

УДК 579.33

DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-3-1

БЛЁКЛЫЕ РУДЫ Cu-(Mo)-ПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА**О.Ю. Плотинская, Е.В. Ковальчук***Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер. 35, г. Москва, 119017 Россия; plotin@igem.ru*

Статья поступила в редакцию 06.05.2022 г., принята к печати 12.07.2022 г.

FAHLORES FROM PORPHYRY Cu-(Mo) DEPOSITS OF THE URALS**O.Yu. Plotinskaya, E.V. Kovalchuk***Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS,
Staromonetny per. 35, Moscow, 119017 Russia; plotin@igem.ru*

Received 06.05.2022, accepted 12.07.2022

Аннотация. Изучены типоморфные особенности минералов группы блёклых руд на трех порфировых месторождениях Урала: медно-порфировых Михеевском и Томинском (Южный Урал) и молибден-порфировом месторождении Талицкое (Средний Урал). На изученных месторождениях минералы группы блёклых руд относятся либо к поздним минеральным ассоциациям порфировой стадии, либо к жильной субэпитептермальной минерализации. По составу они варьируют от теннантита до тетраэдрита с различными соотношениями Fe и Zn. Примеси Cd, Co, Te, Bi, Ag, Se обычно незначительны. Исключения составляют блёклая руда поздней генерации с Михеевского месторождения, которая представлена аргентотетраэдритом-(Fe), и блёклая руда, ассоциирующая с борнитом из Томинского месторождения, которая по составу отвечает теннантит-тетраэдриту-(Cd). Для большинства изученных блёклых руд не характерно сложное зональное строение – они либо химически однородны, либо состоят из однородного ядра промежуточного теннантит-тетраэдритового состава и каймы, в которой преобладает тетраэдритовый минерал. Это свидетельствует об относительно спокойной обстановке минералообразования, без резких колебаний физико-химических параметров рудообразующего флюида, что, в целом, характерно для порфировых месторождений. Сравнение с литературными данными показывает, что изученные блёклые руды по составу близки к блёклым рудам, характерным для «переходной» субэпитептермальной минерализации.

Ключевые слова: Урал, порфировые месторождения, блёклые руды, тетраэдрит, теннантит, микрозонд.

Abstract. The paper describes chemistry of tetrahedrite-tennantite group minerals from three porphyry deposits of the Urals: Mikheevskoe and Tomino porphyry copper deposits on the South Urals and Talitsa Mo porphyry deposit on the Middle Urals. In the deposits studied tetrahedrite-tennantite group minerals deposited either with late mineral assemblages of the porphyry stage or within late subepithermal veins. They vary in composition from tennantite to tetrahedrite with variable Fe and Zn contents. Contents of Cd, Co, Te, Bi, Ag, Se, Te, Bi, Ag, S are usually insignificant. However argentotetrahedrite-(Fe) was described within the latest assemblage at the Mikheevskoe deposit, while tennantite-tetrahedrite-(Cd) was noted overgrowing bornite at the Tomino deposit. Most tetrahedrite group minerals do not establish complicated chemical zoning: they are either homogeneous or comprise a core of intermediate tennantite-tetrahedrite composition and a rim with dominating tetrahedrite end-member. This evidences relatively quiet deposition environment with no dramatic variations of PTx parameters which is rather typical for porphyry systems. Comparison with published data shows the tetrahedrite group minerals studied are similar to those from «transitional» subepithermal mineralization.

Keywords: Urals, porphyry deposits, fahlores, tetrahedrite, tennantite, microprobe.

Введение

Минералы группы блёклых руд являются одним из индикаторов условий минералообразования на гидротермальных месторождениях различных типов, а вариации их химического состава нередко являются важным элементом зональности месторождений (Сахарова, 1966; Мозгова, Цепин, 1983; Sack et al., 2003; Staude et al., 2010; Krismer et al., 2011; Vassileva et al., 2014; Lynch, 1989; Любимцева и др., 2018, 2021 и др.). Наиболее подробно особенности химизма блёклых руд изучены для месторождений, являющихся элементами порфирово-эпитермальных систем, в первую очередь, собственно Au-Ag эпитермальных (Catchpole et al., 2012; Repstok et al., 2016; Плотинская и др., 2015; Marushchenko et al., 2018 и др.), поскольку блёклые руды на них распространены довольно широко. На месторождениях порфирового типа минералы группы блёклых руд распространены существенно меньше. Согласно базе данных Геологической службы США (Singer et al., 2008), они отмечены примерно на 270 месторождениях из 690. Тем не менее на порфировых месторождениях блёклые руды присутствуют в составе ассоциаций разных стадий минералообразования и нередко демонстрируют широкие вариации химического состава (Marushchenko et al., 2018 и цитируемая литература). Это позволяет рассматривать минералы группы блёклых руд как потенциальные индикаторы развития порфировых систем. В данной работе были изучены типоморфные особенности минералов группы блёклых руд на трёх порфировых месторождениях Урала: медно-порфировых Михеевском и Томинском (Южный Урал) и молибден-порфировом месторождении Талицкое (Средний Урал).

Краткая геологическая характеристика объектов исследования

Месторождения, изученные в данной работе, расположены в трех разновозрастных мегазонах Урала: Михеевское – в Зауральской, Томинское – в Восточно-Уральской вулканогенной и Талицкое – в Восточно-Уральской сиалической (рис. 1а).

Михеевское Си-порфировое месторождение находится в ~200 км к югу от г. Челябинска. В геологическом строении территории месторождения принимают участие вулканогенно-осадочные породы (D_3-C_1) (рис. 1б). Нижняя пачка представлена переслаивающимися песчаниками, туфопесчаниками, андезибазальтами и их туфами и туфобрекчиями, реже алевролитами, углисто-кремнистыми породами, базальтами и пр. Верхняя вулканогенная пачка сложена лавами и лавокластитами афировых базальтов с прослоями песчаников, силицитов и углисто-кремнистых пород (Шаргородский и др., 2005). Интрузивные породы представлены двумя комплексами: ульяновским и михеевским. Первый представлен штоками и дайками диоритовых порфиритов и андезитов, реже дацитами, риодацитами и плагиогранодиоритами. Михеевский комплекс представлен диоритами, диоритовыми порфиритами и плагиогранодиорит-порфирами, с которыми связывают медно-порфировое оруденение, а также пострудными адамеллит-порфирами (Грабежев, Белгородский, 1992). Возраст рудоносных диоритовых порфиритов по циркону составил 356 ± 6 млн лет (Грабежев, Ронкин, 2011). Промышленное оруденение приурочено к поясу даек общей площадью примерно 0.5×3 км, который протягивается субмеридионально между двумя штоками диоритов Михеевского комплекса (Шаргородский и др., 2005). Из рудных минералов преобладают пирит и халькопирит, которые обычно сопровождаются хлорит-серицитовыми метасоматитами. Реже встречаются молибденит, борнит, блёклые руды, сфалерит, галенит, самородное золото, теллуриды благородных и цветных металлов и др. (Plotinskaya et al., 2018). Re-Os возраст молибденита составляет 357.8 ± 1.8 и 356.1 ± 1.4 млн лет (Tessalina, Plotinskaya, 2017), что в пределах ошибки совпадает с возрастом рудоносных интрузий. Запасы месторождения на 2017 г. составляют 629 млн т руды при среднем содержании меди 0.41 % (Русская..., Вестник..., 2017).

Томинское Си-порфировое месторождение расположено примерно в 30 км южнее г. Челябинска в пределах Кособродско-Брединской вулканогенной зоны (рис. 1в). Вмещающие породы представлены афировыми, порфировыми и миндалека-

Для цитирования: Плотинская О.Ю., Ковальчук Е.В. Блёклые руды Cu-(Mo)-порфировых месторождений Урала. Минералогия, 8(3), 5–22. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-3-1

For citation: Plotinskaya O.Yu., Kovalchuk E.V. Fahlores from porphyry Cu-(Mo) deposits of the Urals. Mineralogy, 8(3), 5–22. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-3-1.

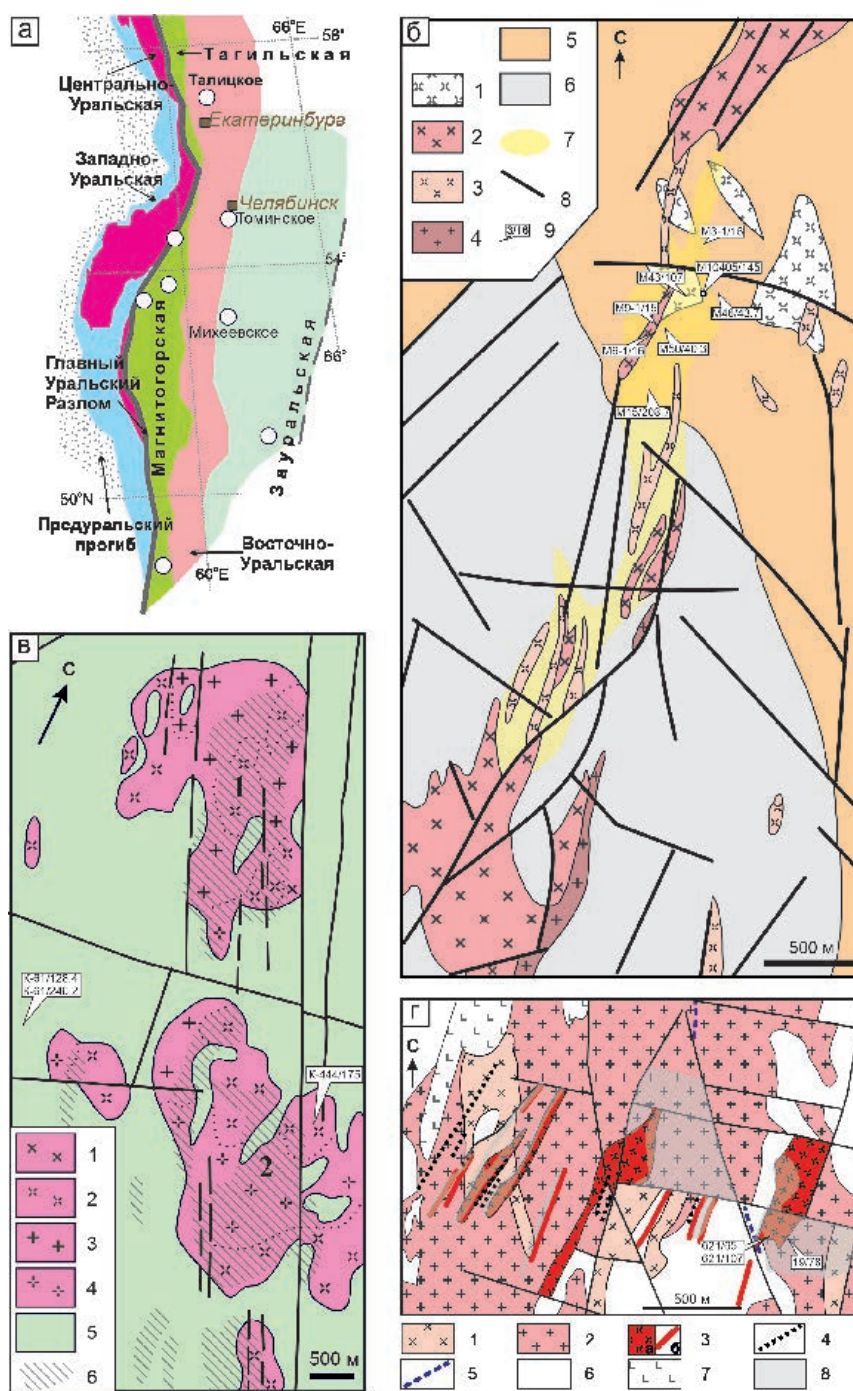


Рис. 1. а – Тектоническая схема Южного и Среднего Урала по (Puchkov, 2017) с изменениями; б–г – геологические карты Михеевского (б), Томинского (в) и Талицкого (г) месторождений по (Шаргородский и др., 2005) с упрощениями (б), (Пужаков, 1999) с упрощениями (в; участки Томинский (1) и Калиновский (2)), (Азовскова, Грабежев, 2008) (г).

Михеевское месторождение (б): 1 – ульяновский интрузивный комплекс: диоритовые порфиры, дациты; 2–4 – михеевский интрузивный комплекс: 2 – кварцевые диориты, 3 – диоритовые порфиры; 4 – плагิโอгранодиорит-порфиры; 5 – нижняя пачка, порфировые андезитобазальты, туфы, туффиты, песчаники, туфопесчаники, силициты; 6 – верхняя пачка, афировые базальты, кремнистые и углисто-кремнистые породы, песчаники; 7 – контур оруденения с содержанием Cu 0.3 %; 8 – разломы; 9 – точки отбора образцов.

