

УДК 549.3

Ag-СОДЕРЖАЩИЙ ТЕТРАЭДРИТ-(Cd), $(\text{Cu}, \text{Ag})_6(\text{Cu}_4\text{Cd}_2)\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, ИЗ ГАЛЕНИТ-ФЛЮОРИТОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОН-ДАРА (ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ПАМИР) – ПЕРВАЯ НАХОДКА В ТАДЖИКИСТАНЕ

© 2024 г. Н. Г. Любимцева¹*, академик РАН Н. С. Бортников¹, В. М. Гекийянц², С. Е. Борисовский¹, П. Ю. Плечов²

Поступило 20.06.2024 г.

После доработки 26.06.2024 г.

Принято к публикации 27.06.2024 г.

Тетраэдрит-(Cd), $\text{Cu}_{10}\text{Cd}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, является представителем тетраэдритовой серии группы тетраэдрита с преобладанием Cd в позиции С, как правило, занимаемой двухвалентными металлами. Крайние кадмиевые минералы из группы тетраэдрита встречаются редко: они описаны в 15 месторождениях и рудопроявлениях. В статье сообщается о новом месте обнаружения Ag-содержащего тетраэдрита-(Cd) на месторождении Кон-Дара (Юго-Западный Памир, Таджикистан), и обобщены известные литературные сведения о редких Cd-содержащих блеклых рудах с содержанием Cd от 1 до 12.31 мас.%. Ag-содержащий тетраэдрит-(Cd) на месторождении Кон-Дара был обнаружен в виде ксеноморфных выделений размером 10–35 мкм в ассоциации с тетраэдритом-(Fe), тетраэдритом-(Zn), галенитом, полибазитом и халькопиритом, замещающих бурнонит. По данным PCMA, его состав, усреднённый по семи анализам (в мас.%): Ag 16.17, Cu 25.19, Cd 10.09, Fe 0.38, Zn 0.09, Pb 0.13, Sb 25.55, As 0.18, S 22.34. Исходя из расчёта 29 атомов, усреднённая химическая формула имеет вид $(\text{Cu}_{7.40}\text{Ag}_{2.80})\Sigma_{10.20}(\text{Cd}_{1.68}\text{Fe}_{0.13}\text{Zn}_{0.03}\text{Pb}_{0.01})\Sigma_{1.84}(\text{Sb}_{3.92}\text{As}_{0.04})\Sigma_{3.96}\text{S}_{13.00}$. По составу тетраэдрит-(Cd) из Кон-Дары близок к таковым из Pb-Zn-минерализации Тиндрума в Шотландии, барит-флюоритового-(Ag, Cu) месторождения Клара в Германии и Pb-Zn-месторождения Ксайтишань в Китае. Оценена температура образования Ag-содержащего тетраэдрита-(Cd) на месторождении Кон-Дара – около $(170\text{--}140)\pm 20^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: группа тетраэдрита, блёклая руда, тетраэдрит-(Cd), полибазит, бурнонит, химический состав, температура образования, замещение, Кон-Дара, Памир, Таджикистан

DOI: 10.31857/S2686739724100097

ВВЕДЕНИЕ

Исследование образца фрейбергита из галенит-флюоритового (галенит-плавикового) месторождения Кон-Дара¹ (Западный Памир, Таджикистан) из коллекции Минералогического музея имени А.Е. Ферсмана РАН (Москва, Россия) привело к обнаружению тетраэдрита с высоким содержанием кадмия. Его название в соответствии с действующей номенклатурой группы тетраэдрита [1], одобренной Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации

Международной минералогической ассоциации (CNMNC IMA), – тетраэдрит-(Cd) (минеральный символ Ttr-Cd [2]). Авторы имеют отличные от CNMNC IMA взгляды относительно названия “группы минералов тетраэдрита”: считают, что у CNMNC IMA не было необходимости придумать новое название для этой группы минералов, и настаивают на сохранении исторического названия “блёклая руда”².

¹Наряду с названием “Кон-Дара” в литературе для обозначения этого месторождения используется также название “Кан-Дара”.

²Предложенное CNMNC IMA название “минералы группы тетраэдрита” неудобно при описании минералов этой группы: оно совпадает с названиями серии и минерала; оно вносит путаницу и игнорирует огромное количество данных в опубликованной литературе, в которой название “тетраэдрит” применялось к крайнему сурьмяному члену блёклорудного твёрдого раствора.

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва, Россия

²Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, Россия

*E-mail: luy-natalia@yandex.ru

Блѣклые руды (минералы группы тетраэдрита) — наиболее распространѣнные сульфосили в многих типах гидротермальных рудных месторождений. Эти халькогениды образуют сложный изотипический ряд с общей структурной формулой $M^{(2)}A_6M^{(1)}(B_4C_2)X^{(3)}D_4S^{(1)}Y_{12}S^{(2)}Z$, где $A = Cu^+, Ag^+, \square$ (вакансия) и кластер $(Ag_6)^{4+}$; $B = Cu^+$ и Ag^+ ; $C = Zn^{2+}, Fe^{2+}, Hg^{2+}, Cd^{2+}, Ni^{2+}, Mn^{2+}, Cu^{2+}, Cu^+$ и Fe^{3+} ; $D = Sb^{3+}, As^{3+}, Bi^{3+}$ и Te^{4+} ; $Y = S^{2-}$ и Se^{2-} ; $Z = S^{2-}, Se^{2-}$ и $\square$ [1]. Сложный химический состав минералов группы блѣклой руды обусловлен различными гомо- и гетеровалентными изоморфными замещениями, которые часто используются в качестве индикаторов условий минералообразования.

Кадмий в блѣклой руде не редкое явление, однако, чаще его содержание не превышает 0.3–0.6 мас. %, а его экономически значимым концентратом в месторождениях является сфалерит. Благодаря своему халькофильному поведению Cd концентрируется главным образом в сульфидах, в которых обычно изоморфно замещает Zn. Это происходит из-за близости ковалентных радиусов и подобия атомно-ионной структуры Cd и Zn. Поэтому эти два элемента демонстрируют схожее геохимическое поведение.

Блѣклые руды, содержащие высокие концентрации Cd (химические составы с преобладанием Cd в позиции C) описывались ранее. Согласно нынешней номенклатуре группы тетраэдрита [1], одобренной CNMNC IMA, это *тетраэдрит-(Cd)* [3–9], *теннантит-(Cd)* [10–12], *аргентотетраэдрит-(Cd)* [3, 13–16] и *хакит-(Cd)* [17]. Синтетические аналоги тетраэдрита с преобладанием Cd были изучены Патриком и Холлом [18]. Кроме того, в литературе встречаются блѣклые руды, в которых кадмий не играет видообразующей роли, но содержится в значительных концентрациях (от 1 до 3–5 мас. %) (например, [19, 20], [21, приложение 5]; ссылки выше и др.).

Имеющихся данных по Cd-содержащим минералам группы блѣклой руды недостаточно, чтобы установить предел вхождения Cd в структуру тетраэдрита, но на основании сходства Cd с Zn и Hg предполагается, что предел вхождения Cd в структуру тетраэдрита составляет два атома на единицу формулы ([22], приложение 5).

Цель статьи — описание первой находки редкого минерала Ag-содержащего тетраэдрита-(Cd) на территории Таджикистана и его необычных тесных сростаний с другими крайними членами серии тетраэдрита: тетраэдрита-(Fe) и тетраэдрита-(Zn), предполагающих уникальные условия их образования.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Ag-содержащий тетраэдрит-(Cd) обнаружен в образце из галенит-флюоритового месторождения Кон-Дара (Таджикистан), находящегося на южном склоне Гиссарского хребта в 28 км к северу от г. Душанбе, вблизи автодороги, соединяющей г. Душанбе и г. Худжанд. Оно находится близ Варзобской горно-ботанической станции “Кондара”, которая была основана в 30-х годах прошлого века советскими учёными и функционирует и по сей день.

