количеством субщелочной холодной морской водой, обладающей высоким окислительным потенциалом. Экспериментально установлено, что с по-

нижением температуры возрастает сурьмянистость блёклых руд, ассоциирующих с энаргитом и фама-тинитом (Feiss, 1974). Другими экспериментальными данными показано, что комплексные анионы мышьяка $(AsS_3)^{3-}$ (необходимые для образования теннантита) являются устойчивыми в слабокислых и нейтральных растворах. Комплексные анионы сурьмы $(SbS_3)^{3-}$, необходимые для формирования тетраэдрита, приобретают устойчивость только в щелочных средах, а в нейтральных и слабокислых условиях они распадаются (Бабко, Лисецкая, 1956). Эти экспериментальные данные привлекаются для объяснения возможности формирования тетраэдрита и теннантита при различных pH (Кемкина, Кемкин, 2010).

Идея повышения pH, фугитивности серы и снижения температуры при формировании тетраэдрита согласуется с данными по пробности самородного золота. Для сульфидных труб изученных месторождений характерна ассоциация теннантита с высокопробным самородным золотом (Яман-Касы, Александринское, Молодежное, Валенторское месторождения), тогда как электрум ассоциирует с тетраэдритом (Юбилейное, Артемьевское, Сафьяновское, Узельга-1 месторождения). Электрум-тетраэдритовая ассоциация установлена нами в трубах колчеданных месторождений Кызылкая в Понтидах (Турция) и Матсумайн в Хокуроко (Япония). Известно, что электрум, по сравнению с высокопробным золотом, формируется при повышении pH и снижении температуры минералообразующих растворов (Shikazono, 1985).

Установлено, что железистость теннантита сульфидных труб колчеданных месторождений яшма-риолит-базальтовой формации находится в зависимости от глубины залегания базальтов в подрудной толще или доли кислых вулканитов. Железистость теннантита убывает (Fe^* от 85 до 11 %) в ряду колчеданных месторождений Урала по мере увеличения мощности подрудных кислых вулканитов, отделяющих рудные тела от базальтового основания: Яман-Касы → Валенторское → Молодежное → Октябрьское → Узельга-4 → Узельга-1 → Александринское. Исключение представляет Юбилейное месторождение, в теннантите которого содержания Fe умеренные, несмотря ассоциацию этого месторождения с базальтами и бонинитами. Еще более крайними членом этого ряда могут быть колчеданные месторождения яшма-базальт-риолитовой формации Понтид (Турция) и Хокуроко (Япония), где сульфидные трубы курильщиков

содержат высокоцинкистые теннантиты ($Fe^{*} = 6-7\%$), а мощность подрудной толщи кислых вулканитов превышает 300–400 м.

Нарастание цинкистости блёклых руд может быть связано с повышением окислительного потенциала растворов (Спиридонов и др., 1990). Можно предполагать, что, в отличие от базальтов, риодациты, находившиеся на пути гидротермальных флюидов, не поставляли в раствор значительного количества Fe^{2+} , необходимого для формирования железистых разновидностей блёклых руд.

Первое исключение из этого правила представляют блёклые руды тальк-пирит-халькопирит-сфалеритовых труб Юбилейного медноколчеданного месторождения. Несмотря на ассоциацию с бонинитами, в ассоциации со сфалеритом и электрумом находится в основном тетраэдрит-теннантит. Присутствие талька и кальцита свидетельствует о значительном смещении гидротермальных флюидов с морской водой. Появление кальцита свидетельствует о щелочных условиях, благоприятных для формирования тетраэдрита.

Второе исключение из этого правила представляют колчеданные месторождения, относящиеся к черносланцевой риодацитовой формации (Николаевское, Сафьяновское, Артемьевское). Блёклые руды сульфидных труб этих месторождений характеризуются повышенной железистостью (32–60%), несмотря на то, что кислые вулканиты содержат гораздо меньшее количество железа, чем базальты. Вероятно, богатые органическим веществом отложения, так же как и базальты, поддерживали высокий восстановительный потенциал поднимающихся гидротермальных флюидов, необходимый для эффективного переноса Fe^{2+} .