Томинское месторождение (в): 1–4 – биргильдинско-томинский интрузивный комплекс: 1 – диориты; 2 – диоритовые порфиры; 3 – кварцевые диориты; 4 – кварцевые диоритовые порфиры; 5 – саргазинская толща: базальты, их туфы; 6 – участки развития кварц-серицитовых и кварц-серицит-хлоритовых метасоматитов.

Талицкое месторождение (г): 1 – диориты, кварцевые диориты; 2 – гранодиориты; 3 – гранодиорит-порфиры (а – штоки, б – дайки); 4, 5 – дайки гранит-порфиров (4) и литий-фтористых граносиенитов (5); 6 – серпентиниты, серпентинизированные гарцбургиты; 7 – долериты и андезибазальтовые порфириды; 8 – участки развития калиевого метасоматоза.

Fig. 1. a – Tectonic scheme of the South and Central Urals, modified after (Puchkov, 2017), б–г – geological maps of the Mikheevskoe (б), Tomino (в) and Talitsa (г) deposits, simplified after (Shargorodskii et al., 2005) (б), (Puzhakov, 1999) (в; with Tomino (1) and Kalinovskoe (2) sites) and (Azovskova, Grabezhev, 2008) (г).

Mikheevskoe deposit (б): 1 – Ul'yanovsk igneous complex: dacite, diorite porphyry; 2–4– Mikheevsky igneous complex: 2 – quartz diorite; 3 – diorite porphyry; 4 – plagiogranite porphyry; 5 – lower lithological unit, basaltic andesite porphyry, sandstone, tuff, tuffite, siliceous shales; 6 – upper lithological unit, aphyric basalt, lava, sandstone, chert; 7 – Cu >0.3% aureole; 8 – fault; 9 – sampling place.

Tomino deposit (в): 1–4 – Birgilda-Tomino igneous complex: 1 – diorite; 2 – diorite porphyry; 3 – quartz diorite; 4 – quartz diorite porphyry; 5 – Sargazy Sequence, basalt, basaltic tuff; 6 – aureole of quartz-sericite and quartz-sericite-chlorite alteration.

Talitsa deposit (г): 1 – diorite, quartz diorite; 2 – granodiorite; 3 – granodiorite porphyry: stock (a) and dike (b); 4, 5 – dikes of granite porphyry (4) and Li-F granosyenite (5); 6 – serpentinite, serpentinized harzburgite; 7 – dolerite and basaltic andesite porphyry; 8 – potassic alteration aureole.

менными базальтами, их кластолавами и туфами с прослоями риолитов саргазинской толщи ордовикского возраста. Их прорывают штоки, сложенные диоритами, кварцевыми диоритами и их порфировыми разностями, относимые к Биргильдинско-Томинскому комплексу (Грабежев и др., 1998; Пужаков, 1999). Возраст диоритовых порфиритов по циркону 428 ± 3 млн лет (Грабежев, Ронкин, 2011). Месторождение включает два участка, Калиновский и Томинский, которые приурочены к двум изометричным штокам сложной формы, размерами около 2 км каждый. Рудные минералы представлены пиритом, халькопиритом, реже молибденитом, борнитом, магнетитом, гематитом, которые сопровождаются филлизитами, серицит-хлоритовыми метасоматитами и пропилитами. Наиболее поздние ассоциации включают сульфосоли Bi, самородное золото, галенит, сфалерит, блёклые руды и др. (Plotinskaya et al., 2014). Зона окисления развита до глубины 40 м. Re-Os возраст оруденения по молибдениту 430.4 ± 2.0 млн лет (Tessalina, Plotinskaya, 2017) в пределах ошибки совпадает с возрастом интрузий. Запасы месторождения составляют 660 млн т руды со средним содержанием меди 0.4 % (Томинский ГОК...).

Талицкое Мо-порфировое месторождение расположено на Среднем Урале в пределах Восточно-Уральской мегазоны (рис. 1г). Вмещающие породы представлены серпентинизированными ультрабазиитами Первомайского дунит-гарцбургитового массива ордовикского возраста и девонскими риолит-базальтовыми вулканогенно-осадочными породами. Оруденение приурочено к Талицкому массиву (площадь около 4 км²), который сложен, преимущественно, гранодиоритами и гранитами высококалиевой

субщелочной серии с многочисленными штоками и дайками гранодиорит-порфиров (Азовскова, Грабежев, 2008). Возраст гранита по циркону 297.4 ± 2.3 млн лет (Смирнов и др., 2017) Мо-порфировое оруденение (молибденит, пирит, халькопирит) сопряжено с участками развития калишпатизации; минерализация более поздней, полиметаллической стадии (флюорит, блёклая руда, галенит, сфалерит, халькопирит) сопровождается филлитизацией (Азовскова, Грабежев, 2008). Re-Os возраст молибденита составил 299.9 ± 2.9 млн лет (Tessalina, Plotinskaya, 2017) и, как и на двух описанных выше объектах, совпадает с возрастом интрузий.

Методы исследования

Состав рудных и жильных минералов изучался на электронных микроскопах с энергодисперсионными приставками: Tescan Vega TS 5130 MM (CamScan) с приставкой INCA Energy 350 и детектором INCA Penta FETx3, Tescan Vega II XMU с приставкой INCA Energy 450 и детектором INCA xSight (ИЭМ РАН, Черноголовка, аналитик А.Н. Некрасов).

Состав блёклых руд также проанализирован на рентгеновском микроанализаторе JXA-8200 фирмы JEOL (Япония), оснащённом пятью волновыми спектрометрами, в ЦКП «ИГЕМ-аналитика», аналитики Е.В. Ковальчук и С.Е. Борисовский. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток на цилиндре Фарадея 20 нА, диаметр пучка 1 мкм. Время экспозиции на все элементы составляло 10 сек на пике и по 5 сек на фоне с обеих сторон. В качестве стандартов использовались для Sb (L α , PETJ)–Sb₂S₃, Se (L α , TAP)–CdSe, Zn (K α , LIF)–ZnS,

S (K α , PETH) – CuFeS₂, Ag (L α , PETJ) – AgSbS₂, As (L α , TAP) – GaAs, Cu (K α , LIF) – Cu, Hg (M α , PETH) – HgS, Te (L α , PETJ) – Te, Fe (K α , PETJ) – CuFeS₂, Bi (M α , PETH) – Bi₂Te₃, Cd (L β , PETJ) – CdSe, Pb (M α , PETH) – PbS, Co (K α , LIF) – Co. Предел обнаружения для 3 σ интервала составляет (мас. %) для S – 0.02, для Fe, Se и Co – 0.06, для Ag – 0.07, для As, Cu, Te и Pb – 0.08, для Hg и Bi – 0.09, для Sb и Zn – 0.10, для Cd – 0.15.

Ассоциации и особенности химизма минералов группы блѣклых руд

Михеевское Cu-порфировое месторождение. Минералы группы блѣклых руд на месторождении установлены в восьми образцах, пять из которых были отобраны из прожилково-вкрапленной (порфировой) минерализации (рис. 2а) и три – из поздних полиметаллических жил (рис. 2б), секущих минерализацию порфирового типа. По составу они варьируют от почти чистого теннантита до чистого тетраэдрита, причем присутствуют как железистые, так и цинкистые конечные члены (таблица), однако преобладает тетраэдрит с сопоставимыми содержаниями Fe и Zn. Количества Hg, Cd, Pb, Bi и Se, за редким исключением, не превышают первых десятых массовых процентов, а содержания Te не превышают предела обнаружения (первые сотые доли массовых процентов).

В областях развития порфировой минерализации блѣклые руды чаще всего встречаются в поздних кварц-карбонатных или карбонатных (доломитовых) прожилках. Они образуют небольшие (от первых десятков до первых сотен микрометров) изометричные самостоятельные выделения, иногда нарастают на более ранний халькопирит (рис. 2а, в, г) или образуют в нем просечки. Иногда такие блѣклые руды представлены однородным по составу теннантитом-(Fe) (обр. 46/43.7, рис. 2а и г) с заметными примесями Hg (0.2–0.5 мас. %). Однако чаще это агрегаты, имеющие зональное строение: ядро промежуточного теннантит-тетраэдритового состава и существенно тетраэдритовая кайма (рис. 2д) с сопоставимыми количествами Fe и Zn.

Наиболее широко блѣклые руды развиты в поздних полиметаллических жилах. Блѣклая руда обрастает и цементирует арсенопирит, пирит, содержит включения самородного золота (обр. М-9/15 и М-6/16). Нередко блѣклая руда образует крупные агрегаты, размер которых достигает нескольких сантиметров (рис. 2б). Такие агрегаты

сложены блѣклой рудой промежуточного состава с преобладанием тетраэдритового минала и обрастают существенно тетраэдритовой каймой (рис. 2е). Содержания Ag во всех описанных выше блѣклых рудах не превышают 0.7 мас. %.

Блѣклая руда более поздней генерации (обр. 3-1С/16) частично охарактеризована нами ранее (Plotinskaya et al., 2018). Она образует мелкие выделения, которые совместно с галенитом и полибазитом нарастают на халькопирит и сфалерит (рис. 2ж–и) и отличается от других генераций повышенными содержаниями Ag (рис. 3). Выделения поздней блѣклой руды имеют сложное зональное строение, которое обусловлено вариациями содержаний Ag и Zn (рис. 4а). Так, ядро характеризуется самыми высокими содержаниями Ag (до 30 мас. %). Для ядра характерен небольшой дефицит S (рис. 4б), что позволяет отнести его к кеноаргентотетраэдриту. Во внутренней кайме, ширина которой не превышает 5 мкм, содержания Ag снижаются до 20 мас. %. Следующая кайма шириной 3–4 мкм резко отличается по составу: содержания Ag здесь составляют не более 2 мас. %, а Zn возрастает с 0.1–0.5 до 0.9 к.ф. Внешняя кайма прерывистая, шириной не более 2 мкм и, судя по ее электронной плотности, по составу близка к ядру (рис. 2и).

Таким образом, все изученные блѣклые руды на Михеевском месторождении принадлежат к поздним минеральным ассоциациям, наложенным на минерализацию порфирового типа. По составу они варьируют от теннантита до тетраэдрита, заметные примеси Te, Bi, Ag для них не характерны. Исключение составляют только мелкие выделения блѣклых руд с верхних горизонтов месторождения, которые представлены минералами фрейбергитовой серии (преобладает аргентотетраэдрит).

Томинское Cu-порфировое месторождение. Минералы группы блѣклых руд на месторождении встречаются крайне редко: они установлены всего в трех образцах (рис. 5). В образце 61/124.8 блѣклая руда образует каймы вокруг срастаний борнита и джирита шириной не более 20 мкм (рис. 5а). Она содержит высокие концентрации Cd (9.0–11.8 мас. %) и заметные количества Hg (0.4–2.9 мас. %) и Bi (0.20–0.45 мас. %) (таблица). Содержания Ag, Fe, Pb и Se не превышают первые десятые массовых процентов. As и Sb присутствуют в сопоставимых количествах (рис. 6). В целом, блѣклая руда по составу отвечает теннантит-тетраэдриту-(Cd).