Гиссарский хребет является частью складчатой области Тянь-Шаня, в строении которой принимают толщи, различные по возрасту, степени дислоцированности и составу. Рудные жилы месторождения залегают в гранитах Южно-Варзобского интрузива. Известно, что по минеральному составу рудных тел и условиям их образования месторождение Кон-Дара схоже с более крупным месторождением Такоб³ ([23], приложение 5), с которым находится на расстоянии примерно 8 км.

ОБРАЗЕЦ И МЕТОДЫ

Характеристика образца

Образец хранится в коллекции Минералогического музея имени А.Е. Ферсмана РАН как фрейбергит из месторождения Кон-Дара (Таджикистан) под номером FMM_1_74896. Он поступил в музей в 1973 году от Г.С. Аверьянова, который работал в должности главного геолога Памирской геологоразведочной экспедиции с 1969 по 1992 гг.

Образец представляет собой агрегат равномернозернистого средне-крупнокристаллического (0.2–0.5 см) белого кварца и крупных (до нескольких см в поперечнике) выделений гигантокристаллического сидерита (размер отдельных индивидов достигает 1 см и более) (рис. 1). Сфалерит в виде отдельных зѣрен (не более 1 мм) или их гнезд (от 2–3 до 10 мм) образует обильную равномерную вкрапленность в кварце. Бурнонит, содержащий тетраэдрит в тесных сростаниях с полибазитом, галенитом, и халькопиритом, слагает отдельные вытянутые гнезда размером от 1 до 3 см.

³На месторождении работает Такобский горно-обогатительный комбинат (ОАО “Таджикская алюминиевая компания”), который производит флюоритовый и свинец-цинковый концентраты. <https://talco.com.tj/ru/about/talcogroup>

Исследование музейного образца “фрейбергита” было предпринято с целью усовершенствования существующих представлений о кристаллохимических особенностях фрейбергитовой серии блёклых руд. Из образца была выделена монофракция блёклой руды, состоящая из нескольких зёрен, которые были запрессованы в шашку для дальнейшего изучения под оптическим и электроно-сканирующим микроскопами и с помощью РСМА. В одном из этих зёрен (из монофракции FMM_FN1086 из образца FMM_1_74896) был диагностирован Ag-содержащий тетраэдрит-(Cd).

Методы исследования

Оптическая и электроно-сканирующая микроскопия. Исследование и фотографии минералов в отражённом свете выполнены на микроскопе Olympus BX-53, оснащённом цифровой камерой, с программным обеспечением SIAMS в лаборатории геоинформатики ИГЕМ РАН. Изучение минералов в обратно-рассеянных электронах и качественная диагностика минералов проведено в лаборатории кристаллохимии минералов ИГЕМ РАН (аналитик Л.А. Иванова) с помощью электронного микроскопа “JSM-IT500” (Япония) при ускоряющем напряжении в 20 кВ и рабочем расстоянии до образца 10 мм. Использовались следующие характеристические линии: K_{α} для S, Fe, Cu, Zn, As; L_{α} для Ag, Cd, Sb; M_{α} для Pb. Карты распределения элементов по блёклой руде и сфалериту накапливались в течение 1 часа для каждого минерала. Результаты съёмки обработаны при помощи программы Smile View Lab версии V1.4.9 японской фирмы JEOL Ltd.

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) выполнен с использованием электронно-зондового микроанализатора “JEOL” JXA-8200 в лаборатории анализа минерального вещества (Центр Коллективного пользования “ИГЕМ-аналитика”). Микроанализатор оборудован пятью волновыми спектрометрами. Анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда на цилиндре Фарадея 20 нА и диаметре зонда 1 мкм; анализ полибазита – при токе зонда 10 нА и расширенном диаметре зонда 10 мкм. Время экспозиции при анализе главных элементов составляло 10 с, для элементов-примесей – 20 с. Использовались следующие аналитические линии: L_{α} для Sb, Se, Ag, As и Te; K_{α} для Zn, S, Cu и Fe; M_{α} для Hg, Bi и Pb; L_{β} для Cd. Использовались кристаллы-анализаторы TAP (для As и Se), LIF (для Fe, Cu и Zn) и PET (для Sb, S, Ag, Te, Cd, Hg, Pb и Bi). Стандартами служили AgSbS₂ для Sb, Ag и S, CdSe для Se, CdS для Cd, ZnS для Zn,



Рис. 1. Образец FMM_1_74896 из месторождения Кон-Дара (Юго-Западный Памир, Таджикистан) с Ag-содержащим тетраэдритом-(Cd). Коллекция Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (Москва, Россия). Обозначения минералов в соответствии с [2]: Bnn — бурнонит, Sp — сфалерит, Qz — кварц, Sid — сидерит.

GaAs для As, HgS для Hg, CuFeS₂ для Fe, PbS для Pb и сплавы химически чистых элементов для Cu, Bi и Te. Точность измерений $\pm 2\%$ для главных элементов и $\pm 3-5\%$ для элементов-примесей. Дискриминатор импульсов использовался в режиме *dif* mode для S, As, Se, Sb, Ag, Te, Hg, Pb и Bi и в режиме *int* для Fe, Cu, Zn и Cd. Расчёт поправок осуществлялся по методу ZAF с использованием программы фирмы “JEOL”.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Минеральная ассоциация и особенности сростаний

Ag-содержащий тетраэдрит-(Cd) обнаружен в тонких прожилках, мощностью 0.1–0.3 мм, пересекающих агрегаты бурнонита-I, который находится в ассоциации со сфалеритом, галенитом-I и пиритом (рис. 2, 3). Прожилки сложены мелкозернистыми агрегатами тесно срастающихся друг с другом Ag-содержащими блёклыми рудами (тетраэдритом-(Cd), тетраэдритом-(Fe) и тетраэдритом-(Zn)), галенитом-II, халькопиритом, бурнонитом-II и полибазитом. Эти минералы образуют парагенетическую минеральную ассоциацию, отложившуюся близко по времени, в результате замещения бурнонита-I.

Блёклые руды (Ag-содержащие тетраэдриты) обнаружены в прожилках в бурноните-I, в которых встречены в тесных сростаниях с галенитом-II, халькопиритом, полибазитом