Почти все виды и разновидности блёклых руд, обнаруженные в сульфидных трубах, характеризуются низкими значениями модуля медистости (0–32%). Это должно свидетельствовать о пониженном окислительном потенциале гидротермальных флюидов (Спиридонов, 1990). Исключение составляет голдфилдит, характеризующийся аномально высокими значениями Cu (24–27%). Считается, что высокая «медистость» голдфилдита свидетельствует о повышенном окислительном потенциале условий минералообразования (Спиридонов и др., 1987). Наиболее благоприятными рН условиями для формирования голдфилдита считаются субнейтральные и субщелочные, а нижним температурным пределом устойчивости – 180° С (Kalbskopf, 1974). Ассоциация голдфилдита с мар-

казитом, устойчивым при температурах < 240° С (Murowchick, Barnes, 1986) позволяет определить температурный интервал его формирования – 180–240° С. Эти данные согласуются со средними температурами гомогенизации включений в кварце сульфидных труб этого месторождения (Симонов и др., 2006). Однако ассоциация с марказитом должна свидетельствовать и о низких рН минералообразования (Murowchick, Barnes, 1986). Вместе с тем, установленная зависимость содержаний Cu и $(Fe+Zn)$ от количества теллура, согласуется с полученными ранее обобщающими данными по теллуросодержащим блёклым рудам (Trudu, Knittel, 1998).

В целом, теллуросодержащие блёклые руды встречаются в гидротермальных трубах тех колчеданных месторождений, где наиболее распространены разнообразные теллуриды. Повышенные концентрации Te , Bi , Ag и Hg вероятнее всего унаследованы от теллуридов и сульфоарсенидов, которые несут признаки растворения и замещения блёклыми рудами. С другой стороны, блёклые руды, тесно ассоциирующие с гесситом, тетрадимитом и колорадоитом в сульфидных трубах, нередко характеризуются низкими содержаниями Te , Ag , Bi и Hg . Вероятно, на начальной стадии минералообразования, характеризующейся восстановительными условиями, значительная часть этих элементов фиксировалась в составе теллуридов. При более окислительных условиях, неблагоприятных для формирования теллуридов, эти элементы, в том числе и в окисленных формах (Te^{4+} и Bi^{3+}), могли поступать в блёклые руды. Судя по первым данным, Te , Ag , Bi и Hg в значительных количествах появляются в новообразованных блёклыми рудами, входящих в состав обломочных сульфидных отложений, преобразованных в окислительных условиях. Это наблюдение требует дальнейшего статистического подтверждения при сравнении блёклых руд, принадлежащих к различным рудным фациям.

Безусловно, состав минералов чёрных курильщиков зависит не только от состава вмещающих пород. В рамках рециклинговой модели предполагается, что из материнской породы должен происходить не только более поздний вынос цинка по отношению к железу, но и более поздний вынос сурьмы по отношению к мышьяку. Другими словами, состав блёклых руд должен зависеть от зрелости рециклинговой гидротермально-метасоматической системы. Верификация этого предположения проведена на основе физико-химического моделирования.

В рамках модели рециклинга наиболее вероятным источником металлов для гидротермальных рудообразующих систем дна океана являются породы основного состава: габбро, базальты. В программе «Селектор» выполнено физико-химическое моделирование процесса взаимодействия осадков, содержащих органическое вещество и базальтов в гидротермальных условиях при температуре 350°С и давлении 25 МПа. При моделировании 1 кг породы реагировал с 1 кг морской воды по схеме степени протекания реакции или изменения параметра $\xi = \lg(\text{порода/морская вода})$. Построение графиков выполнялось по специальной методике и написанному на языке VBA алгоритму, что позволило существенно повысить точность отображения информации, рассчитываемой в программе «Селектор». Для двух соотношений порода/морская вода (0.07 и 0.035) выполнено моделирование охлаждения гидротермального раствора. В этих расчетах морская вода реагировала с породой, полученный раствор отделялся от твердых фаз и охлаждался или до придонной температуры 2°С, или же до 300°. Моделирование выполнялось либо по схеме проточного реактора (Гричук, 2000) с шагом 5°, либо раствор мгновенно охлаждался до нужной температуры. Установлено, что максимальная экстракция главных рудообразующих элементов колчеданных месторождений происходит из базальта в кислых восстановительных условиях: железа $2.9 \cdot 10^{-3}$ моль при $\xi = \lg(\text{порода/морская вода}) = 2.1$, цинка $3.3 \cdot 10^{-4}$ при $\xi = 0.625$ и меди $5.02 \cdot 10^{-5}$ при $\xi = 1.4$. Сурьма в гидротермальном растворе переносится в виде $\text{Sb}(\text{OH})_4^-$. При этом содержания Sb в новообразованном флюиде монотонно возрастают по мере созревания гидротермально-метасоматической системы базальт/морская вода (рис. 13).