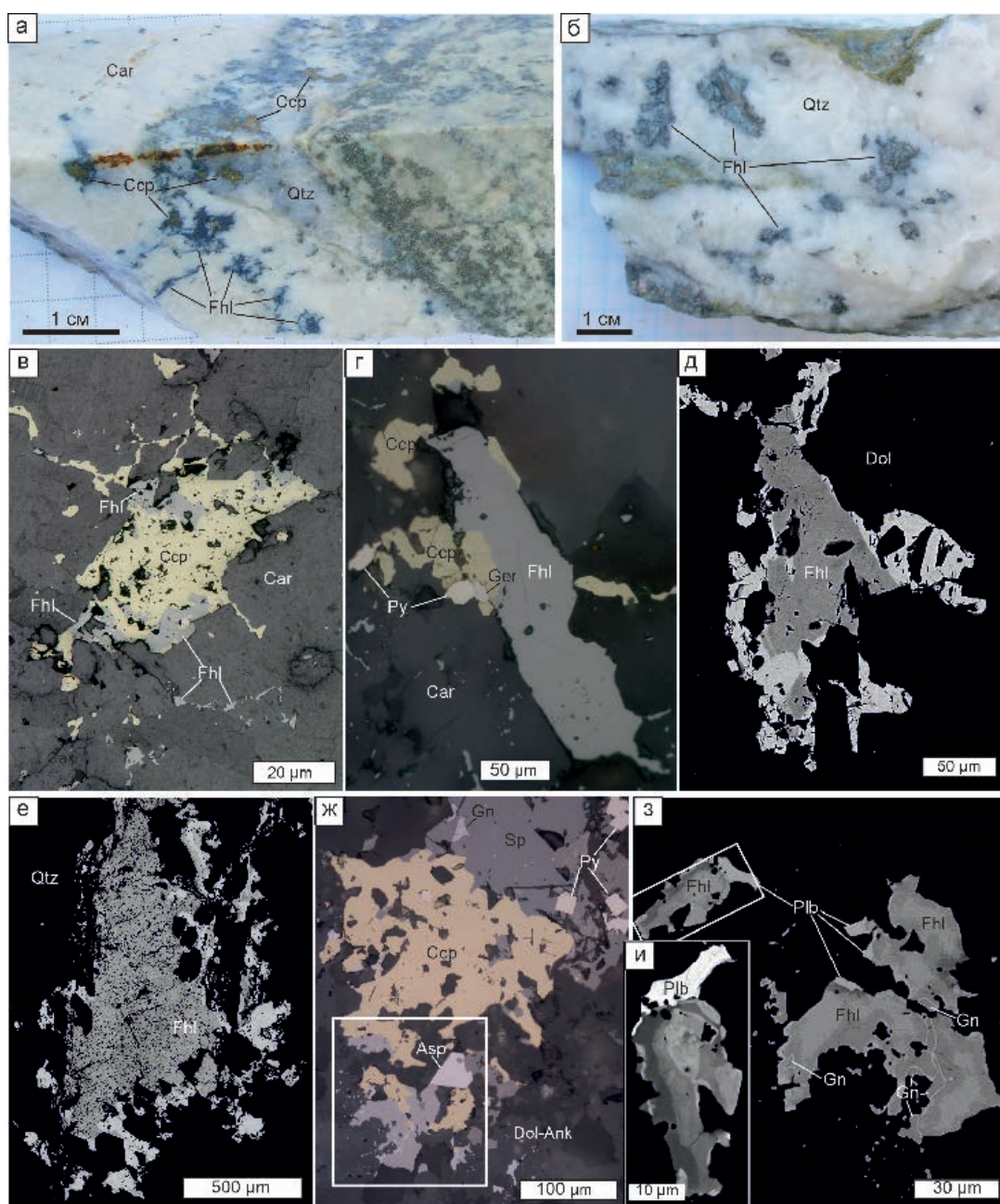


Рис. 2. Блёклые руды Михеевского медно-порфирового месторождения: а – гнезда блёклой руды и халькопирита в кварц-карбонатном прожилке среди кварц-серицит-пиритового метасоматита, обр. 46/43.7; б – гнезда блёклой руды в кварцевом прожилке, обр. 6-1/16; в – нарастание тетраэдрита на халькопирит среди карбоната, обр. 15/208.7; г – теннантит в сростании с халькопиритом и герсдорфитом среди карбоната, обр. 46/43.7; д – зональное выделение тетраэдрита среди доломита, обр. 50/40.3; е – зональное выделение тетраэдрита среди кварца, обр. 6-1/16; ж–и – нарастание блёклой руды на халькопирит-сфалеритовый агрегат с пиритом и арсенопиритом, обр. 3-1/16; з – увеличенный фрагмент рисунка ж: зональное строение блёклой руды фрейбергитового ряда в сростании с полибазитом и галени- том; и – увеличенный фрагмент рисунка з: зональное строение блёклой руды фрейбергитового ряда с полибазитом.

Здесь и далее: Fhl – блёклая руда, Ccp – халькопирит, Car – карбонат, Py – пирит, Ger – герсдорфит, Dol – доломит, Qtz – кварц, Ank – анкерит, Gn – галенит, Sp – сфалерит, Asp – арсенопирит, Plb – полибазит. Рис. в, д, е и з – изображения в обратно-рассеянных электронах, остальные – фото в отражённом свете.

Fig. 2. Fahlores of the Mikheevskoe porphyry copper deposit: а – pockets of fahlore and chalcopyrite in quartz-carbonate veinlet of quartz-sericite-pyrite metasomatite, sample 46/43.7; б – pockets of fahlore in quartz veinlet, sample 6-1/16; в – tetrahedrite overgrown chalcopyrite in carbonate, sample 15/208.7; г – tennantite intergrown with chalcopyrite and gersdorffite in carbonate, sample 46/43.7; д – zoned tetrahedrite in dolomite, sample 50/40.3; е – zoned tetrahedrite

in quartz, sample 6-1/16; ж-и – fahlore overgrown chalcopyrite-sphalerite-pyrite-arsenopyrite aggregate, sample 3-1C/16; з – detail of Fig. ж: zoned fahlore of the freibergite series with polybasite and galena; и – detail of Fig. з: zoned fahlore of freibergite series with polybasite.

Hereinafter: Fhl – fahlore, Ccp – chalcopyrite, Car – carbonate, Py – pyrite, Ger – gersdorffite, Dol – dolomite, Qtz – quartz, Ank – ankerite, Gn – galena, Sp – sphalerite, Asp – arsenopyrite, Plb – polybasite. Figs. в, д, е and з – BSE images, other figures – reflected light.

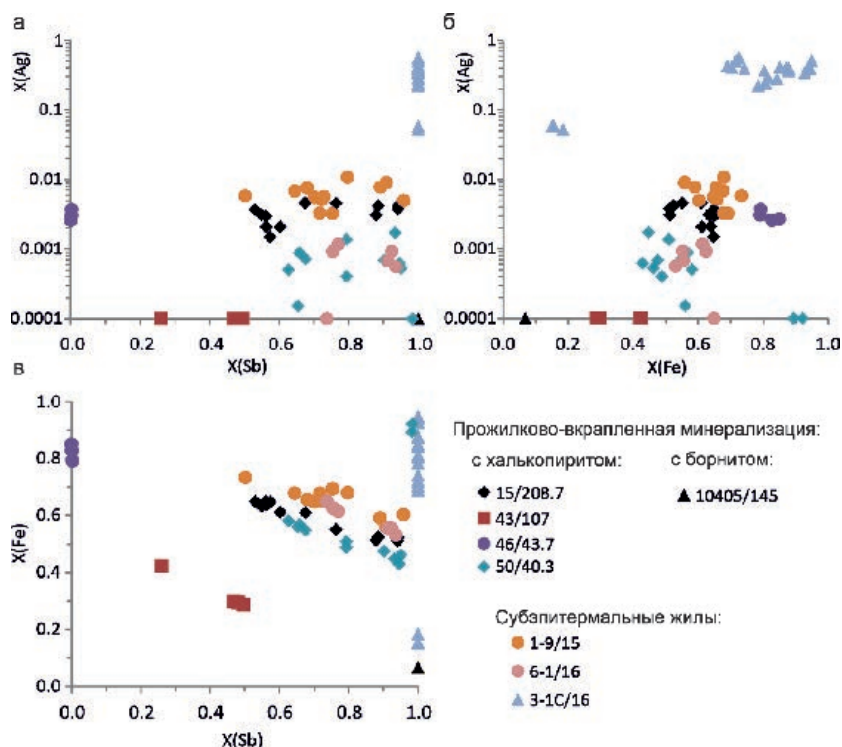


Рис. 3. Диаграммы X(Sb)–X(Ag) (а), X(Fe)–X(Ag) (б) и X(Sb)–X(Fe) (в) для блѣклых руд Михеевского месторождения.

Здесь и далее, $X(\text{Sb}) = \text{Sb} / (\text{Sb} + \text{As} + \text{Te} + \text{Bi})$, $X(\text{Fe}) = \text{Fe} / (\text{Fe} + \text{Zn} + \text{Cd})$, $X(\text{Ag}) = \text{Ag} / (\text{Ag} + \text{Cu})$. Для обр. 3-1C/16 приведены новые данные и данные из (Plotinskaya et al., 2018).

Fig. 3. X(Sb) vs. X(Ag) (a), X(Fe) vs. X(Ag) (б) and X(Sb) vs. X(Fe) (в) diagrams for fahlores of the Mikheevskoe deposit.

Hereinafter, $X(\text{Sb}) = \text{Sb} / (\text{Sb} + \text{As} + \text{Te} + \text{Bi})$, $X(\text{Fe}) = \text{Fe} / (\text{Fe} + \text{Zn} + \text{Cd})$, $X(\text{Ag}) = \text{Ag} / (\text{Ag} + \text{Cu})$. Data for sample 3-1C/16 are from this study and from (Plotinskaya et al., 2018).

В образце из золото-халькопиритовой ассоциации (61/246.2) блѣклая руда образует каймы вокруг халькопирита (рис. 5б). По составу она соответствует почти предельному теннантиту (содержания Sb не превышают 1.1 мас. %), в котором Zn преобладает над Fe (рис. 6а). Постоянно присутствуют небольшие количества Ag (0.4–0.6 мас.%), Cd (1.0–1.4 мас. %), Co (0.3–0.5 мас. %) и Hg (0.1–0.4 мас. %). Содержания Bi, Pb и Se не превышают первые десятые массовых процентов.

В образце 444/175 блѣклая руда охарактеризована нами ранее (Plotinskaya et al., 2014). Она совместно со сфалеритом обрастает халькопирит в позднем кварцевом прожилке, размер выделений не превышает первые десятые миллиметра (рис. 5в).

По составу она отвечает теннантит-тетраэдриту (Zn). Присутствуют небольшие примеси Cd (0.2 мас. %) и иногда – Bi (до 0.5 мас. %). Содержания Te ниже предела обнаружения (0.08 мас. %) во всех анализах. Следует отметить, что все изученные выделения гомогенны по химическому составу и зонального строения не обнаруживают.

Таким образом, изученные блѣклые руды Томинского месторождения принадлежат к поздним минеральным ассоциациям, наложенным на минерализацию порфирового типа. Присутствуют как теннантит, так и тетраэдрит, из двухвалентных металлов преобладает Zn. Характерной особенностью блѣклых руд Томинского месторождения являются заметные содержания Cd, Co и Hg.

Химический состав минералов группы блеклых руд порфировых месторождений Урала по данным рентгеноспектрального микроанализа (мас. %) *Table*

Chemical composition of fahlores from porphyry deposits of the Urals according to electron microprobe analysis (wt. %)