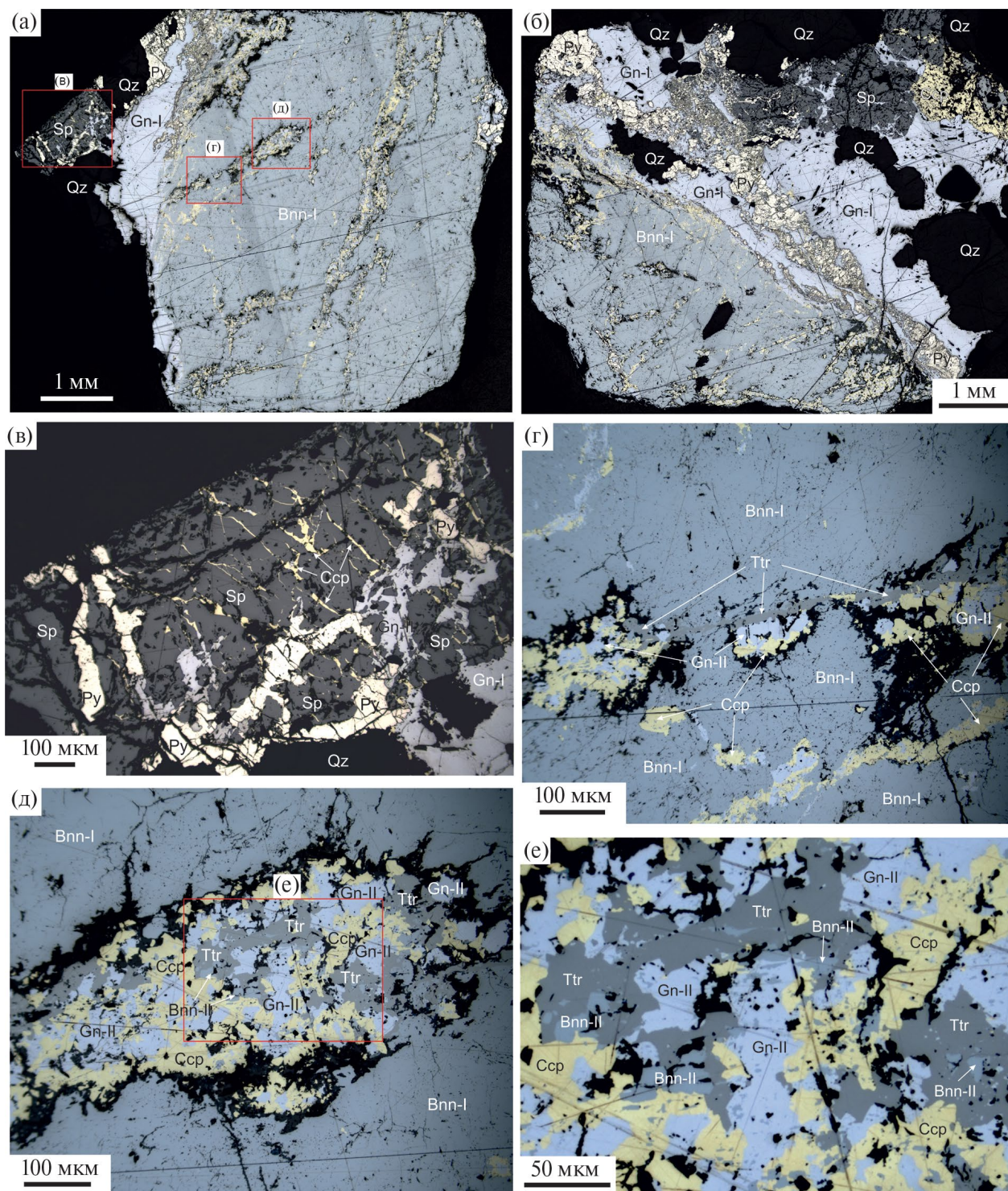


Рис. 2. Срастания минералов в аншлифе из образца FMM_1_74896 (Кон-Дара, Таджикистан). (а, б) Срастание бурнонита-I (Bnn), галенита-I (Gn), сфалерита (Sp) и пирита (Py). Бурнонит-I сечётся полиминеральными прожилками; (в) Сфалерит содержит сеть прожилков (систему трещин), заполненных пиритом, галенитом-II и халькопиритом. Пирит слагает прожилки мощностью 20–60 мкм. Галенит-II развивается по прожилкам мощностью 10–50 мкм в сфалерите и внутри прожилков пирита, частично замещая его. Халькопирит выполняет прожилки мощностью менее 5 мкм, которые секут сфалерит и прожилки пирита; (г) Бурнонит-I содержит галенит-халькопировые (10–20 мкм) и мономинеральные тетраэдритовые (5–10 мкм) прожилки, в раздувах которых тесные ксеноморфные срастания галенита-II, халькопирита и тетраэдрита (Ttr); (д, е) Участок полиминерального прожилка с раздувом мощностью 300 мкм в бурноните-I и его увеличенный фрагмент. Тесные срастания галенита-II, халькопирита, тетраэдрита и бурнонита-II. Фотографии в отражённом свете.

и бурнонитом-II. Они выполняют интерстиции между зёрнами галенита и халькопирита, тяготея к периферийной части прожилков, к контакту с бурнонитом-I. К выделениям тетраэдритов приурочены агрегаты полибазита, совместно с которым они замещают и корродируют галенит (рис. 2 г–е). Замещая галенит, тетраэдрит наследует включения бурнонита, содержащиеся в галените (рис. 4 в).

Ag-содержащий тетраэдрит-(Cd) образует ксеноморфные зёрна размером 10–35 мкм, приуроченные к выделениям тетраэдрита-(Fe) и тетраэдрита-(Zn). Малые размеры зёрен и тесные взаимоотношения с другими минералами, в том числе и с блёклыми рудами не позволили провести рентгеновские исследования. Под микроскопом минерал изотропный. Его цвет тёмно-серый без оттенков, очень схож и не отличим от цвета тетраэдрита-(Fe) и тетраэдрита-(Zn) (рис. 4 а). Отражение тетраэдрита-(Cd) ниже, чем у галенита и бурнонита. Следовательно, оптические свойства этого минерала идентичны таковым для минералов из группы блёклых руд. На изображениях в обратно-рассеянных электронах (BSE) тетраэдрит-(Cd) серого цвета, который несколько светлее более тёмных тетраэдрита-(Fe) и тетраэдрита-(Zn) (рис. 4 б–г). Выделения тетраэдрита-(Cd) совместно с тетраэдритом-(Fe) и тетраэдритом-(Zn) и полибазитом образуют тесные срастания. Тетраэдрит-(Cd)

имеет нечёткую размытую границу с тетраэдри-том-(Fe) и тетраэдри-том-(Zn) и чуть более чёткую границу с полибазитом. Тетраэдрит-(Cd), располагается ближе всех из трёх тетраэдритов к выделениям бурнонита-I, но не имеет непосредственного контакта с ним. Вдоль границы тетраэдрита-(Cd) и бурнонита-I присутствуют поры и полости (рис. 4).

Бурнонит встречен в виде крупнозернистых агрегатов в ассоциации со сфалеритом, ранним крупнозернистым галенитом-I и пиритом (генерация I) (рис. 2) и в виде включений внутри полиминеральных прожилков, секущих ранний бурнонит-I (генерация II) (рис. 4 в). Бурнонит-I сечётся различными по минеральному составу прожилками, среди которых галенит-халькопиритовые, мономинеральные тетраэдритовые и полиминеральными с бурнонит-халькопирит-тетраэдрит-полибазит-галенитовыми срастаниями. На изображениях в скрещенных николях бурнонит-I проявляет блочное строение и полисинтетическое двойникование (рис. 3 б). Бурнонит-II присутствует в виде включений различной формы в галените, тетраэдрите, халькопирите и полибазите (рис. 2 е, 4 в–г). Вероятно, присутствуют 2 типа включений бурнонита-II: одни представляют собой реликты бурнонита-I (они в большем количестве приурочены к выделениям тетраэдрита, имеют трещины и поры), другие — являются новообразованным