Более сложное поведение отмечается для As, которое определяется как наличием или отсутствием теннантита в измененной породе, так и Eh системы. В окислительных условиях преобладает комплекс $\text{H}_2\text{AsO}_4(\text{As}^{5+})$, а в восстановительных – $\text{H}_3\text{AsO}_3^0(\text{As}^{3+})$. Содержания As в гидротермальном флюиде резко снижаются на границе перехода кислых условий к слабокислым ($\xi +1.5 - +1.2$). Это связано с фиксацией теннантита в возникшем метасоматите при смене pH условий минералообразования. Именно в этот период в растворе Sb доминирует над As, что, вероятно, могло обеспечить понижение мышьяковистости ($\text{As}/(\text{As}+\text{Sb})$) блёклых руд в «палеокурильщиках» при поступлении таких рас-

творов на морское дно. По мере созревания гидротермально-метасоматической системы содержания As по данным расчетов должны немного варьировать, но не возрастать. Напротив, содержания Sb растут неуклонно. Вовлечение таких флюидов в восходящую ветвь должно было бы уменьшить мышьяковистость блёклых руд в «палеокурильщиках». Исходя из того, что в присутствии кислых вулканитов увеличивается скорость созревания гидротермальной системы (Гричук, 2012) можно объяснить снижение мышьяковистости блёклых руд в «палеокурильщиках» колчеданных месторождений, ассоциирующих в основном с кислыми вулканитами (тип куроко и Артемьевское месторождение алтайского типа). Все это происходит на фоне возрастания содержаний Zn и Ag растворов при некотором снижении их железистости, что в целом согласуется с изменениями содержаний этих элементов в блёклых рудах по мере нарастания в разрезе доли кислых вулканитов, например, на месторождениях рудно-формационного типа куроко.

Однако следует заметить, что тетраэдрит из Артемьевского месторождения содержит много Fe, что может быть связано с дополнительным взаимодействием морской воды с органическими илами. Действительно, расчёты показали, что при взаимодействии морской воды с осадками (впадина Гуаймас) поле высоких концентраций Fe^{2+} значительно расширяется (см. рис. 13). С другой стороны, максимальные содержания As в растворе ($6.5-8 \cdot 10^{-5}$ моль) достигаются при изменении осадка, богатого органическим веществом (см. рис. 13). Содержания его неуклонно растут параллельно росту содержаний Sb и всегда выше последних. Таким образом, по мере созревания гидротермально-метасоматической системы осадок/морская вода уменьшения мышьяковистости не происходит и основным представителем блёклых руд в «палеокурильщиках» является теннантит (Николаевское месторождение).

Заключение

Получены первые систематические данные по составу и условиям нахождения блёклых руд в сульфидных трубах палеозойских «курильщиков» Урала и Рудного Алтая. Установлена зависимость состава блёклых руд от рудно-формационных типов колчеданных месторождений и состава рудовмещающих формаций. Теннантит преобладает в