Обр.	Cu	Ag	Fe	Zn	Cd	Hg	Co	As	Sb	Te	Bi	S	Se	Сумма	Формула на 29 к.ф.
Михеевское месторождение															
Прожилково-вкрапленная минерализация															
15/208.7 ядро	39.30	0.31	4.42	3.32	—	—	н.о.	6.18	20.83	—	—	26.21	0.14	100.71	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.3}\text{Zn}_{0.8})_{2.1}(\text{As}_{1.3}\text{Sb}_{2.7})_{4.0}\text{S}_{13.0}$
	39.71	0.21	4.49	3.05	—	—	н.о.	8.61	17.03	—	—	26.35	0.10	99.55	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.3}\text{Zn}_{0.7})_{2.0}(\text{As}_{1.8}\text{Sb}_{2.2})_{4.0}\text{S}_{13.0}$
	39.83	0.25	4.52	2.87	—	—	н.о.	9.00	16.51	—	—	26.75	—	99.73	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.3}\text{Zn}_{0.7})_{2.0}(\text{As}_{1.9}\text{Sb}_{2.1})_{4.0}\text{S}_{13.1}$
	39.60	0.20	4.61	2.92	—	—	н.о.	8.40	17.46	—	—	25.93	—	99.12	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.3}\text{Zn}_{0.7})_{2.0}(\text{As}_{1.8}\text{Sb}_{2.3})_{4.1}\text{S}_{12.9}$
	39.37	0.14	4.37	2.91	—	—	н.о.	8.40	17.55	—	—	26.39	—	99.13	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.2}\text{Zn}_{0.7})_{1.9}(\text{As}_{1.8}\text{Sb}_{2.3})_{4.1}\text{S}_{13.1}$
кайма	39.50	0.14	4.29	3.19	—	—	н.о.	7.65	18.84	—	—	25.90	—	99.51	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.2}\text{Zn}_{0.8})_{2.0}(\text{As}_{1.6}\text{Sb}_{2.5})_{4.1}\text{S}_{12.9}$
	39.38	0.10	4.63	2.95	—	—	н.о.	8.30	18.18	—	—	26.02	—	99.56	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.3}\text{Zn}_{0.7})_{2.0}(\text{As}_{1.8}\text{Sb}_{2.3})_{4.1}\text{S}_{12.9}$
	38.08	0.20	3.38	3.75	—	—	н.о.	2.24	26.38	—	—	25.61	0.08	99.72	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.1}\text{Zn}_{0.9})_{2.0}(\text{As}_{0.5}\text{Sb}_{3.6})_{4.1}\text{S}_{13.1}$
*10405/145 46/43.7	37.56	0.24	3.47	3.89	—	—	н.о.	1.10	28.42	—	—	24.82	—	99.50	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.0}\text{Zn}_{1.0})_{2.0}(\text{As}_{0.2}\text{Sb}_{3.9})_{4.1}\text{S}_{12.9}$
	37.64	—	0.42	6.74	—	—	н.о.	—	29.47	—	—	25.96	—	100.22	$\text{Cu}_{0.8}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.7})_{1.8}(\text{As}_{0.0}\text{Sb}_{4.0})_{4.0}\text{S}_{13.4}$
50/40.3 ядро	43.37	0.20	6.70	1.25	—	0.21	н.о.	19.25	0.01	—	0.05	28.88	0.12	100.04	$\text{Cu}_{10.0}(\text{Fe}_{1.8}\text{Zn}_{0.3})_{2.1}\text{As}_{3.8}\text{S}_{13.2}$
	42.73	0.19	6.70	1.37	0.08	0.34	н.о.	19.33	0.03	—	0.13	29.01	0.11	100.01	$\text{Cu}_{0.8}(\text{Fe}_{1.8}\text{Zn}_{0.3})_{2.1}\text{As}_{3.8}\text{S}_{13.2}$
	39.54	0.06	4.04	3.57	—	0.05	н.о.	6.41	20.20	—	0.15	26.45	0.07	100.54	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.1}\text{Zn}_{0.9})_{2.0}(\text{As}_{1.4}\text{Sb}_{2.6})_{4.0}\text{S}_{13.1}$
	39.61	0.05	3.81	3.65	0.05	—	н.о.	6.16	20.79	—	—	26.44	0.05	100.59	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.1}\text{Zn}_{0.9})_{2.0}(\text{As}_{1.3}\text{Sb}_{2.7})_{4.0}\text{S}_{13.1}$
	39.08	—	4.14	3.45	—	—	н.о.	7.10	19.38	—	0.05	26.33	0.05	99.68	$\text{Cu}_{0.8}(\text{Fe}_{1.2}\text{Zn}_{0.8})_{2.0}(\text{As}_{1.5}\text{Sb}_{2.5})_{4.0}\text{S}_{13.1}$
кайма	39.21	—	4.03	3.64	—	0.11	н.о.	6.43	19.79	—	0.06	26.38	0.05	99.73	$\text{Cu}_{0.8}(\text{Fe}_{1.2}\text{Zn}_{0.9})_{2.1}(\text{As}_{1.4}\text{Sb}_{2.6})_{4.0}\text{S}_{13.1}$
	37.61	—	3.24	4.37	0.07	—	н.о.	0.89	28.51	—	0.09	25.22	0.06	100.13	$\text{Cu}_{0.8}(\text{Fe}_{1.0}\text{Zn}_{1.1})_{2.1}(\text{As}_{0.2}\text{Sb}_{3.9})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
	37.92	0.11	3.10	4.34	0.14	0.08	н.о.	1.21	27.94	—	0.08	25.53	0.07	100.52	$\text{Cu}_{0.8}(\text{Fe}_{0.9}\text{Zn}_{1.1})_{2.0}(\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{3.8})_{4.1}\text{S}_{13.1}$
	38.59	—	3.39	4.05	0.14	—	н.о.	3.85	24.19	—	0.08	26.00	—	100.36	$\text{Cu}_{0.8}(\text{Fe}_{1.0}\text{Zn}_{1.0})_{2.0}(\text{As}_{0.8}\text{Sb}_{3.2})_{4.0}\text{S}_{13.1}$
	39.02	0.09	3.56	3.99	—	—	н.о.	3.84	24.01	—	—	25.95	0.05	100.54	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.0}\text{Zn}_{1.0})_{2.0}(\text{As}_{0.8}\text{Sb}_{3.2})_{4.0}\text{S}_{13.0}$
	38.04	—	2.84	4.41	—	—	н.о.	0.96	28.02	—	0.06	25.38	0.06	99.87	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{0.8}\text{Zn}_{1.1})_{2.0}(\text{As}_{0.2}\text{Sb}_{3.8})_{4.0}\text{S}_{13.1}$
	37.78	—	3.27	4.15	0.06	0.08	н.о.	1.76	26.97	—	0.10	25.36	—	99.61	$\text{Cu}_{0.8}(\text{Fe}_{1.0}\text{Zn}_{1.0})_{2.0}(\text{As}_{0.4}\text{Sb}_{3.7})_{4.1}\text{S}_{13.1}$
кайма	37.37	—	6.11	0.77	0.07	0.08	н.о.	0.29	29.13	—	0.12	25.01	0.16	99.11	$\text{Cu}_{0.8}(\text{Fe}_{1.8}\text{Zn}_{0.2})_{2.0}(\text{As}_{0.1}\text{Sb}_{4.0})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
	37.95	—	6.29	0.60	—	—	н.о.	0.27	29.65	—	0.07	24.91	0.07	99.86	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{1.9}\text{Zn}_{0.2})_{2.0}(\text{As}_{0.1}\text{Sb}_{4.0})_{4.1}\text{S}_{12.9}$

Обр.	Cu	Ag	Fe	Zn	Cd	Hg	Co	As	Sb	Te	Bi	S	Se	Сумма	Формула на 29 к.ф.
Полиметаллические жилы															
1-9/15 ядро	40.51	0.47	4.88	2.72	—	—	н.о.	6.53	19.32	—	0.06	26.62	—	101.15	$(\text{Cu}_{100}\text{Ag}_{0.1})_{10.1}(\text{Fe}_{1.4}\text{Zn}_{0.7})_{2.1}(\text{As}_{1.4}\text{Sb}_{2.5})_{3.9}\text{S}_{13.0}$
	41.86	0.42	5.41	2.24	0.07	—	н.о.	9.44	15.45	—	—	26.92	0.05	101.89	$(\text{Cu}_{101}\text{Ag}_{0.1})_{10.2}(\text{Fe}_{1.5}\text{Zn}_{0.5})_{2.0}(\text{As}_{1.9}\text{Sb}_{1.9})_{3.8}\text{S}_{12.9}$
	40.51	0.40	4.60	2.89	—	—	н.о.	4.92	21.63	—	0.05	26.14	—	101.19	$(\text{Cu}_{101}\text{Ag}_{0.1})_{10.2}(\text{Fe}_{1.3}\text{Zn}_{0.7})_{2.0}(\text{As}_{1.0}\text{Sb}_{2.8})_{3.8}\text{S}_{12.9}$
	40.54	0.39	4.53	2.87	—	—	н.о.	5.54	21.09	—	—	26.44	0.07	101.78	$(\text{Cu}_{101}\text{Ag}_{0.1})_{10.2}(\text{Fe}_{1.3}\text{Zn}_{0.7})_{2.0}(\text{As}_{1.2}\text{Sb}_{2.7})_{3.8}\text{S}_{13.0}$
	40.34	0.52	4.68	2.87	—	—	н.о.	5.84	20.27	—	0.06	26.39	0.07	101.03	$(\text{Cu}_{100}\text{Ag}_{0.1})_{10.1}(\text{Fe}_{1.3}\text{Zn}_{0.7})_{2.0}(\text{As}_{1.2}\text{Sb}_{2.6})_{3.8}\text{S}_{13.0}$
кайма	39.04	0.60	3.74	3.42	0.07	—	н.о.	1.59	26.24	—	0.10	26.09	—	100.90	$(\text{Cu}_{99}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{1.1}\text{Zn}_{0.8})_{1.9}(\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{3.5})_{3.8}\text{S}_{13.2}$
	39.08	0.52	4.13	3.31	0.06	—	н.о.	1.89	25.71	—	0.11	25.93	0.08	100.82	$(\text{Cu}_{100}\text{Ag}_{0.1})_{10.1}(\text{Fe}_{1.2}\text{Zn}_{0.8})_{2.0}(\text{As}_{0.4}\text{Sb}_{3.4})_{3.8}\text{S}_{13.1}$
6-1/16	40.31	—	4.53	2.84	—	—	н.о.	4.79	21.98	—	0.09	26.36	0.05	101.03	$\text{Cu}_{101}(\text{Fe}_{1.3}\text{Zn}_{0.7})_{2.0}(\text{As}_{1.0}\text{Sb}_{2.9})_{3.9}\text{S}_{13.1}$
ядро	40.41	0.06	4.39	3.04	0.09	—	н.о.	4.47	22.40	—	—	26.33	—	101.26	$\text{Cu}_{101}(\text{Fe}_{1.2}\text{Zn}_{0.7})_{1.9}(\text{As}_{0.9}\text{Sb}_{2.9})_{3.9}\text{S}_{13.0}$
	39.58	—	3.79	3.55	—	—	н.о.	1.54	26.85	—	0.13	25.77	—	101.30	$\text{Cu}_{101}(\text{Fe}_{1.1}\text{Zn}_{0.9})_{2.0}(\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{3.6})_{3.9}\text{S}_{13.0}$
кайма	39.17	—	3.58	3.61	0.15	—	н.о.	1.14	27.41	—	—	25.67	0.05	100.84	$\text{Cu}_{100}(\text{Fe}_{1.0}\text{Zn}_{0.9})_{2.0}(\text{As}_{0.2}\text{Sb}_{3.7})_{3.9}\text{S}_{13.0}$
	39.68	0.06	3.75	3.51	0.05	—	н.о.	1.37	27.28	—	—	25.65	0.07	101.44	$\text{Cu}_{101}(\text{Fe}_{1.1}\text{Zn}_{0.9})_{2.0}(\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{3.6})_{3.9}\text{S}_{13.0}$
	40.03	0.08	4.24	3.05	0.13	—	н.о.	4.15	22.80	—	0.09	26.44	0.05	101.09	$\text{Cu}_{100}(\text{Fe}_{1.2}\text{Zn}_{0.7})_{1.9}(\text{As}_{0.9}\text{Sb}_{3.0})_{3.9}\text{S}_{13.1}$
	15.88	30.02	4.32	2.03	0.03	н.о.	н.о.	—	26.36	н.о.	н.о.	21.11	—	99.72	$(\text{Cu}_{4.7}\text{Ag}_{5.2})_{9.9}(\text{Fe}_{1.4}\text{Zn}_{0.6})_{2.0}(\text{As}_{0.0}\text{Sb}_{4.1})_{4.1}\text{S}_{12.3}$
	18.03	27.76	6.41	0.29	н.о.	н.о.	н.о.	—	26.20	н.о.	н.о.	21.72	—	100.41	$(\text{Cu}_{5.2}\text{Ag}_{7.9})_{9.9}(\text{Fe}_{2.1}\text{Zn}_{0.1})_{2.2}(\text{As}_{0.0}\text{Sb}_{3.9})_{3.9}\text{S}_{12.4}$
**3-1C/16	23.87	20.15	5.44	1.53	н.о.	н.о.	н.о.	—	26.98	н.о.	н.о.	23.30	—	101.26	$(\text{Cu}_{6.6}\text{Ag}_{3.3})_{9.9}(\text{Fe}_{1.7}\text{Zn}_{0.4})_{2.1}(\text{As}_{0.0}\text{Sb}_{3.9})_{3.9}\text{S}_{12.8}$
	36.24	3.55	1.51	7.52	н.о.	н.о.	н.о.	0.21	28.20	н.о.	н.о.	25.06	—	102.28	$(\text{Cu}_{9.3}\text{Ag}_{0.5})_{9.9}(\text{Fe}_{0.4}\text{Zn}_{1.9})_{2.3}(\text{As}_{0.0}\text{Sb}_{3.8})_{3.8}\text{S}_{12.8}$
	36.18	3.26	1.21	7.46	н.о.	н.о.	н.о.	0.25	28.01	н.о.	н.о.	24.99	—	101.35	$(\text{Cu}_{6.4}\text{Ag}_{0.5})_{9.9}(\text{Fe}_{0.3}\text{Zn}_{0.6})_{2.2}(\text{As}_{0.1}\text{Sb}_{3.8})_{3.9}\text{S}_{12.9}$
Томинское месторождение															
61/124.8	37.61	0.08	0.08	0.94	8.97	2.94	—	10.57	11.59	—	0.30	26.09	0.03	99.21	$\text{Cu}_{9.8}(\text{Zn}_{0.3}\text{Cd}_{1.3}\text{Hg}_{0.2})_{1.8}(\text{As}_{2.3}\text{Sb}_{1.6})_{3.9}\text{S}_{13.4}$
	37.92	0.07	0.06	0.73	9.86	2.34	—	10.05	12.23	—	0.28	25.33	0.07	98.96	$\text{Cu}_{100}(\text{Zn}_{0.2}\text{Cd}_{1.3}\text{Hg}_{0.2})_{1.9}(\text{As}_{2.2}\text{Sb}_{1.7})_{3.9}\text{S}_{13.2}$
	39.83	0.04	0.05	0.64	9.82	2.56	—	11.01	10.19	—	0.45	26.00	0.14	100.73	$\text{Cu}_{102}(\text{Zn}_{0.2}\text{Cd}_{1.4}\text{Hg}_{0.2})_{1.8}(\text{As}_{2.4}\text{Sb}_{1.4})_{3.8}\text{S}_{13.2}$
	39.19	0.04	0.18	0.38	11.79	0.40	—	12.27	9.47	—	0.29	26.59	0.10	100.71	$\text{Cu}_{9.9}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{1.7})_{1.9}(\text{As}_{2.6}\text{Sb}_{1.3})_{3.9}\text{S}_{13.3}$
	38.44	0.04	0.15	0.65	9.21	2.48	—	11.58	10.39	—	0.26	26.18	0.09	99.59	$\text{Cu}_{9.9}(\text{Zn}_{0.3}\text{Cd}_{1.3}\text{Hg}_{0.2})_{1.8}(\text{As}_{2.5}\text{Sb}_{1.4})_{3.9}\text{S}_{13.3}$
61/246.2	39.80	0.10	0.18	0.31	11.37	0.61	—	12.14	9.57	—	0.21	25.94	0.11	100.35	$\text{Cu}_{101}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{1.6}\text{Hg}_{0.1})_{1.9}(\text{As}_{2.6}\text{Sb}_{1.3})_{3.9}\text{S}_{13.1}$
	43.01	0.60	1.62	5.32	1.30	0.30	0.34	18.87	0.73	—	0.08	28.78	0.11	101.08	$(\text{Cu}_{100}\text{Ag}_{0.1})_{10.1}(\text{Fe}_{0.4}\text{Zn}_{1.2}\text{Cd}_{0.2}\text{Co}_{0.1})_{9.9}(\text{As}_{3.7}\text{Sb}_{0.1})_{3.8}\text{S}_{13.2}$
	42.09	0.49	1.83	5.42	1.39	0.24	0.46	18.52	1.11	—	0.11	28.20	0.14	100.01	$(\text{Cu}_{99}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.5}\text{Zn}_{1.2}\text{Cd}_{0.2}\text{Co}_{0.1})_{2.0}(\text{As}_{3.7}\text{Sb}_{0.1})_{3.8}\text{S}_{13.1}$
	41.34	0.42	2.78	5.48	1.13	0.07	0.42	18.23	0.90	—	0.18	28.46	0.12	99.53	$(\text{Cu}_{9.7}\text{Ag}_{0.1})_{9.8}(\text{Fe}_{0.7}\text{Zn}_{1.3}\text{Cd}_{0.2}\text{Co}_{0.1})_{2.3}(\text{As}_{3.6}\text{Sb}_{0.1})_{3.7}\text{S}_{13.2}$
	42.88	0.43	1.49	5.96	1.05	0.38	0.27	18.62	0.74	—	0.06	28.18	0.16	100.22	$(\text{Cu}_{100}\text{Ag}_{0.1})_{10.1}(\text{Fe}_{0.4}\text{Zn}_{1.4}\text{Cd}_{0.1}\text{Co}_{0.1})_{2.0}(\text{As}_{3.7}\text{Sb}_{0.1})_{3.8}\text{S}_{13.1}$
	42.13	0.53	1.29	6.14	1.30	0.34	0.35	17.93	0.98	—	0.06	28.18	0.05	99.25	$(\text{Cu}_{99}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.4}\text{Zn}_{1.4}\text{Cd}_{0.2}\text{Co}_{0.1})_{2.1}(\text{As}_{3.6}\text{Sb}_{0.1})_{3.7}\text{S}_{13.2}$