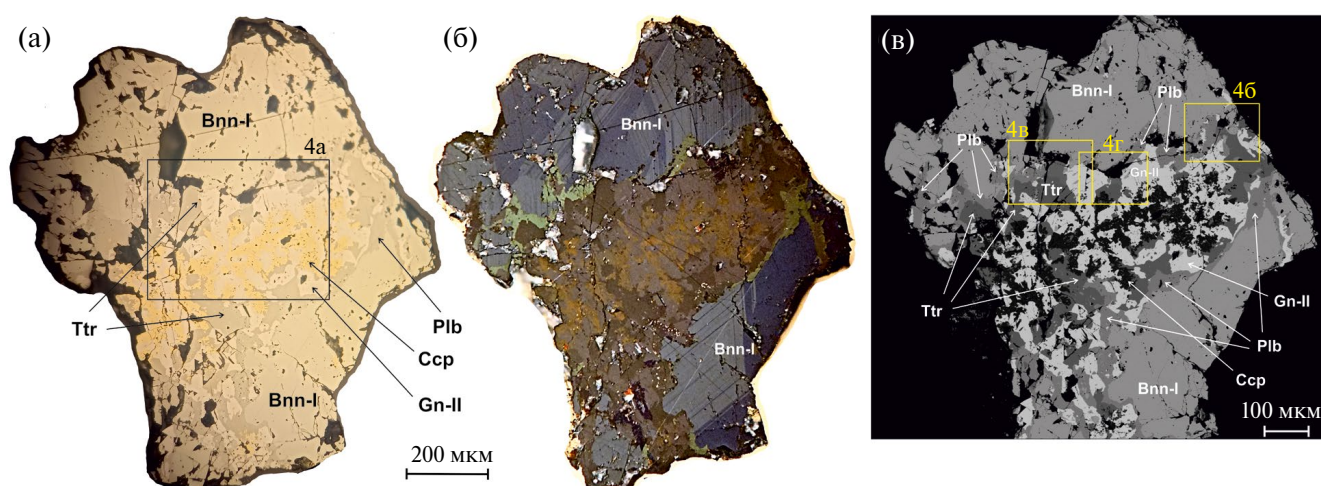


Рис. 3. Зерно из монофракции FMM_FN1086 (образец FMM_1_74896, Кон-Дара, Таджикистан), в котором был обнаружен Ag-содержащий тетраэдрит-(Cd). (а) Бурнонит-I (Bnn) замещается агрегатом, сложенным галенитом-II (Gn), халькопиритом (Ccp), тетраэдритом (Ttr), полибазитом (Plb) и бурнонитом-II. Фрагмент прожилка, подобного тем, которые представлены на рис. 2. Изображение в отражённом свете; (б) То же в скрещенных николях. В бурноните-I проявлено полисинтетическое двойникование; (в) То же в обратно-рассеянных электронах (BSE). Центральная часть прожилка сложена галенитом и приуроченным к нему халькопиритом. Тетраэдрит выполняет интерстиции между зёрнами галенита и халькопирита, тяготея к периферийной части прожилка. Полибазит развит вдоль контакта тетраэдрита (и/или галенита-II) и бурнонита-I.

бурнонитом-II (они преимущественно развиты в галените и халькопирите, имеют изометричные и вытянутые формы, чистую без пор поверхность и ровную границу с минералом-хозяином.

Сфалерит слагает крупнозернистые агрегаты с системой трещин, прожилки в которой частично заполнены пиритом, халькопиритом и галенитом (рис. 2 а, в), и раздробленные мелкозернистые (размер зёрен ≤ 50 мкм) агрегаты, цементированные пиритом, халькопиритом и галенитом (рис. 2 б).

Пирит слагает раздробленные агрегаты, мелкозернистые мозаичные сростания со сфалеритом

и прожилки внутри сфалерита мощностью 20–60 мкм (рис. 2 а–в). Крупные зёрна пирита секутся прожилками халькопирита, агрегаты из мелких зёрен пирита в сростании со сфалеритом цементируются халькопиритом.

Галенит, вероятно, присутствуют в виде двух генераций. Галенит-I отлагался в ассоциации со сфалеритом, бурнонитом-I и пиритом (рис. 2 а, б). Галенит-II встречается внутри прожилков, замещающих сфалерит и бурнонит-I (рис. 2 в, г). В сфалерите галенит-II слагает прожилки мощностью 10–50 мкм и частично внутри пиритовых прожилков замещает пирит