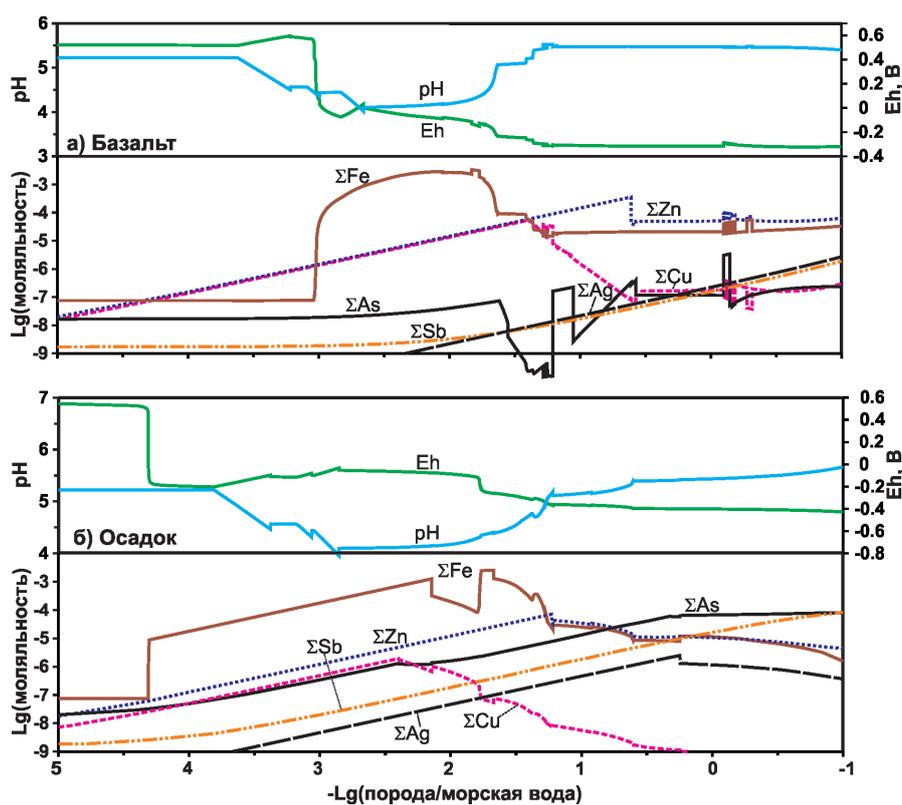


Рис. 13. Графики эволюции Eh, pH и суммарных содержаний элементов в растворе, прореагировавшем с базальтом (а), осадком (б) впадины Гуаймас, обогащенным органическим веществом (в) при температуре 350 °С и давлении 25 МПа в зависимости от логарифма отношения порода/морская вода (х).

Fig. 13. Graphs evolution of Eh, pH and total content of elements in the solution reacted with basalt (а), the sediment (б) of Guaymas depression enriched by organic substance (в) at a temperature of 350° C and a pressure of 25 MPa depending on the logarithm of the ratio (в) rock/seawater (х).

рудах медно-цинково-колчеданных месторождений, залегающих на вулканитах как риолит-базальтовой (большинство на Урале), так и черносланцевой риодацитов (Николаевское) формаций. Доля тетраэдрит-теннантита и тетраэдрита возрастает в ряду колчеданно-полиметаллических месторождений черносланцевой риодацитоидной формации по мере убывания в подрудных толщах доли углеродистых пелитолитов.

Железистость теннантитов в сульфидных трубах уменьшается от цинкисто-железистых до цинкистых разновидностей по мере уменьшения в подрудных комплексах доли базальтов по отношению к кислым вулканитам в ряду уральских медно-цинково-колчеданных месторождений. В конце этого ряда находятся сульфидные трубы месторождений Хокуроко и Понтид, залегающие на базальт-риолитовых комплексах. Исключение составляют месторождения риодацитоидной формации, где в подрудных толщах присутствуют горизонты угле-

родистых пелитолитов. Медистость блёклых руд, встречающихся в сульфидных трубах – низкая. Наряду с этим, наблюдается дефицит As+Sb. На месторождениях, богатых теллуридами, встречаются теллуристые блёклые руды, вплоть до появления голдфилдита. Содержания Cu и (Fe+Zn), находятся в зависимости от содержаний Те в блёклых рудах. Появление в блёклых рудах примесей Ag, Bi, Hg и Co коррелируется с признаками растворения и исчезновением гессита, теллурувисмутита, колорадоита и глаукодоита, соответственно. В отсутствие гессита в колчеданно-полиметаллических трубах возникли кали серебристые тетраэдрит-теннантиты и тетраэдриты. Однако, для многих месторождений уральского типа, находящихся в середине рудно-формационного ряда, в сульфидных трубах наблюдаются казалось бы «несовместимые» ассоциации теллуридов и блёклых руд.

Установленная зависимость состава блёклых руд от составов вмещающих пород находит своё

объяснение в рамках рециклинговой модели, предусматривающей взаимодействие гидротермальных флюидов с морской водой и вмещающими породами. Модель объясняет нарастание сурьмянистости блёклых руд в рудно-формационном ряду колчеданных месторождений по мере нарастания в рудовмещающих толщах количества кислых вулканитом, а значит и нарастания «зрелости» магматогенно-гидротермальной системы. Показано, как присутствие органогенных илов усложняет эту модель.