Окончание таблицы 1

Обр.	Cu	Ag	Fe	Zn	Cd	Hg	Co	As	Sb	Te	Bi	S	Se	Сумма	Формула на 29 к.ф.
444/175	38.11	0.34	0.32	7.33	0.18	—	н.о.	5.69	20.93	—	0.51	25.66	0.10	99.17	$(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.1})_{0.9}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.9})_{2.0}(\text{As}_{1.2}\text{Sb}_{2.8})_{4.0}\text{S}_{13.1}$
	39.00	0.23	0.52	7.30	0.20	—	н.о.	6.47	19.94	—	—	26.12	—	99.78	$(\text{Cu}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.9})_{2.0}(\text{As}_{1.4}\text{Sb}_{2.6})_{4.0}\text{S}_{13.1}$
	38.80	0.19	0.42	7.49	0.22	—	н.о.	6.55	20.45	—	—	25.77	0.10	99.99	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.9})_{2.0}(\text{As}_{1.4}\text{Sb}_{2.7})_{4.1}\text{S}_{13.1}$
	38.47	0.22	0.26	7.33	0.18	—	н.о.	7.12	18.76	—	—	25.91	0.10	98.35	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.8})_{1.9}(\text{As}_{1.5}\text{Sb}_{2.5})_{4.0}\text{S}_{13.2}$
	38.24	0.36	0.39	7.12	0.21	—	н.о.	5.62	21.25	—	0.46	26.16	—	99.81	$(\text{Cu}_{0.8}\text{Ag}_{0.1})_{0.9}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.8})_{1.9}(\text{As}_{1.2}\text{Sb}_{2.8})_{4.0}\text{S}_{13.2}$
Таблицкое месторождение															
621/65	39.36	0.37	0.82	6.91	0.19	—	н.о.	5.88	21.06	—	0.20	26.13	—	100.92	$(\text{Cu}_{0.9}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.2}\text{Zn}_{1.7})_{2.0}(\text{As}_{1.3}\text{Sb}_{2.8})_{4.0}\text{S}_{13.0}$
	39.35	0.38	0.85	6.98	0.17	—	н.о.	6.27	20.95	—	0.11	26.26	—	101.32	$(\text{Cu}_{0.9}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.2}\text{Zn}_{1.7})_{2.0}(\text{As}_{1.3}\text{Sb}_{2.7})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
	38.88	0.42	0.64	7.15	0.14	—	н.о.	5.75	21.28	—	0.21	25.87	—	100.34	$(\text{Cu}_{0.9}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.2}\text{Zn}_{1.8})_{2.0}(\text{As}_{1.2}\text{Sb}_{2.8})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
	39.14	0.36	0.75	6.97	0.18	—	н.о.	5.70	21.59	—	0.06	25.93	—	100.68	$(\text{Cu}_{0.9}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.3}\text{Zn}_{1.7})_{2.0}(\text{As}_{1.2}\text{Sb}_{2.9})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
	39.18	0.30	0.78	7.06	0.13	—	н.о.	7.20	19.27	—	0.21	25.85	—	99.98	$\text{Cu}_{10.0}(\text{Fe}_{0.2}\text{Zn}_{1.7})_{2.0}(\text{As}_{1.5}\text{Sb}_{2.5})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
621/107	39.66	0.35	0.29	7.69	0.11	—	н.о.	7.12	19.19	—	—	26.15	—	100.56	$(\text{Cu}_{0.9}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.9})_{2.0}(\text{As}_{1.5}\text{Sb}_{2.5})_{4.0}\text{S}_{13.0}$
	39.74	0.33	0.27	7.62	0.17	—	н.о.	6.39	19.56	0.26	0.24	25.83	—	100.41	$\text{Cu}_{10.0}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.9})_{2.0}(\text{As}_{1.4}\text{Sb}_{2.6})_{4.0}\text{S}_{12.9}$
	39.98	0.30	0.30	7.48	0.20	—	н.о.	7.84	17.95	0.45	0.17	26.18	—	100.85	$\text{Cu}_{10.0}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.8})_{1.9}(\text{As}_{1.7}\text{Sb}_{2.3})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
	39.07	0.40	0.18	7.68	0.20	—	н.о.	5.27	21.26	0.15	0.21	25.61	—	100.03	$(\text{Cu}_{10.0}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.9})_{2.0}(\text{As}_{1.1}\text{Sb}_{2.8})_{4.0}\text{S}_{13.0}$
	39.32	0.36	0.24	7.62	0.16	—	н.о.	6.19	20.60	0.06	0.19	25.58	—	100.32	$(\text{Cu}_{10.0}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.9})_{2.0}(\text{As}_{1.3}\text{Sb}_{2.7})_{4.1}\text{S}_{12.9}$
*19/78	39.04	0.54	0.21	7.53	0.20	—	н.о.	5.63	21.86	0.13	0.20	25.64	—	100.98	$(\text{Cu}_{0.9}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.9})_{1.9}(\text{As}_{1.2}\text{Sb}_{2.9})_{4.1}\text{S}_{12.9}$
	38.92	0.56	0.26	7.41	0.21	—	н.о.	5.58	21.65	0.22	—	25.48	—	100.29	$(\text{Cu}_{0.9}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.8})_{1.9}(\text{As}_{1.2}\text{Sb}_{2.9})_{4.1}\text{S}_{12.9}$
	39.07	0.41	0.26	7.57	0.16	—	н.о.	5.88	21.27	0.07	0.22	25.66	—	100.57	$(\text{Cu}_{0.9}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.9})_{2.0}(\text{As}_{1.3}\text{Sb}_{2.8})_{4.1}\text{S}_{12.9}$
	38.38	0.53	0.25	7.39	0.16	—	н.о.	4.80	22.59	0.06	—	25.43	—	99.59	$(\text{Cu}_{0.9}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.9})_{1.9}(\text{As}_{1.0}\text{Sb}_{3.0})_{4.1}\text{S}_{13.0}$
	38.31	0.51	0.14	7.87	0.17	—	н.о.	3.75	24.03	0.17	—	25.36	—	100.31	$(\text{Cu}_{0.9}\text{Ag}_{0.1})_{10.0}\text{Zn}_{2.0}(\text{As}_{0.8}\text{Sb}_{3.2})_{4.1}\text{S}_{12.9}$
*19/78	38.58	—	0.20	7.30	0.30	—	—	5.76	22.26	—	—	26.60	—	100.00	$\text{Cu}_{0.9}(\text{Fe}_{0.1}\text{Zn}_{1.8})_{1.9}(\text{As}_{1.2}\text{Sb}_{3.0})_{4.2}\text{S}_{13.0}$

Примечание. Прочерк — ниже предела обнаружения; н.о. — элемент не определялся; * — энергодисперсионный анализ; ** — рассчитано на 16 катионов.

Note. Dash — below detection limit; н.о. — not analyzed; * — EDS analysis; ** — calculated for 16 cations.

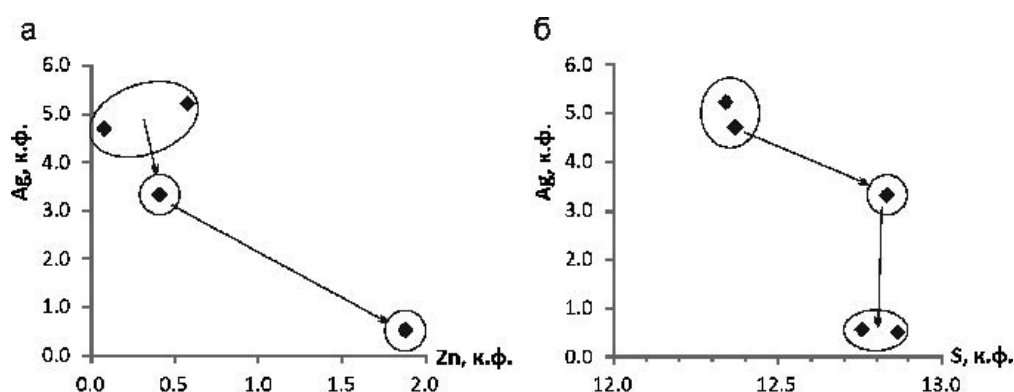


Рис. 4. Диаграммы Ag–S (а) и Ag–Zn (б) (формульные коэффициенты) для зонального выделения блѣклой руды из образца 3-1С/16.

Стрелками показана эволюция состава.

Fig. 4. Ag vs. S (a) and Ag vs. Zn (б) diagrams (formula unit) for zoned fahlore from sample 3-1C/16.

Arrows show temporal evolution.

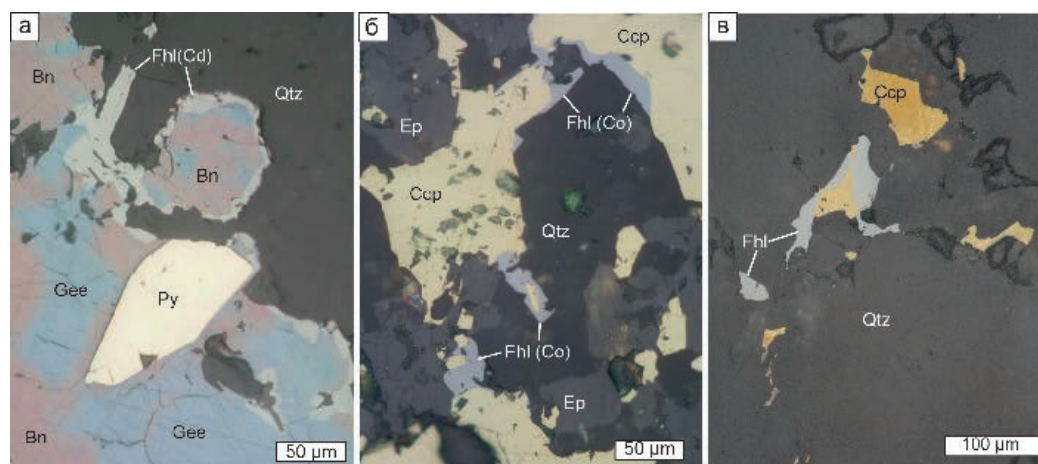


Рис. 5. Блѣкые руды Томинского месторождения, Калиновский участок: а – кайма тетраэдрита-(Cd) вокруг борнит-джеритового агрегата, обр. 61/124.8; б – кайма теннантита вокруг халькопирита, обр. 61/246.2; в – тетраэдрит, обрастающий халькопирит, обр. 444/175.