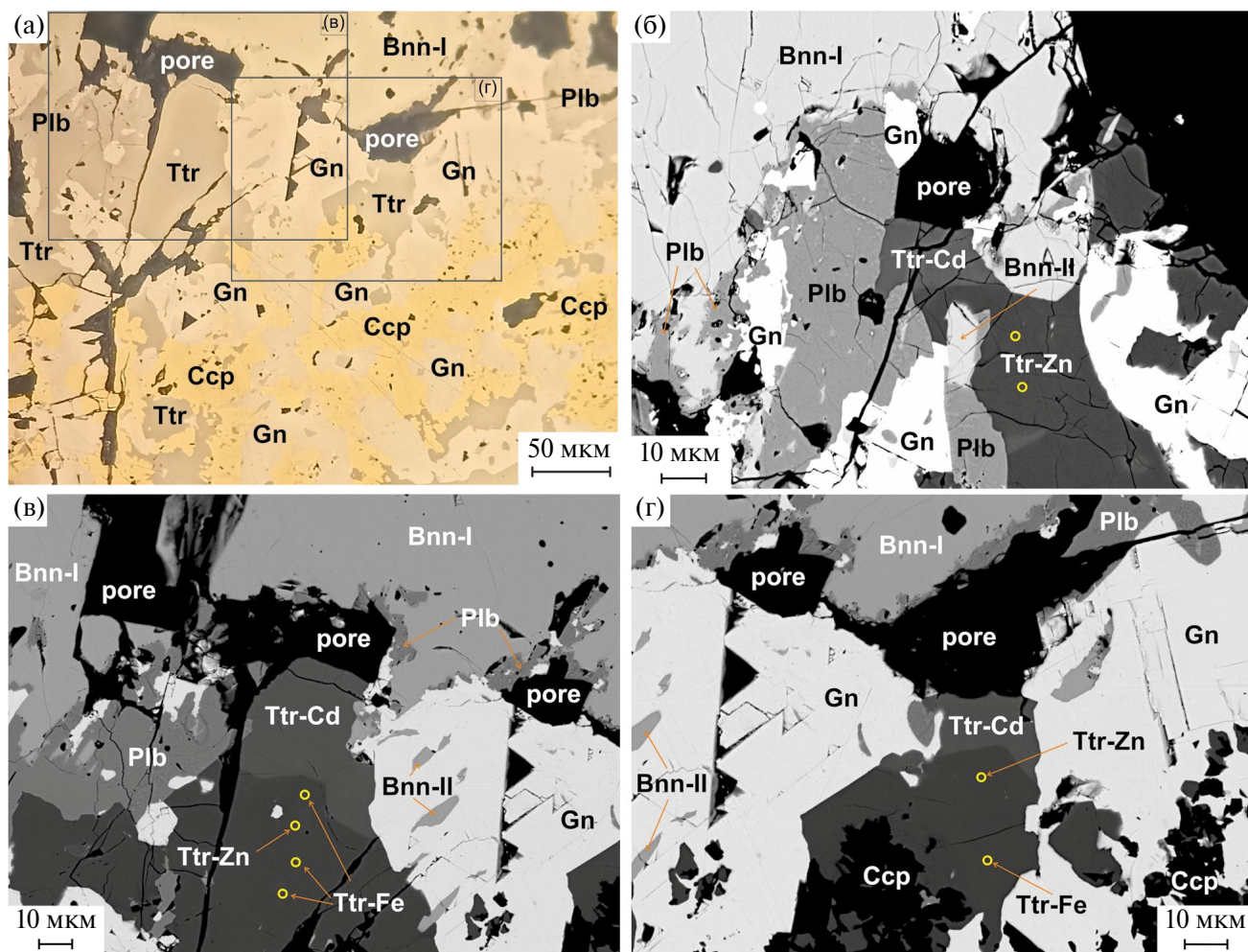


Рис. 4. Увеличенные фрагменты зерна, представленного на рис. 3, с Ag-содержащим тетраэдритом-(Cd). (а) Увеличенный фрагмент зерна с рис. 3 а. Тесные сростания тетраэдрита, галенита-II, халькопирита и полибазита внутри агрегата бурнонита-I. Халькопирит имеет дендритоподобные выделения, которые внедряются и секут галенит-II, а также врастают в тетраэдрит. (б-г) Укрупнённые фрагменты рис. 3 в и 4 а: (б) Полибазит образует тесные сростания с тетраэдритом и галенитом-I на контакте с бурнонитом-II. (в-г) Тесные сростания тетраэдрита, сложенного тремя крайними Fe-, Zn- и Cd-членами тетраэдритового твёрдого раствора, галенита-II, полибазита, бурнонита-II и халькопирита внутри агрегата бурнонита-I. Тетраэдрит-(Cd) образует тесные сростания с полибазитом и располагается ближе всех из трёх тетраэдритов к контакту бурнонита-I. Вдоль границы тетраэдрита-(Cd) и бурнонита-I характерно наличие пор и отсутствие непосредственного контакта этих двух минералов. Тетраэдрит-(Fe) тяготеет к контакту с халькопиритом. Тетраэдрит-(Zn) занимает промежуточное между тетраэдритом-(Cd) и тетраэдритом-(Fe) положение. Бурнонит-II присутствует в галените, тетраэдрите и полибазите в виде вытянутых включений.

(рис. 2 в). В прожилках, развитых по бурнонит-у-I, галенит-II представлен ксеноморфными и угловатыми разобщёнными зёрнами, которые сцементированы тетраэдритом и халькопиритом (рис. 2д, е). Галенит-II содержит изометричные и вытянутые включения новообразованного бурнонита-II (рис. 4 в, г).

Халькопирит встречается в виде тонких прожилков мощностью менее 5 мкм секущих сфалерит (рис. 2 в), прожилков, замещающих и цементирующих пирит (рис. 2 б) и полиминеральных прожилков, секущих бурнонит-I (рис. 2 г–е). Внутри последних халькопирит образует дендритоподобные ветвистые с фестончатыми краями выделения, которые внедряются и секут галенит, а также “врастают” в тетраэдрит. Выделения халькопирита всегда приурочены к агрегатам галенита (рис. 2, 4 а). К контакту с халькопиритом приурочены выделения тетраэдрита-(Fe) (рис. 4 г). На картинах BSE халькопирит имеет неоднородное мозаичное строение.

Полибазит развит вдоль контакта тетраэдрита (или галенита) и бурнонита-I, в виде реакционной каймы, поскольку почти нет участков, в которых тетраэдрит (а также галенит) контактировал бы непосредственно с бурнонитом-I, везде между ними располагаются полибазит или поры (рис. 3, 4 б–г). Полибазит тесно сростается с тетраэдритом и галенитом-I на контакте с бурнонитом-I (рис. 4 б–г). Полибазит содержит включения галенита и бурнонита-II.

Исходя из описанных взаимоотношений, следует, что минералы, слагающие прожилки в бурноните-I (галенит-II, халькопирит, Ag-содержащие тетраэдриты, полибазит и бурнонит-II), отложились позднее в результате его замещения. Занимаемое одинаковое положение в пространстве (прожилки) и тесные сростания галенита-II, халькопирита, Ag-содержащих тетраэдритов, полибазита и бурнонита-II указывают на одну парагенетическую ассоциацию, минералы в которой отлагались близко по времени. Вновь образованные минералы содержат металлы бурнонита: Cu, Pb, Sb и S, а также металлы, не характерные для бурнонита: Ag, Cd, Fe и Zn. Прожилки, секущие бурнонит-I и сфалерит отличаются. В прожилках, секущих сфалерит, отсутствует тетраэдрит и полибазит, и присутствует пирит. Всё это свидетельствует о преобразовании ранних минералов (перераспределении химических элементов) благодаря ретроградным реакциям в результате поступления позднего флюида и определённых *PT*-условий, из-за которых ранние минералы (сфалерит, пирит, бурнонит-I

и галенит-I) стали неустойчивы и замещались поздней минеральной ассоциацией.

Расчёт химической формулы минералов группы блёклой руды

Существуют разные подходы к пересчёту химической формулы блёклой руды ($^{M(2)}A_6^{M(1)}(B_4C_2)^{X(3)}D_4^{S(1)}Y_{12}^{S(2)}Z$): на 29 атомов в формуле (1), на $\Sigma(Me^+ + Me^{2+} + PMe) = 16$ атомов (2), на $\Sigma PMe_{(As+Sb+Te+Bi)} = 4$ атомов (3), на 13 атомов серы (4). Последний подход расчёта формулы, на наш взгляд, изжил себя, поскольку было доказано наличие вакансий серы в позиции S(2). Третий основан на незначительных изменениях идеального числа катионов, находящихся в позиции X(3), отмеченных при наблюдениях Джонсоном с соавторами ([22], приложение 5). Первый подход наиболее универсальный, но может “замаскировать” дефицит серы в позиции S(2), особенно при расчёте химической формулы обогащённых серебром минеральных видов из группы тетраэдрита (например, [24], приложение 5); и/или дефицит серебра в позиции M(2). Поэтому чаще всего при расчёте формул Ag-содержащих блёклых руд, чтобы не пропустить наличие вакансий в позиции S(2) используют второй подход, предполагая отсутствие вакансий в позициях M(2), M(1) и X(3).

Результаты нашего исследования и обзора литературы по Cd-содержащим блёклым рудам показывают, что содержания Ag в них не настолько велико, чтобы в позиции S(2) появлялись значимые содержания вакансий серы (приложение 3). По данным ([24], приложение 5) появление вакансий серы (0.5 ф.к. □ S) начинается при содержаниях серебра ≈ 4.5 ф.к. и выше, а концентрации серебра в известных кадмиевых минералах группы блёклых руд в единичных случаях достигает 6.7 ф.к. и 5.6–5.1, а в основном меньше 4 ф.к. (см. приложения 3 и 4), что исключает наличие вакансий. Поэтому для блёклой руды из месторождения Кон-Дара был выбран способ пересчёта химической формулы на основе 29 атомов в формуле.