Работы выполнялись по проекту РФФИ (№ 14-05-00630).

Литература

- Бабко А.К., Лисецкая С.О.* О равновесии реакций тиосолей олова, сурьмы и мышьяка в растворах // Журнал неорганической химии. 1956. № 5. С. 969–980.
- Бахтина А.П., Мурзин В.В., Литошко Д.Н.* Теннантит-тетраэдрит / Минералогия Урала. Свердловск: УрО РАН. 1991. С. 38–51.
- Борисова Е.А., Бородаев Ю.С., Бочарова Г.И.* Редкие разновидности блёклых руд одного из золоторудных месторождений // Зап. ВМО. 1986. № 3. С. 85–94.
- Бортников Н.С., Некрасов И.Я.* Состав и фазовые взаимоотношения теннантита в системе Cu-Fe-As-S при 500° С // ДАН СССР. 1987. Т. 297. № 2. С. 449–451.
- Бресковска В.В., Мозгова Н.Н., Бортников Н.С., Цетин А.И.* Особенности химического состава блёклых руд свинцово-цинковых месторождений Родоп, Болгария // Известия АН СССР. Сер. геол. 1984. № 1. С. 78–84.
- Гаськов И.В.* Особенности развития колчеданных рудно-магматических систем в островодужных обстановках Рудного Алтая и Южного Урала // Литосфера. 2015. № 2. С. 17–39.
- Гричук Д. В.* Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М.: Научный мир, 2000. 304 с.
- Еремин Н.И.* Дифференциация вулканогенного сульфидного оруденения. М.: МГУ, 1983. 256 с.
- Зайков В.В.* Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин (на примере колчеданосных зон Урала и Сибири). Изд. 2-ое, доп. М.: Наука, 2006. 428 с.
- Кемкина Р.А., Кемкин И.В.* Химическая неоднородность и минералогическая зональность блёклых руд месторождения Купол (<http://zhurnal.apere.larn.ru/articles/2010/013.pdf>).
- Коваленкер В.А., Тронева Н.В., Доброниченко В.В.* Особенности состава главных рудообразующих минералов трубообразных рудных тел Кочбулакского месторождения // Методы исследования рудообразующих сульфидов и их парагенезисов. М.: Наука, 1980. С. 140–164.
- Коваленкер В.А., Цонев Д., Бресковска В.В., Малов В.С., Тронева Н.В.* Новые данные по минералогии медно-колчеданных месторождений Центрального Среднегорья Болгарии // Метасоматизм, минералогия и вопросы генезиса золотых и серебряных месторождений. М.: Наука, 1986. С. 91–110.
- Контарь Е.С., Либарова Л.Е.* Металлогения меди, цинка, свинца на Урале. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 233 с.
- Масленников В.В.* Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс: Геотур, 1999. 348 с.
- Масленников В.В.* Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 384 с.
- Масленников В.В., Леин А.Ю., Масленникова С.П., Богданов Ю.А.* Фанерозойские «черные курильщики» как индикаторы состава рудовмещающих комплексов // Литосфера. 2010. N 3. С. 153–162.
- Масленникова С.П., Масленников В.В.* Сульфидные трубы палеозойских «чёрных курильщиков» (на примере Урала). Екатеринбург-Миасс: УрО РАН, 2007. 312 с.
- Минералы. Справочник / Чухров Ф.В., Бронштедт-Куплетская Э.М.* Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 618 с.
- Мозгова Н.Н., Цетин А.И.* Блёклые руды (особенности химического состава и свойств). М.: Наука, 1983. 280 с.
- Мозгова Н.Н., Цетин А.И., Озерова Н.А., Бортников Н.С., Тронева Н.В.* Ртутьсодержащие блёклые руды // ЗВМО. 1979. Ч. CVIII. Вып.4. С. 437–453.
- Мозгова Н.Н., Бородаев Ю.С., Ефимов А.В., Краснов С.Г., Степанова Т.В., Сахарова М.С., Лебедева Н.В., Чубаров В.М.* Первая находка на Камчатке редких минералов теллура – голдфилдита, раклиджита, самородного теллура // ДАН СССР. 1984. Т. 278. № 5. С. 1217–1220.
- Мозгова Н.Н., Бородаев Ю.С., Ефимов А.В., Краснов С.Г., Степанова Т.В., Самоваров М.Л.*

Особенности химического состава блеклых руд из гидротермальных образований срединно-океанических хребтов (постройка «Мир», поле ТАГ, 26° с.ш. Срединно-Атлантического хребта) // Зап. РМО. 1995. Вып. 5. С. 77–84.