Gee – джерит, Bn – борнит, Ep – эпидот. Отражѣнный свет.

Fig. 5. Fahlores of the Tomino porphyry copper deposit, Kalinovskoe site: а – tetrahedrite-(Cd) around bornite-geerite aggregate, sample 61/124.8; б – tennantite overgrowing chalcopyrite, sample 61/246.2; в – tetrahedrite overgrowing chalcopyrite, sample 444/175.

Gee – geerite, Bn – bornite, Ep – epidote. Reflected light.

Талицкое Мо-порфировое месторождение. Минералы группы блѣклых руд на месторождении чрезвычайно редки: они установлены только в составе минерализации полиметаллической стадии в трёх образцах. Блѣкые руды образуют изометричные выделения размером первые сотни микрометров в поздних прожилках белого кварца с флюоритом (рис. 7а). Как правило, блѣкые руды обрастают галенит, сфалерит и халькопирит и более ранние пирит и молибденит (рис. 7б), т. е. являются наиболее поздними.

Блѣкые руды представлены теннантит-тетраэдритами-(Zn) с преобладанием тетраэдритового минала: содержания As составляют от 0.8 до 1.8 ф.к., а Fe – от 0.04 до 0.23 ф.к. (таблица). Постоянно присутствуют незначительные примеси Ag (0.30–0.56 мас. %), Cd (0.11–0.21 мас. %) и Bi (до 0.24 мас. %). Выделения блѣклой руды довольно однородные и вариации As и Sb в пределах зерен не превышают 2–3 мас. % (таблица, рис. 8).

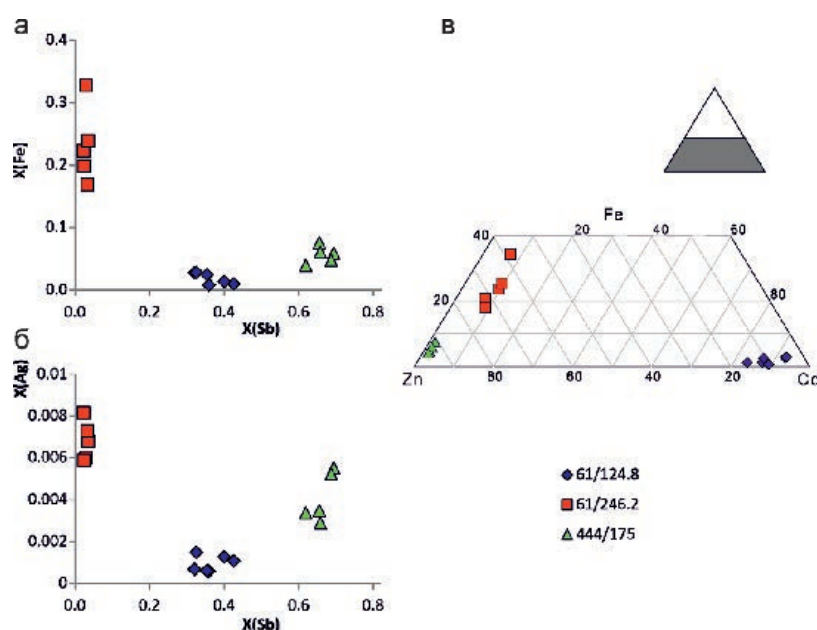


Рис. 6. Диаграммы X(Sb)–X(Fe) (а), X(Sb)–X(Ag) (б) и Fe–Zn–Cd (в) для блёклых руд Томинского месторождения.
Fig. 6. X(Sb) vs. X(Fe) (a), X(Sb) vs. X(Ag) (b) and Fe–Zn–Cd ternary (c) diagrams for fahlores of the Tomino deposit.

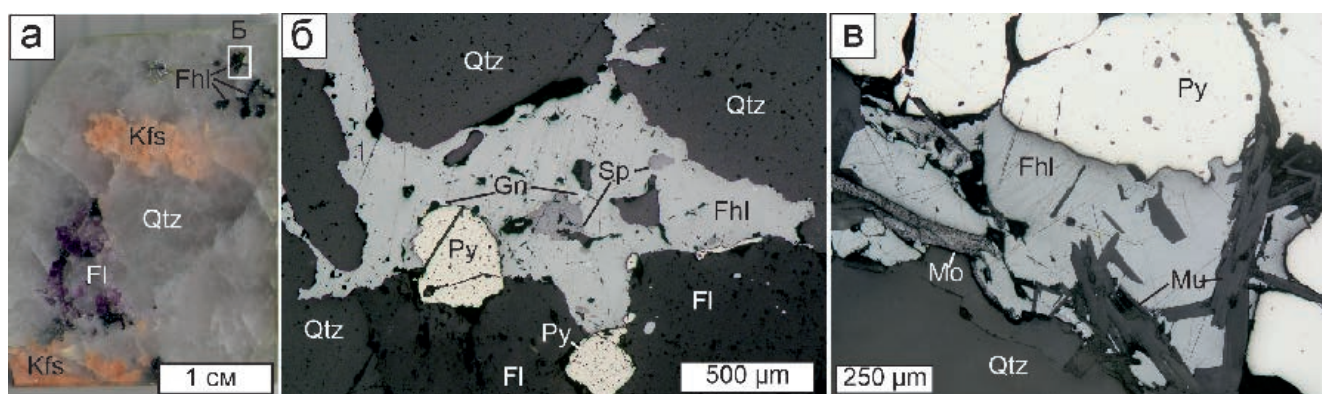


Рис. 7. Блёклые руды Талицкого месторождения: а – кварцевый прожилок с реликтами калиевого полевого шпата и гнездами флюорита и блёклой руды, обр. 621/107; б – увеличенный фрагмент рисунка (а): блёклая руда с включениями галенита и сфалерита на границе кварца и флюорита; в – блёклая руда, обрастающая мусковит, пирит и молибденит, обр. 621/65.

Kfs – калиевый полевой шпат, Fl – флюорит, Mu – мусковит, Mo – молибденит. Отражённый свет.

Fig. 7. Fahlores of the Talitsa deposit: a – quartz veinlet with K-feldspar relics and pockets of fluorite and fahlore, sample 621/107; б – detail of Fig. a: fahlore with inclusions of galena and sphalerite at the boundary of quartz and fluorite; в – fahlore overgrowing muscovite, pyrite and molybdenite, sample 621/65.

Kfs – K-feldspar, Fl – fluorite, Mu – muscovite, Mo – molybdenite. Reflected light.

Обсуждение результатов

Условия образования минералов группы блёклых руд. На Михеевском месторождении исследование флюидных включений в кварце, ассоциирующем с блёклыми рудами, было проведено в двух образцах. В кварце из образца, представляющего прожилково-вкрапленную минерализацию (М-10405/145)

температуры гомогенизации в жидкость составили 200–230 °С, а солёность – 19.3–20.9 мас.% NaCl-экв.; температуры эвтектики от –62.2 до –57.0 °С свидетельствуют о преобладании во флюиде хлорида кальция (Plotinskaya et al., 2018; Groznova et al., 2019). В образце М-1-9/15, представляющем субэпитермальную жильную минерализацию, температуры гомогенизации составили 280–320 °С, со-

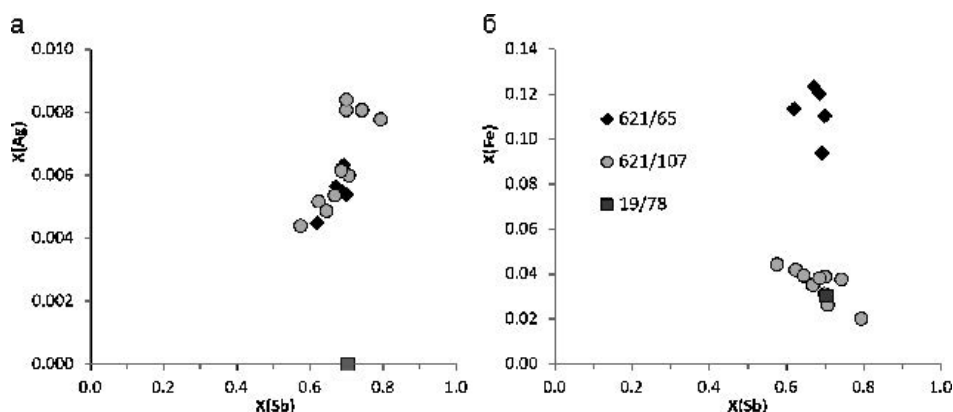


Рис. 8. Диаграммы X(Sb)–X(Ag) (а) и X(Sb)–X(Fe) (б) для блѣклых руд Талицкого месторождения.
Fig. 8. X(Sb) vs X(Ag) (a) and X(Sb) vs X(Fe) diagrams (б) for fahlores of the Talitsa deposit.

леность – 10.2–11.0 мас.% NaCl-экв.; температуры эвтектики от –29.0 до –27.5 °C говорят о преобладании во флюиде хлорида натрия (Plotinskaya et al., 2018; Groznova et al., 2019). Температуры образования хлорита из образца М-10405/145, рассчитанные по (Котельников и др., 2012) составили 177–241 °C, что хорошо согласуется с результатами исследования флюидных включений (Plotinskaya et al., 2018).

На Томинском месторождении температуры образования хлорита в борнитовой ассоциации из образца К61/124,8, рассчитанные по (Котельников и др., 2012), составили 227–278 °C, среднее из пяти значений 244 °C. На месторождении Талицкое исследование флюидных включений во флюорите, на который нарастают минералы полиметаллической ассоциации (Грознова, Плотинская, 2021), показало, что он образовался при температурах 257–271 °C из слабосоленого флюида (3.2–7.2 мас.% NaCl-экв.), в котором преобладали хлориды железа и магния (температуры эвтектики от –28.5 до –29.8 °C). Таким образом, температуры образования минералов группы блѣклых руд относительно низки и редко превышают 300 °C.

Формационная принадлежность минерализации, содержащей блѣклые руды. На изученных нами порфировых месторождениях сульфидно-кварцевые и сульфидно-кварц-карбонатные жилы и прожилки, содержащие блѣклые руды, характеризуются следующими особенностями. Они развиты исключительно в пределах этих порфировых систем и находятся либо в контуре развития промышленных медно-порфировых руд, либо в непосредственной близости к нему. В пределах наиболее детально изученных нами порфировых месторождений (прежде всего, Михеевского) их распре-

ление имеет характерную зональность: жилы приурочены к периферии систем и именно к верхним горизонтам (Plotinskaya et al., 2018). Это говорит о том, что они развивались в пределах тех же рудно-магматических систем, что и медно-порфировая минерализация.

Изучение изотопного состава свинца, которое было проведено для всех описанных месторождений (Plotinskaya et al., 2017; Плотинская, Чугаев, 2019), показало, что на каждом месторождении сульфиды из разных стадий и из разнотипной минерализации, а также рудоносные гранитоиды характеризуются близким изотопным составом свинца, т. е. имеют общий источник вещества, и, таким образом, являются производными единой рудно-магматической системы. Небольшие отличия в изотопном составе поздней минерализации заключаются в увеличении доли радиогенного свинца. Это объясняется вовлечением в систему на «эпитермальной стадии развития» циркулирующих метеорных вод, что может приводить к незначительному вкладу вещества из вмещающих осадочных пород. Скорее всего, этот вклад явился причиной появления повышенных содержаний Hg и Cd в блѣклых рудах Томинского месторождения. Все перечисленное выше позволяет утверждать, что изученная нами минерализация и собственно минералы группы блѣклых руд являются производными порфировых систем.

Сравнение с минералами группы блѣклых руд других регионов. На всех изученных месторождениях Урала минералы группы блѣклых руд относятся либо к поздним минеральным ассоциациям порфировой стадии, либо к жильной субэпитермальной минерализации, секущей более раннюю прожилково-вкрапленную минерализацию порфи-

рового типа. На диаграмме $X(\text{Fe})$ – $X(\text{Sb})$ фигуративные точки блёклых руд Талицкого и Томинского месторождений попадают в поле блёклых руд из «переходной» субэпитермальной минерализации (рис. 9а). Блёклые руды Михеевского месторождения отличаются более высокими содержаниями Fe и по составу близки к блёклым рудам, характерным для минерализации порфирового типа, согласно обзору (Marushchenko et al., 2018). Это, по-видимому, вызвано более высоким содержанием Fe во флюиде Михеевской гидротермальной системы за счет широкого развития вмещающих пород основного состава.