Химический состав

В изученном образце по данным РСМА и согласно номенклатуре группы тетраэдрита [1] обнаружено три практически крайних члена тетраэдритовой серии блёклорудного твёрдого раствора: тетраэдрит-(Cd), тетраэдрит-(Fe) и тетраэдрит-(Zn). Составы тетраэдритов и ассоциирующих с ними минералов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Результаты РСМА блёклой руды и ассоциирующих с ней минералов в образце FMM_1_74896 из месторождения Кон-Дара

№ п/п	Минерал	Содержание, мас. %									Сумма
		Ag	Cu	Zn	Fe	Pb	Cd	Sb	As	S	
1	Ttr-Cd	16.28	25.10	—	0.15	0.15	10.43	25.44	0.21	22.25	100.06
2	Ttr-Cd	16.18	25.21	0.16	0.49	0.20	10.36	25.81	0.12	22.34	100.88
3	Ttr-Cd	16.66	25.02	0.09	0.44	0.12	10.13	25.59	0.15	22.37	100.56
4	Ttr-Cd	16.38	25.20	0.13	0.28	0.17	10.01	25.28	0.19	22.35	99.99
5	Ttr-Cd	15.59	25.37	0.06	0.36	0.17	10.00	25.50	0.18	22.37	99.60
6	Ttr-Cd	15.83	25.37	0.12	0.53	—	9.93	25.51	0.22	22.36	99.85
7	Ttr-Cd	16.29	25.03	0.07	0.39	0.12	9.81	25.74	0.16	22.33	100.01
8	Ttr-Zn	15.99	27.19	5.54	0.47	0.15	1.43	26.61	0.15	23.25	100.78
9	Ttr-Zn	15.54	27.38	5.51	0.39	0.10	1.40	26.76	0.09	23.39	100.56
10	Ttr-Zn	15.44	27.65	3.20	2.18	0.13	0.68	26.62	0.19	23.66	99.74
11	Ttr-Zn	15.19	27.74	5.72	0.60	0.05	0.62	26.75	0.13	23.64	100.51
12	Ttr-Fe	16.00	28.36	1.02	3.58	0.09	1.12	26.66	0.25	23.71	100.76
13	Ttr-Fe	15.56	29.20	0.21	4.07	0.10	0.72	27.04	0.29	23.75	101.00
14	Ttr-Fe	15.47	28.73	1.24	4.10	0.10	—	26.91	0.24	23.85	100.68
15	Ttr-Fe	17.12	26.90	0.08	5.83	0.13	—	26.74	0.18	23.65	100.63
16	Ccp (n=3)	—	34.15	0.02	28.79	—	—	1.38	0.05	34.97	99.34
17	Ccp (n=2)	—	34.19	0.02	29.28	—	—	0.65	—	35.22	99.36
18	Ccp (n=3)	—	34.38	0.03	30.06	—	—	0.34	—	35.36	100.17
19	Ccp	—	34.22	0.05	29.86	—	—	0.09	—	35.60	99.82
20	Bnn (n=2)	—	13.21	0.05	—	41.79	—	23.82	0.28	20.14	99.37
21	Gn (n=3)	0.04	0.11	—	0.11	85.27	—	0.12	—	13.52	99.22
22	Plb	61.68	7.67	—	—	0.10	—	10.62	—	15.51	95.74
23	Plb	58.41	8.31	0.06	0.04	0.24	—	11.17	—	16.12	94.44
24	Plb	58.38	7.87	—	—	0.09	—	10.38	—	15.15	92.14
25	Plb	57.65	8.33	—	0.04	0.07	—	10.55	—	15.38	92.42
26	Plb	57.56	8.26	—	—	0.07	—	11.15	—	15.94	93.19
27	Sp (n=5)	—	0.18	65.16	1.20	—	0.32			32.58	99.51
28	Sp	—	—	66.12	0.13	—	0.27			33.12	99.75

Примечание. Содержание (в мас.%) Hg 0.06 (ан. 13), Bi 0.05 (ан. 1), 0.06 (ан. 7, 25), 0.07 (ан. 11), 0.13 (ан. 24) и 0.08 (ан. 26), Se 0.05 (ан. 14), Te 0.05 (ан. 21), 0.16 (ан. 22), 0.09 (ан. 23), 0.14 (ан. 24, 26) и 0.23 (ан. 26), In 0.06 (ан. 27) и 0.11 (ан. 28). *n* — количество усреднённых анализов, “—” ниже предела обнаружения 2σ. Пределы обнаружения по 2σ (мас. %): Ag 0.04, Cu 0.05, Hg 0.06, Zn 0.06, Fe 0.04, Pb 0.05, Cd 0.09, Sb 0.06, As 0.07, Bi 0.05, S 0.01, Se 0.05 и Te 0.04. Анализы тетраздрита 2, 8, 9 относятся к области рис. 4 б, ан. 1, 4, 5, 7, 11–14 — рис. 4 в, ан. 3, 6, 10, 15 — рис. 4 г.

Таблица 2. Формулы блёклой руды и ассоциирующих с ней минералов в образце FMM_1_74896 из месторождения Кон-Дара

№ п/п	Минерал	Формула	Sb/ (Sb + As)	Zn/ (Fe + Zn + Cd)	Ag/ (Ag + Cu)
1	Ttr-Cd	(Cu _{7.40} Ag _{2.83}) Σ 10.23(Cd _{1.74} Fe _{0.05}) Σ 1.80(Sb _{3.91} As _{0.05}) Σ 3.97S _{13.00}	0.99	0.00	0.28
2	Ttr-Cd	(Cu _{7.37} Ag _{2.79}) Σ 10.15(Cd _{1.71} Fe _{0.16} Zn _{0.05}) Σ 1.94(Sb _{3.94} As _{0.03}) Σ 3.97S _{12.94}	0.99	0.02	0.27
3	Ttr-Cd	(Cu _{7.33} Ag _{2.88}) Σ 10.20(Cd _{1.68} Fe _{0.15} Zn _{0.03}) Σ 1.86(Sb _{3.91} As _{0.04}) Σ 3.95S _{12.99}	0.99	0.01	0.28
4	Ttr-Cd	(Cu _{7.41} Ag _{2.84}) Σ 10.25(Cd _{1.66} Fe _{0.09} Zn _{0.04}) Σ 1.81(Sb _{3.88} As _{0.05}) Σ 3.93S _{13.02}	0.99	0.02	0.28
5	Ttr-Cd	(Cu _{7.47} Ag _{2.70}) Σ 10.17(Cd _{1.66} Fe _{0.12} Zn _{0.02}) Σ 1.82(Sb _{3.92} As _{0.05}) Σ 3.97S _{13.05}	0.99	0.01	0.27
6	Ttr-Cd	(Cu _{7.44} Ag _{2.74}) Σ 10.18(Cd _{1.65} Fe _{0.18} Zn _{0.04}) Σ 1.86(Sb _{3.91} As _{0.05}) Σ 3.96S _{13.00}	0.99	0.02	0.27
7	Ttr-Cd	(Cu _{7.36} Ag _{2.82}) Σ 10.19(Cd _{1.63} Fe _{0.13} Zn _{0.02}) Σ 1.79(Sb _{3.95} As _{0.04}) Σ 4.00S _{13.02}	0.99	0.01	0.28
8	Ttr-Zn	(Cu _{7.62} Ag _{2.64}) Σ 10.26(Zn _{1.51} Cd _{0.23} Fe _{0.15}) Σ 1.90(Sb _{3.89} As _{0.04}) Σ 3.93S _{12.92}	0.99	0.80	0.26
9	Ttr-Zn	(Cu _{7.67} Ag _{2.56}) Σ 10.23(Zn _{1.50} Cd _{0.22} Fe _{0.12}) Σ 1.85(Sb _{3.91} As _{0.02}) Σ 3.93S _{12.98}	0.99	0.81	0.25
10	Ttr-Zn	(Cu _{7.73} Ag _{2.54}) Σ 10.28(Zn _{0.87} Fe _{0.69} Cd _{0.11}) Σ 1.68(Sb _{3.89} As _{0.04}) Σ 3.93S _{13.11}	0.99	0.52	0.25
11	Ttr-Zn	(Cu _{7.72} Ag _{2.49}) Σ 10.21(Zn _{1.55} Fe _{0.19} Cd _{0.10}) Σ 1.84(Sb _{3.88} As _{0.03}) Σ 3.92S _{13.03}	0.99	0.84	0.24
12	Ttr-Fe	(Cu _{7.86} Ag _{2.61}) Σ 10.47(Fe _{1.13} Zn _{0.27} Cd _{0.18}) Σ 1.58(Sb _{3.86} As _{0.06}) Σ 3.92S _{13.03}	0.99	0.17	0.25
13	Ttr-Fe	(Cu _{8.06} Ag _{2.53}) Σ 10.59(Fe _{1.28} Cd _{0.11} Zn _{0.06}) Σ 1.47(Sb _{3.89} As _{0.07}) Σ 3.96S _{12.99}	0.98	0.04	0.24
14	Ttr-Fe	(Cu _{7.91} Ag _{2.51}) Σ 10.42(Fe _{1.28} Zn _{0.33}) Σ 1.62(Sb _{3.87} As _{0.05}) Σ 3.92S _{13.03}	0.99	0.20	0.24
15	Ttr-Fe	(Cu _{7.45} Ag _{2.79}) Σ 10.24(Fe _{1.84} Zn _{0.02}) Σ 1.87(Sb _{3.86} As _{0.04}) Σ 3.90S _{12.98}	0.99	0.01	0.27
16	Ccp (n=3)	Cu _{1.00} (Fe _{0.96} Sb _{0.02}) Σ 0.98S _{2.02}			
17	Ccp (n=2)	Cu _{0.99} (Fe _{0.97} Sb _{0.01}) Σ 0.98S _{2.03}			
18	Ccp (n=3)	Cu _{0.99} (Fe _{0.99} Sb _{0.01}) Σ 1.00S _{2.02}			
19	Ccp	Cu _{0.99} (Fe _{0.98} Sb _{0.02}) Σ 0.98S _{2.03}			
20	Bnn (n=2)	Cu _{1.01} Pb _{0.98} (Sb _{0.95} As _{0.02}) Σ 0.97S _{3.04}	0.98		
21	Gn (n=3)	Pb _{0.98} S _{1.01}			
22	Plb	(Ag _{13.11} Cu _{2.77}) Σ 15.87Sb _{2.00} S _{11.09}			
23	Plb	(Ag _{12.36} Cu _{2.99}) Σ 15.35Sb _{2.09} S _{11.48}			
24	Plb	(Ag _{12.81} Cu _{2.93}) Σ 15.74Sb _{2.02} S _{11.19}			
25	Plb	(Ag _{12.54} Cu _{3.08}) Σ 15.62Sb _{2.03} S _{11.26}			
26	Plb	(Ag _{12.34} Cu _{3.00}) Σ 15.34Sb _{2.12} S _{11.50}			
27	Sp (n=5)	(Zn _{0.98} Fe _{0.02}) Σ 1.00S _{1.00}			
28	Sp	Zn _{0.99} S _{1.01}			