Моралев Г.В., Бортников Н.С., Малов В.С. Химический состав блеклых руд в связи с условиями рудообразования месторождения // Геология рудных месторождений. 1988. № 4. С. 116–121.

Мурзин В.В., Варламов Д.А., Ярославцева Н.С., Молошаг В.П. Минералогия и строение барит-сульфидных жил Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал) // Уральский минералогический сборник. Миасс-Екатеринбург: УрО РАН. 2010. С. 12–19.

Ненашева С.Н. Особенности состава теллуросодержащих блёклых руд // Новые данные о минералах. М. 2009. Вып. 44. С. 34–44.

Новгородова М.И., Цетин А.И., Дмитриева М.Т. Новый изоморфный ряд в группе блеклых руд // Зап. ВМО. 1978. Ч. 107. Вып. 1. С. 100–110.

Плотинская О.Ю., Коваленкер В.А., Русинов В.Л., Селтманн Р. Осцилляторная зональность в голдфилдите эпитеpmальных золоторудных месторождений // Доклады РАН. 2005. Т. 403. № 2. С. 237–241.

Прокин В.А., Серавкин И.Б., Виноградов А.М. Геологические условия размещения и перспективы выявления крупных медноколчеданных месторождений на Урале // Литосфера. 2011. № 6. С. 123–133.

Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: Дизайн Полиграф Сервис, 2010. 280 с.

Пшеничный Г.Н., Волькинштейн М.Я., Николайченков Ю.С. Новоучалинское медно-цинково-колчеданное месторождение Южного Урала. Уфа: УНЦ РАН, 1998. 393 с.

Радкевич Е.А. Группа блёклых руд. Минералы СССР. 1940. Т. II. С. 497–528.

Самоваров М.Л. Особенности химического состава блеклых руд из гидротермальных образований срединно-океанических хребтов (постройка «Мир», поле ТАГ, 26° с.ш. Срединно-Атлантического хребта) // Зап. РМО. 1995. Ч. 124. Вып. 5. С. 77–84.

Сафина Н.П., Масленников В.В. Литолого-минералогическая зональность сульфидных циклитов Яман-Касинского и Сафьяновского колчеданных месторождений (Урал) // Доклады РАН. 2008. Т. 419. № 6. С. 804–806.

Сахарова М.С., Лебедева Н.В., Чубаров В.М. Первая находка на Камчатке редких минералов теллура – голдфилдита, раклиджита и самородного теллура // ДАН СССР. 1984. Т. 278. № 5. С. 1217–1220.

Серавкин И.Б. Металлогения Южного Урала и Центрального Казахстана. Уфа: Гилем., 2010. 284 с.

Симонов В.А., Ковязин С.В., Тереня Е.О., Масленников В.В., Зайков В.В., Масленникова С.П. Физико-химические параметры магматических и гидротермальных процессов на колчеданном месторождении Яман-Касы, Южный Урал // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48. № 5. С. 423–438.

Спиридонов Э.М. О видах и разновидностях блеклых руд и рациональной номенклатуре минералов группы. Некоторые замечания об условиях образования блёклых руд // Новые данные о минералах. М.: Наука, 1985. Вып. 32. С. 128–146.

Спиридонов Э.М. Типоморфные особенности блёклых руд некоторых плутоногенных, вулканогенных, телетермальных месторождений золота // Геология рудных месторождений. 1987. № 6. С. 83–92.

Спиридонов Э.М., Игнатов А.И., Шубина Е.В. Эволюция блёклых руд вулканогенного месторождения Озерновское (Камчатка) // Известия АН ССР. Сер. геол. 1990. № 9. С. 82–94.

Спиридонов Э.М., Округин В.М. Селенистый голдфилдит – новая разновидность блёклых руд // ДАН СССР. 1985. Т. 280. № 2. С. 476–478.

Спиридонов Э.М., Кривицкая Н.Н., Городецкая М.Д., Иванова Ю.Н., Япаскурт В.О. О механизмах и условиях образования мышьяковистых и сурьмянистых блёклых руд // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2013. № 5. С. 30–36.