Высокие содержания Cd в блёклых рудах, установленные в одном образце из Томинского месторождения (таблица), встречаются чрезвычайно редко (Мозгова, Цепин, 1983; Biagioni et al., 2020). Они отмечены на некоторых орогенных золоторудных месторождениях, например, Тиндрам (*Tyndrum*), Шотландия (Pattrick, 1978) и Красное, Бодайбинский район (Паленова и др., 2015), на месторождении седекс-типа Ситишань (*Xitieshan*), Китай (Jia et al., 1988), на стратиформном месторождении Ушкатын-III, Казахстан (Воропаев и др., 1988; Спиридонов и др., 1988), на кобальтовом месторождении Тунаберг, Швеция (Dobbe, 1992), в жилах рудного района Беренгуэла (Biagioni et al., 2022), а также на жильном золотосеребряном месторождении

Каллиано (*Kallianou*), Греция, генезис которого является дискуссионным (Voudouris et al., 2011). Таким образом, причиной повышенных содержаний Cd являются, по-видимому, особенности вмещающих пород, а не генетический тип месторождения.

Повышенные содержания Ag в блёклых рудах, установленные в одном образце Михеевского месторождения, в целом, не типичны для месторождений порфирового типа (Marushchenko et al., 2018). Они характерны для низкосульфидизированных эпитермальных золотосеребряных месторождений (рис. 9б). Низкосульфидизированная обстановка могла возникнуть в конце формирования субэпитермальных жил Михеевского месторождения после массового осаждения сульфидов, что и привело к образованию фрейбергита и ассоциирующего с ним полибазита.

Для большинства изученных блёклых руд не характерно сложное зональное строение: их выделения либо химически однородны, либо характеризуются однородным ядром промежуточного теннантит-тетраэдритового состава и каймой, в которой преобладает тетраэдритовый минал. Это свидетельствует об относительно спокойной обстановке минералообразования, без резких колебаний физико-химических параметров рудообразующего флюида, что, в целом, типично для порфировых месторождений.

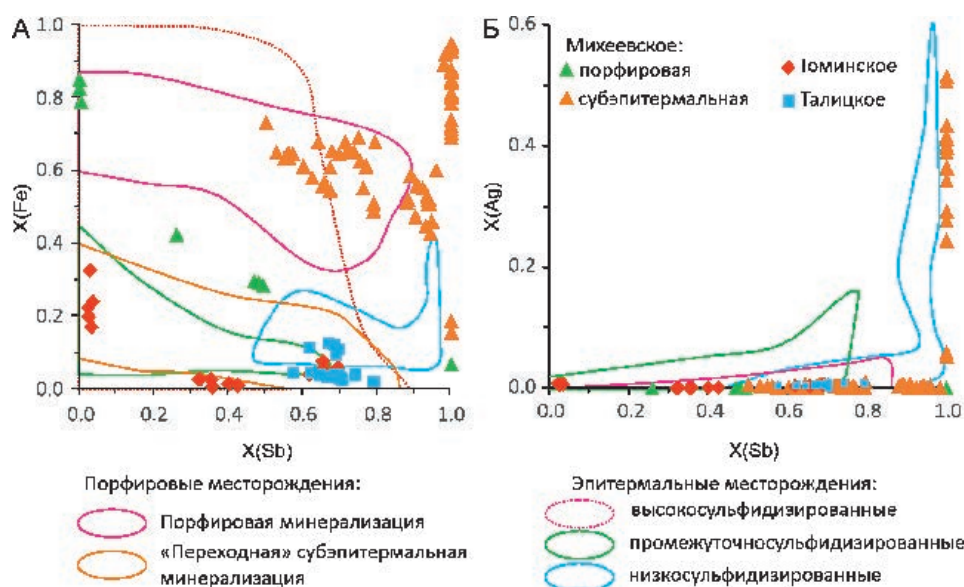


Рис. 9. Сравнение химического состава блёклых руд порфировых месторождений Урала и Cu(Mo)-порфировых месторождений других регионов по (Marushchenko et al., 2018 и цитируемая литература).

Fig. 9. Chemical variations of fahlores from porphyry deposits of the Urals (this study) compared with fahlores from porphyry Cu(Mo) deposits worldwide (Marushchenko et al., 2018 and references therein).

Выводы

1. На изученных месторождениях минералы группы блѣклых руд относятся либо к поздним минеральным ассоциациям порфировой стадии, либо к жильной субэпитептермальной минерализации. По составу они варьируют от теннантита до тетраэдрита с варьирующими соотношениями Fe и Zn, примеси Te, Bi, Ag для них не характерны.

2. Для большинства изученных блѣклых руд не характерно сложное зональное строение: они либо химически однородны, либо характеризуются однородным ядром промежуточного теннантит-тетраэдритового состава и каймой, в которой преобладает тетраэдритовый минерал. Однородность состава, по-видимому, свидетельствует об отсутствии резких колебаний физико-химических параметров рудообразующего флюида.

3. Изученные блѣклые руды по составу близки к блѣклым рудам, характерным для «переходной» субэпитептермальной минерализации.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГЕМ РАН. Авторы признательны А.И. Грабежеву за предоставленную коллекцию образцов месторождения Талицкое и коллективу ОАО «Русская медная компания» за помощь при полевых работах на Томинском и Михеевском месторождениях, а также С.Е. Борисовскому и А.Н. Некрасову за выполненные анализы. Мы выражаем благодарность анонимному рецензенту за конструктивные замечания.

Литература

Азовскова О.Б., Грабежев А.И. (2008) Талицкое медно-молибден-порфировое месторождение – первый объект субщелочной порфировой системы на Среднем Урале. *Доклады Академии наук*, **418**(2), 237–240.

Вестник золотопромышленника (2017) <https://gold.lprime.ru/news/20170920/226023.html> (последнее обращение 06/05/2022)

Воропаев А.В., Спиридонов Э.М., Шибрик В.И. (1988) Тетраэдрит-Cd – первая находка в СССР. *Доклады АН СССР*, **300**(6), 1446–1448.

Грабежев А.И., Белгородский Е.А. (1992) Продуктивные гранитоиды и метасоматиты медно-порфировых месторождений. Екатеринбург, ИГТ УрО РАН, 199 с.

Грабежев А.И., Ронкин Ю.Л. (2011) U-Pb возраст цирконов из рудоносных гранитоидов медно-порфировых месторождений Южного Урала. *Литосфера*, **11**(3), 104–116.

Грабежев А.И., Кузнецов Н.С., Пужаков Б.А. (1998) Рудно-метасоматическая зональность медно-порфировой колонны натриевого типа (парагонитсодержащие ореолы, Урал). Екатеринбург, УГГГА, 172 с.

Грознова Е.О., Плотинская О.Ю. (2021) Флюидные включения, как инструмент для изучения рудообразующих процессов в порфирово-эпитептермальных системах Урала. *XXVII Всероссийская научная конференция «Уральская минералогическая школа-2021»*. Екатеринбург, ООО Универсальная Типография «Альфа Принт», 33–35.

Котельников А.Р., Сук Н.И., Котельникова З.А., Щекина Т.И., Калинин Г.М. (2012) Минеральные геотермометры для низкотемпературных парагенезисов. *Вестник ОНЗ РАН*, **4**, NZ9001, https://doi.org/10.2205/2012NZ_ASEMPG

Любимцева Н.Г., Бортников Н.С., Борисовский С.Е., Прокофьев В.Ю., Викентьева О.В. (2018) Блѣклая руда и сфалерит золоторудного месторождения Дарасун (Восточное Забайкалье, Россия). Часть 1: минеральные ассоциации и сростания, химический состав и его эволюция. *Геология рудных месторождений*, **60**(2), 109–140.

Любимцева Н.Г., Прокофьев В.Ю., Бортников Н.С. (2021) Сосуществующие тетраэдрит-(Zn) и сфалерит на золоторудном месторождении Теремки (Восточное Забайкалье): химический состав и условия образования. *Геология рудных месторождений*, **63**(5), 476–486.

Мозгова Н.Н., Цепин А.И. (1983) Блѣклые руды (особенности химического состава и свойств). М., Наука, 280 с.

Паленова Е.Е., Блинов И.А., Заботина М.В. (2015) Минералы серебра в кварцевых жилах рудопроявления золота Красное (Бодайбинский район). *Минералогия*, **1**(2), 9–17.

Плотинская О.Ю., Грабежев А.И., Зелтманн Р. (2015) Состав блѣклых руд как элемент зональности порфирово-эпитептермальной системы (на примере рудопроявления Биксизак, Ю. Урал). *Геология рудных месторождений*, **57**(1) 48–70.

Плотинская О.Ю., Чугаев А.В. (2019) Свинцово-изотопные характеристики порфировых месторождений Южного Урала как индикатор мантийно-корового взаимодействия. *Металлогения древних и современных океанов–2019. Четверть века достижений в изучении субмаринных месторождений*. Миасс: ООО «Форт-Диалог-Исеть», 110–114.

Пужаков Б.А. (1999) Продуктивные гранитоиды, метасоматоз и оруденение Биргильдинско-Томинского рудного узла. *Дис. на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук*. Екатеринбург, ИГТ УрО РАН, 116 с.

Русская медная компания. <http://rmk-group.ru/ru/activities/enterprises/mikheevsky/> (последнее обращение 06/06/2022)

Сахарова М.С. (1966) О зависимости состава блѣклых руд от условий минералообразования / Очерки гео-

химии эндогенных и гипергенных процессов. М., Наука, 109–118.

Смирнов В.Н., Иванов К.С., Шокальский С.П., Ронкин Ю.Л. (2017) Результаты U-Pb SHRIMP-II датирования циркона из гранитоидов Талицкого молибденоносного массива (восточный склон Среднего Урала). *Литосфера*, **17**(3), 145–150.

Спиридонов Э.М., Петров В.К., Воропаев А.В. (1988) О влиянии кадмия на оптические свойства блёклых руд. *Доклады АН СССР*, **303**(2), 463–466.

Томинский ГОК. <http://tomgok.ru> (последнее обращение 14/01/2020)

Шаргородский Б.М., Новиков И.М., Аксенов С.А. (2005) Михеевское месторождение медно-порфировых руд на Южном Урале. *Отечественная геология*, (2), 57–61.

Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moëlo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F. (2020) The tetrahedrite group: Nomenclature and classification. *American Mineralogist*, **105**, 109–122.

Biagioni C., Kasatkin A., Sejkora J., Nestola F., Škoda R. (2022) Tennantite-(Cd), $\text{Cu}_6(\text{Cu}_4\text{Cd}_2)\text{As}_4\text{S}_{13}$, from the Berenguela mining district, Bolivia: The first Cd-member of the tetrahedrite group. *Mineralogical Magazine*, 1–22. doi:10.1180/mgm.2022.61

Catchpole H., Kouzmanov K., Fontbote L. (2012) Copper-excess stannoidite and tennantite-tetrahedrite as proxies for hydrothermal fluid evolution in a zoned Cordilleran type base-metal district, Morococha, Central Peru. *The Canadian Mineralogist*, **50**, 719–743.

Dobbe R. (1992) Manganoan-cadmian tetrahedrite from the Tunaberg Cu-Co deposit, Bergslagen, central Sweden. *Mineralogical Magazine*, **56**(382), 113–115.

Groznova E., Abramov S., Plotinskaya O., Bocharov V.N. (2019) Mikheevskoe porphyry copper deposit: conditions of ore formation; insights from fluid inclusion study and alteration mineralogy. *Acta mineralogica-petrographica. Abstract series*, **10**, 48.

Jia D., Fu Z., Zhang H., Zhao C. (1988) The first discovery of Cd-freibergite in China. *Acta Mineralogica Sinica*, **8**, 136–137. (in Chinese, with English abstract).

Krismer M., Vavtar F., Tropper P., Kaindl R., Sartory B. (2011) The chemical composition of tetrahedrite-tennantite ores from the prehistoric and historic Schwaz and Brixlegg mining areas (North Tyrol, Austria). *European Journal of Mineralogy*, **23**, 925–936.

Lynch J.V.G. (1989) Large-scale hydrothermal zoning reflected in the tetrahedrite-freibergite solid solution, Keno Hill Ag-Pb-Zn district, Yukon. *The Canadian Mineralogist*, **27**, 383–400.

Marushchenko L.I., Baksheev I.A., Nagornaya E.V., Chitalin A.F., Nikolaev Yu.N., Vlasov E.A. (2018) Compositional evolution of the tetrahedrite solid solution in porphyry-epithermal system: A case study of the Baimka Cu-Mo-Au trend, Chukchi Peninsula, Russia. *Ore Geology Reviews*, **103**, 21–37.

Patrick R.A.D. (1978) Microprobe analysis of cadmium-rich tetrahedrites from Tyndrum, Perthshire, Scotland. *Mineralogical Magazine*, **42**, 286–288.

Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltsmann R., Spratt J. (2018) Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting. *Ore Geology Reviews*, **94**, 239–260.

Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Groznova E.O., Seltsmann R., Lehmann B. (2014) The Late Paleozoic porphyry-epithermal spectrum of the Birgilda-Tomino ore cluster in the South Urals, Russia. *Journal of Asian Earth Sciences*, **79B**, 910–931.

Puchkov V.N. (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: What, where, when and why. *Ore Geology Reviews*, **85**, 4–29.

Repstock A., Voudouris P., Zeug M., Melfos V., Zhai M., Li H., Kartal T., Matuszczak J. (2016) Chemical composition and varieties of fahlore-group minerals from Oligocene mineralization in the Rhodope area, Southern Bulgaria and Northern Greece. *Mineralogy and Petrology*, **110**(1), 103–123.

Sack R.O., Lynch J.V.G., Foit Jr.F. (2003) Fahlore as a petrogenetic indicator: Keno Hill Ag-Pb-Zn District, Yukon, Canada. *Mineralogical Magazine*, **67**(5), 1023–1038.

Stade S., Mordhorst T., Neumann R., Prebeck W., Markl G. (2010) Compositional variation of the tennantite-tetrahedrite solid solution series in the Schwarzwald ore district (SW Germany): the role of mineralization processes and fluid source. *Mineralogical Magazine*, **74**(2) 309–339.

Singer D.A., Berger V.I., Moring B.C. (2008) Porphyry copper deposits of the world: database and grade and tonnage models. Open-File Report 2008-1155.

Tessalina S.G., Plotinskaya O.Y. (2017) Silurian to Carboniferous Re-Os molybdenite ages of the Kalinovskoe, Mikheevskoe and Talitsa Cu-Mo porphyry deposits in the Urals: implications for geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, **85**, 174–180.

Vassileva R.D., Atanassova R., Kouzmanov K. (2014) Tennantite-tetrahedrite series from the Madan Pb-Zn deposits, Central Rhodopes, Bulgaria. *Mineralogy and Petrology*, **108**(4), 515–531.

Voudouris P.C., Spry P.G., Sakellaris G.A., Mavrogenatos C. (2011) A cervelleite-like mineral and other Ag-Cu-Te-S minerals [Ag_2CuTeS and $(\text{Ag,Cu})_2\text{TeS}$] in gold-bearing veins in metamorphic rocks of the Cycladic Blueschist Unit, Kallianou, Evia Island, Greece. *Mineralogy and Petrology*, **101**, 169–183.

References

Azovskova O.B., Grabezhev A.I. (2008) The Talitsa porphyry copper-molybdenum deposit, the first object of a subalkaline porphyry system in the Central Urals. *Doklady Earth Sciences*, **418**(1), 99–102.

- Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moëlo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F.** (2020) The tetrahedrite group: Nomenclature and classification. *American Mineralogist*, 105, 109–122.
- Biagioni C., Kasatkin A., Sejkora J., Nestola F., Škoda R.** (2022) Tennantite-(Cd), $\text{Cu}_6(\text{Cu}_4\text{Cd}_2)\text{As}_4\text{S}_{13}$, from the Berenguela mining district, Bolivia: The first Cd-member of the tetrahedrite group. *Mineralogical Magazine*, 1–22. doi:10.1180/mgm.2022.61
- Catchpole H., Kouzmanov K., Fontbote L.** (2012) Copper-excess stannoidite and tennantite-tetrahedrite as proxies for hydrothermal fluid evolution in a zoned Cordilleran type base-metal district, Morococha, Central Peru. *The Canadian Mineralogist*, 50, 719–743.
- Dobbe R.** (1992) Manganoan-cadmian tetrahedrite from the Tunaberg Cu-Co deposit, Bergslagen, central Sweden. *Mineralogical Magazine*, 56(382), 113–115.
- [Gold miner's bulletin] (2017) <https://gold.1prime.ru/news/20170920/226023.html> (last addressed 06/05/2022) (in Russian)
- Grabezhev A.I., Belgorodskii E.A.** (1992) [Ore-bearing granitoids and metasomatites of copper porphyry deposits]. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 199 p. (in Russian)
- Grabezhev A.I., Ronkin Y.L.** (2011) [U-Pb age of zircons from ore-bearing granitoids of the South Urals porphyry-copper deposits]. *Lithosphere [Litosfera]*, 11(3), 104–116. (in Russian)
- Grabezhev A.I., Kuznetsov N.S., Puzhakov B.A.** (1998) [Ore and alteration zoning of sodium type copper-porphyry column (paragonite-bearing aureoles, the Urals)]. Yekaterinburg, UGGA, 172 p. (in Russian)
- Groznova E.O., Plotinskaya O.Yu.** (2021) [Fluid inclusions as a tool for studying ore-forming processes in porphyry-epithermal systems of the Urals]. *XXVII Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya «Uralskaya mineralogicheskaya shkola-2021» [XXVII All-Russian conference «Uralian mineralogical school-2021»]*. Yekaterinburg, OOO Universalnaya Tipografiya «Alfa Print», p. 33–35. (in Russian)
- Groznova E., Abramov S., Plotinskaia O., Bocharov V.N.** (2019) Mikheevskoe porphyry copper deposit: conditions of ore formation; insights from fluid inclusion study and alteration mineralogy. *Acta mineralogica-petrographica. Abstract series*, 10, 48.
- Jia D., Fu Z., Zhang H., Zhao C.** (1988) The first discovery of Cd-freibergite in China. *Acta Mineralogica Sinica*, 8, 136–137. (in Chinese, with English abstract).
- Kotelnikov A.R., Suk, N.I., Kotelnikova Z.A., Tschekina T.I., Kalinin G.M.** (2012) [Mineral geothermometers for low-temperature paragenesis]. *Vestnik Otdelenia nauk o Zemle [Bulletin of the Earth Sciences Branch of RAS]*, 4, NZ9001, https://doi.org/10.2205/2012NZ_ASEMPG
- Krismer M., Vavtar F., Tropper P., Kaindl R., Sartory B.** (2011) The chemical composition of tetrahedrite-tennantite ores from the prehistoric and historic Schwaz and Brixlegg mining areas (North Tyrol, Austria). *European Journal of Mineralogy*, 23, 925–936.
- Lynch J.V.G.** (1989) Large-scale hydrothermal zoning reflected in the tetrahedrite-freibergite solid solution, Keno Hill Ag-Pb-Zn district, Yukon. *The Canadian Mineralogist*, 27, 383–400.
- Lyubimtseva N.G., Bortnikov N.S., Borisovsky S.E., Prokofiev V.Y., Vikent'eva O.V.** (2018) Fahlore and sphalerite from the darasun gold deposit in the Eastern Transbaikalian region, Russia: I. Mineral assemblages and intergrowths, chemical composition, and its evolution. *Geology of Ore Deposits*, 60(2), 93–120.
- Lyubimtseva N.G., Prokof'ev V.Y., Bortnikov N.S.** (2021) Coexisting tetrahedrite-(Zn) and sphalerite at the Teremki gold-ore deposit (East Transbaikalia): chemical composition and formation conditions. *Geology of Ore Deposits*, 63(5), 454–464.
- Marushchenko L.I., Baksheev I.A., Nagornaya E.V., Chitalin A.F., Nikolaev Yu.N., Vlasov E.A.** (2018) Compositional evolution of the tetrahedrite solid solution in porphyry-epithermal system: A case study of the Baimka Cu-Mo-Au trend, Chukchi Peninsula, Russia. *Ore Geology Reviews*, 103, 21–37.
- Mozgova N.N., Tsepin A.I.** (1983) [Fahlores (chemical composition and properties)]. Moscow, Nauka, 280 p. (in Russian)
- Palenova E.E., Blinov I.A., Zabolotina M.V.** (2015) [Silver minerals from quartz veins of the Krasnoe deposit (Bodaybo ore region)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, (2), 9–17. (in Russian)
- Patrick R.A.D.** (1978) Microprobe analysis of cadmium-rich tetrahedrites from Tyndrum, Perthshire, Scotland. *Mineralogical Magazine*, 42, 286–288.
- Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltmann R., Spratt J.** (2018) Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting. *Ore Geology Reviews*, 94, 239–260.
- Plotinskaya O.Y., Chugaev A.V.** (2019) [Lead isotope characteristics of porphyry deposits of the South Urals as proxies of mantle-crustal interactions]. *Metallogeniya drevnih i sovremennykh okeanov-2019. CHetvert' veka dostizhenij v izuchenii submarinnykh mestorozhdenij [Metallogeny of ancient and modern oceans-2019. Twenty five years of advances in study of submarine deposits]*. Miass: OOO Fort-Dialog-Iset], 110–114. (in Russian)
- Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Groznova E.O., Seltmann R., Lehmann B.** (2014) The Late Paleozoic porphyry-epithermal spectrum of the Birgilda-Tomino ore cluster in the South Urals, Russia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79B, 910–931.
- Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Seltmann R.** (2015) Fahlores compositional zoning in a porphyry-epithermal system: Biksizak occurrence, South Urals, Russia as an example. *Geology of Ore Deposits*, 57(1), 42–63.

- Puchkov V.N.** (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: What, where, when and why. *Ore Geology Reviews*, **85**, 4–29.
- Puzhakov B.A.** (1999) [Productive granitoids, metasomatism, and mineralization of the Birgil'da–Tomino ore cluster]. *Dissertation of Candidate of Geological-Mineralogical Sciences*. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 116 p. (in Russian)
- Repstock A., Voudouris P., Zeug M., Melfos V., Zhai M., Li H., Kartal T., Matuszczak J.** (2016) Chemical composition and varieties of fahlore-group minerals from Oligocene mineralization in the Rhodope area, Southern Bulgaria and Northern Greece. *Mineralogy and Petrology*, **110**(1), 103–123.
- [Russian copper company]. <http://rmk-group.ru/en/activities/enterprises/mikheevsky/> (last addressed 06/06/2022) (in Russian)
- Sack R.O., Lynch J.V.G., Foit Jr. F.** (2003) Fahlore as a petrogenetic indicator: Keno Hill Ag-Pb-Zn District, Yukon, Canada. *Mineralogical Magazine*, **67**(5), 1023–1038.
- Sakharova M.S.** (1966) [Correlation between composition of fahlores and mineral forming conditions] In: *Ocherki geokhimii endogennykh i gipergennykh protsessov [Essays of Geochemistry of Endogenic and Supergene Processes]*. Moscow, Nauka, 109–118. (in Russian)
- Staude S., Mordhorst T., Neumann R., Prebeck W., Markl G.** (2010) Compositional variation of the tennantite–tetrahedrite solid solution series in the Schwarzwald ore district (SW Germany): the role of mineralization processes and fluid source. *Mineralogical Magazine*, **74**(2) 309–339.
- Shargorodsky B.M., Novikov I.M., Aksenov S.A.** (2005) [The Mikheevskoe copper porphyry deposit in the South Urals]. *Otechestvennaya Geologia [National Geology]*, (2), 57–61 (in Russian).
- Singer D.A., Berger V.I., Moring B.C.** (2008) Porphyry copper deposits of the world: database and grade and tonnage models. Open-File Report 2008-1155.
- Smirnov V.N., Ivanov K.S., Shokalsky S.P., Ronkin Yu.L.** (2017) [The results of U-Pb SHRIMP-II dating of zircon from granitoids of Talitsky molybdenum-bearing massif (eastern slope of the Middle Urals)]. *Lithosphere [Litosfera]*, **17**(3), 145–150. (in Russian)
- Spiridonov E.M., Petrov V.K., Voropaev A.V.** (1988) [The influence of Cd on optical properties of fahlores]. *Doklady Akademii Nauk SSSR [Doklady Academy of Sciences of the USSR]*, **303**(2), 463–466. (in Russian)
- Tessalina S.G., Plotinskaya O.Y.** (2017) Silurian to Carboniferous Re-Os molybdenite ages of the Kalinovskoe, Mikheevskoe and Talitsa Cu-Mo porphyry deposits in the Urals: implications for geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, **85**, 174–180.
- [Tominsky processing plant] <http://tomgok.ru> (last addressed 14/01/2020)
- Vassileva R.D., Atanassova R., Kouzmanov K.** (2014) Tennantite-tetrahedrite series from the Madan Pb-Zn deposits, Central Rhodopes, Bulgaria. *Mineralogy and Petrology*, **108**(4), 515–531.
- Voropaev A.V., Spiridonov E.M., Shchibrik V.I.** (1988) [Tetrahedrite-Cd – the first finding in the USSR]. *Doklady Akademii Nauk SSSR [Doklady Academy of Sciences of the USSR]*, **300**(6), 1446–1448. (in Russian)
- Voudouris P.C., Spry P.G., Sakellaris G.A., Mavrogenatos C.** (2011) A cervelleite-like mineral and other Ag-Cu-Te-S minerals [Ag₂CuTeS and (Ag,Cu)₂TeS] in gold-bearing veins in metamorphic rocks of the Cycladic Blueschist Unit, Kallianou, Evia Island, Greece. *Mineralogy and Petrology*, **101**, 169–183.