Примечание. Таблица 2 является приложением к Таблице 1. Номера анализов в табл. 2 соответствуют номерам в табл. 1. Формулы тетраэдрита рассчитаны на 29 атомов. В формулах тетраэдрита не отражены элементы Pb $\leq$ 0.02 ф.к. и Bi, Se и Te $\leq$ 0.01 ф.к., чтобы не усложнять их, но они учтены в суммах металлов и полуметаллов. В формуле полибазита содержания (в ф.к.) Te 0.02–0.04, Pb 0.01–0.03, Zn и Fe $\leq$ 0.02, Bi и Hg $\leq$ 0.01 также не вставлены в формулу, чтобы не усложнять её.

Ag-содержащий тетраэдрит-(Cd) по данным 7 анализов в трёх разобшённых зёрнах имеет примерно одинаковый химический состав (усреднённые содержания, мас.%): Ag 16.17, Cu 25.19, Cd 10.09, Fe 0.38, Zn 0.09, Pb 0.13, Sb 25.55, As 0.18, S 22.34 (табл. 1, ан. 1–7). Эмпирическая формула имеет вид $(\text{Cu}_{7.40}\text{Ag}_{2.80})_{\Sigma 10.20}(\text{Cd}_{1.68}\text{Fe}_{0.13}\text{Zn}_{0.03}\text{Pb}_{0.01})_{\Sigma 1.84}(\text{Sb}_{3.92}\text{As}_{0.04})_{\Sigma 3.96}\text{S}_{13.00}$ (табл. 2, ан. 1–7), которая близка к идеальной формуле $(\text{Cu}, \text{Ag})_6(\text{Cu}_4\text{Cd}_2)\text{Sb}_4\text{S}_{13}$. По содержанию Sb (соотношение $\text{Sb}/(\text{Sb}+\text{As})$ равно 0.99) является крайним сурьмяным членом тетраэдритовой серии. Концентрации Ag (соотношение $\text{Ag}/(\text{Ag} + \text{Cu})$ равно 0.28) являются высокими для тетраэдрита, что делает его ближе к аргентотетраэдриту. Содержание Fe немного преобладает над Zn, но из-за их низких концентраций и высоких содержаний Cd соотношение $\text{Zn}/(\text{Fe} + \text{Zn} + \text{Cd})$ низкое 0–0.02. Содержания полуметаллов и серы близки к идеальным стехиометрическим значениям. Концентрации одновалентных металлов выше, а двухвалентных ниже стехиометрических. Однако общая сумма металлов почти соответствует стехиометрическим значениям.

Состав *Ag–Cd-содержащего тетраэдрита-(Zn)* по данным 4 анализов варьирует в следующих интервалах (в мас. %): Ag 15.19–15.99, Cu 27.19–27.74, Zn 3.20–5.72, Fe 0.39–2.18, Cd 0.62–1.43, Pb 0.05–0.15, Sb 26.61–26.76, As 0.09–0.19, S 23.25–23.66; эмпирическая формула $(\text{Cu}_{7.73-7.62}\text{Ag}_{2.49-2.64})_{\Sigma 10.21-10.28}(\text{Zn}_{1.55-0.87}\text{Fe}_{0.69-0.12}\text{Cd}_{0.23-0.10}\text{Pb}_{0.01})_{\Sigma 1.68-1.90}(\text{Sb}_{3.91-3.88}\text{As}_{0.02-0.04})_{\Sigma 3.92-3.92}\text{S}_{12.92-13.11}$ (табл. 1, 2, ан. 8–11) близка к идеальной формуле $(\text{Cu}, \text{Ag})_6(\text{Cu}_4(\text{Zn}, \text{Cd})_2)\text{Sb}_4\text{S}_{13}$. Минерал является крайним сурьмянистым членом тетраэдритовой серии, соотношение $\text{Sb}/(\text{Sb}+\text{As})$ равно 0.99. Тетраэдрит-(Zn) имеет высокие концентрации Zn (соотношение $\text{Zn}/(\text{Fe}+\text{Zn}+\text{Cd})$ 0.52–0.84).

Состав *Ag–Cd-содержащего тетраэдрита-(Fe)* по данным 4 анализов варьирует в следующих интервалах (в мас. %): Ag 15.47–17.12, Cu 26.90–29.20, Zn 0.08–1.24, Fe 4.07–5.83, Cd н.п.о.⁴–1.12, Pb 0.09–0.13, Sb 26.66–27.04, As 0.18–0.29, S 23.65–23.85; эмпирическая формула $(\text{Cu}_{8.06-7.45}\text{Ag}_{2.51-2.79})_{\Sigma 10.24-10.59}(\text{Fe}_{1.84-1.13}\text{Zn}_{0.33-0.02}\text{Cd}_{0.18-0}\text{Pb}_{0.01})_{\Sigma 1.47-1.87}(\text{Sb}_{3.89-3.86}\text{As}_{0.04-0.07})_{\Sigma 3.90-3.96}\text{S}_{12.98-13.03}$ (табл. 1, 2, ан. 12–15) близка к идеальной формуле $(\text{Cu}, \text{Ag})_6(\text{Cu}_4(\text{Fe}, \text{Cd})_2)\text{Sb}_4\text{S}_{13}$. Тетраэдрит-(Fe)

содержит высокие концентрации Sb и Fe (соотношения $\text{Sb}/(\text{Sb}+\text{As})$ 0.98–0.99 и $\text{Zn}/(\text{Fe}+\text{Zn}+\text{Cd})$ 0.04–0.20). Содержания Cd в нём ниже, чем в сосуществующих с ним тетраэдрите-(Zn) и тетраэдрите-(Cd).