Филимонов С.В. Минералы группы блёклых руд индикаторы рудогенеза (на примере гидротермальных месторождений золота) / Автореф... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2009. 16 с.

Цетин А.И., Мозгова Н.Н., Пшеничный Г.Н. Особенности химического состава блеклых руд южно-уральских месторождений колчеданной формации // Состав и структура минералов как показатели их генезиса. М.: Наука. 1978. С. 171–186.

Feiss P.G. Reconnaissance of the tetrahedrite-tennantite enargite-famatinite phase relations as a possible geothermometer // Econ. Geol. 1974. V. 69. N 3. P. 383–390.

- Haymon R.M.* Growth history of hydrothermal black smoker // *Nature*. 1983. V. 301. P. 695–698.
- Herrington R. J., Maslennikov V. V., Spiro B., Zaykov V. V., Little C. T.* Ancient vent chimneys structures in the Silurian massive sulphides of the Urals // *Modern Ocean Floor Processes and the Geol. Records*. 1998. V. 148. P. 241–257.
- Herrington R., Zaykov V., Maslennikov V., Brown D., Puchkov V.* Mineral deposits of the Urals and links to geodynamic evolution // *Econ. Geol.: One Hundredth Anniversary Volume*. 2005b. P. 1069–1095.
- Grichuk D. V.* Thermodynamic Model of Ore-forming Processes in a Submarine Island-Arc Hydrothermal System // *Geochemistry International*. 2012. V. 50. N 13. P. 1069–1100.
- Eremin N.I., Sergeeva N.E., Dergachev A.L.* Rare Minerals from Massive Sulfide Ores Typomorphic Features and geochemical Trend // *Moscow University Geology Bulletin*. 2007. V. 62. N 2. P. 98–106.
- Kalbskopf R.* Die Koordination des Quecksilbers im Schwazit // *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*. 1971. V. 16. P. 173–175.
- Kalbskopf R.* Synthese und Kristallstruktur von $\text{Cu}_{12}(\text{Te,As})_{13}$, dem Tellur-Endglied der Fahlerze // *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*. 1974. V. 21. P. 1–1.
- Karup-Møller S.* Phases and phase relations in the Cu–Te–S system at temperatures between 350° and 900 °C // *N. Jb. Miner. Abh.* 1994. V. 166. N 2. P. 113–136.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevskiy L.V.* Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposits (Southern Urals, Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS) // *Econ. Geol.* 2009. V. 104. P. 1111–1141.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevskiy L.V., Herrington R.J., Stanley C.J.* Tellurium-bearing minerals in zoned sulfide chimneys from Cu-Zn massive sulfide deposits of the Urals, Russia // *Mineralogy and Petrology. Special Issue: Ore deposits of the Urals*. 2013. V. 107. N 1. P. 67–99.
- Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N.N., Jambor J.L., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel E. H., Graeser S., Karup-Møller S., Balic-Žunic T., Mumme W. W., Vurro F., Topa D., Bindi L., Bente K., Shimizu M.* Sulfosalts systematics: a review // *Report of the sulfosalt sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. Eu. J. Mineral.* 2008. V. 20. P. 7–46.
- Murowchick J.B., Barnes H.L.* Marcasite precipitation from hydrothermal solutions // *Geochem. Cosmochem. Acta*. 1986. V. 50. P. 2615–2629.
- Shikazono N.A.* Comparison of temperatures estimated from the electrum-sphalerite-pyrite-argentite assemblage and filling temperatures of fluid implications from epithermal Au–Ag vein type deposits in Japan // *Econ. Geol.* 1985. V. 80. N 5. P. 1415–1424.
- Shimizu M., Stanley C. J.* Coupled substitutions in goldfieldite-tetrahedrite minerals from the Iriki mine, Japan // *Mineral. Magazine*. 1991. V. 55. P. 515–519.
- Spiridonov E., Maleev M., Kovachev V., Kulikova I., Nazmova G., Filimonov S.* Minerals of fahlore group: indicators of ore genesis // *International scientific conference 80th Anniversary of the Bulgarian Geological Society*. 2005. P. 79–82.
- Trudu A.G., Knittel U.* Crystallography, mineral chemistry and chemical nomenclature of goldfieldite, the tellurian member of the tetrahedrite solid-solution // *Can. Mineral.* 1998. V. 36. P. 1115–1117.

Поступила в редакцию 30 ноября 2015 г.