Все обнаруженные блёклые руды являются крайними сурьмяными членами (относятся к тетраэдритовой серии). Содержание Ag во всех трёх тетраэдритах близко между собой, варьирует в незначительном интервале 13.70–18.60 мас. % (2.27–3.15 ф.к.). Главной особенностью обнаруженных на месторождении Кон-Дара блёклых руд является их различие по содержанию двухвалентных металлов: Cd 10.43–9.81 мас. % (1.74–1.63 ф.к.) в тетраэдрите-(Cd), Fe 5.83–3.58 мас. % (1.84–1.28 ф.к.) в тетраэдрите-(Fe) и Zn 5.72–3.20 мас. % (1.55–0.87 ф.к.) в тетраэдрите-(Zn). Во всех тетраэдритах присутствует примесь Pb в концентрациях до 0.14 мас. % (0.01 ф.к.). Обращает на себя внимание, что во всех тетраэдритах отмечается дефицит двухвалентных металлов ($\text{Cd}+\text{Fe}+\text{Zn}$) и избыток одновалентных металлов ($\text{Cu}+\text{Ag}$).

На картинах распределения элементов в характеристических лучах видно, что Cd сосредоточен главным образом в блёклой руде: контуры выделений блёклой руды, а также аномалий по Ag и Sb, совпадают с контурами высоких концентраций Cd (Приложение 1).

Бурнонит по данным двух анализов имеет усреднённый состав (в мас. %): Cu 13.21, Pb 41.79, Sb 23.82, As 0.28, S 20.14 и Zn 0.05, который рассчитывается на формулу, близкую к стехиометрической $\text{Cu}_{1.01}\text{Pb}_{0.98}(\text{Sb}_{0.95}\text{As}_{0.02})_{\Sigma 0.97}\text{S}_{3.04}$ (табл. 1, 2, ан. 20).

Полибазит (по данным 5 анализов) имеет следующие вариации состава (в мас.%): Ag 57.65–61.68, Cu 7.67–8.33, Sb 10.38–11.17, S 15.15–16.12, Te 0.09–0.23, Pb 0.07–0.24, Bi н.п.о. –0.13, Zn до 0.06 и Fe до 0.04 и рассчитывается на формулу $(\text{Ag}_{12.34-13.11}\text{Cu}_{3.08-2.77})_{\Sigma 15.34-15.87}\text{Sb}_{2.00-2.12}\text{S}_{11.09-11.50}$ (табл. 1, 2, ан. 22–26). Трудно объяснить заниженные суммы анализов, полученные с помощью РСМА для полибазита: в процессе анализа интенсивность излучения элементов не менялась, а другие элементы на энерго-дисперсионных спектрах (ЭДС), кроме измеренных, не просматривались.

Усреднённый состав *галенита* по данным 3 анализов содержит (в мас. %): Pb 85.27, S 13.52, Sb 0.12, Cu 0.11, Fe 0.11, Ag 0.04, Te 0.05 (табл. 1, 2, ан. 21). Обнаруженные при анализе галенита элементы Sb, Cu, Fe, Ag и Te, скорее всего,

⁴Н.п.о. – ниже предела обнаружения (2σ). Значения 2σ приведены в Примечании к табл. 1.

связаны с присутствием в нем мельчайших включений тетраэдрита, бурнонита и/или полибазита в галените.

При анализе *халькопирита* в его составе обнаружена примесь Sb (табл. 1, 2, ан. 16–19). Содержание Sb в разных зёрнах халькопирита различается: от максимальных 1.38 мас. % до минимальных 0.09 мас. %. По другим элементам химический состав почти не отличается (средний состав по данным 9 анализов, мас. %): Cu 34.24, Fe 29.44, Sb 0.73, Zn 0.03, S 35.22; формула $\text{Cu}_{0.99}(\text{Fe}_{0.97}\text{Sb}_{0.01})_{\Sigma 0.98}\text{S}_{2.02}$. Природа появления Sb в составе халькопирита неясна, вероятно, это её присутствие может являться следствием замещения бурнонита халькопиритом.

Сфалерит по данным 6 анализов содержит невысокие концентрации Fe и Cd. Его усреднённый состав (мас. %): Zn 65.32, Fe 1.02, Cd 0.32, Cu 0.15, In 0.07 и S 32.67 (табл. 1–2, ан. 27–28). Низкие концентрации Cd и Fe в сфалерите также подтверждаются картинами распределения элементов в характеристических лучах (приложение 2).

Условия образования Ag-содержащих тетраэдритов из месторождения Кон-Дара

С помощью геотермометра для Ag-содержащих блеклых руд ([25], приложение 5) путём нанесения на график $\text{Ag}/(\text{Ag}+\text{Cu})$ vs $\text{Zn}/(\text{Zn}+\text{Fe})$ составов тетраэдрита-(Fe) и тетраэдрита-(Zn) оценены вероятные температуры их отложения (рис. 5). Наиболее высокотемпературным оказался тетраэдрит-(Zn): он мог отложиться при температуре $170 \pm 20^\circ\text{C}$. Затем, при падении температуры до $140 \pm 20^\circ\text{C}$, кристаллизовался тетраэдрит-(Fe). Как было сказано ранее, тесные сростания тетраэдрита-(Fe) и тетраэдрита-(Zn) с тетраэдритом-(Cd), обнаруженные в тончайших прожилках, позволяют предполагать, что тетраэдрит-(Cd) отлагался из того же флюида и при одинаковых условиях, что и тетраэдрит-(Fe) с тетраэдритом-(Zn). Следовательно, кристаллизация тетраэдрита-(Cd) на месторождении Кон-Дара происходила в интервале температур $(170–140) \pm 20^\circ\text{C}$.

Полученные данные являются первой оценкой температуры отложения блёклой руды на этом месторождении. Ранее температуры отложения флюорита, галенита и кальцита были определены методом растрескивания минералов ([23], приложение 5), который в настоящее время не считается достоверным и дискредитирован.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённых исследований редкий минерал из группы блёклых руд – Ag-содержащий тетраэдрит-(Cd) впервые обнаружен в рудах месторождения на территории Таджикистана. Ранее описанные блёклые руды из месторождений Таджикистана содержали сотые доли или первые проценты кадмия (например, [20]; [21, 26], приложение 5)).

В серебряных и серебросодержащих месторождениях Таджикистана блёклые руды являются одним из основных рудных минералов, содержание которого в отдельных рудных телах может быть выше концентрации других рудных минералов в целом ([26], приложение 5). По данным обобщения составов блёклых руд из месторождений Северного и Центрального Таджикистана, а также Памира, установлено, что наиболее широким распространением пользуются тетраэдриты, а не теннантиты, при этом за редким исключением все блёклые руды сереброносны ([26], приложение 5). Содержание серебра в блёклых рудах всего региона в целом варьирует от 0.13 (Кансай) до 33.91 (Школьное) мас. %

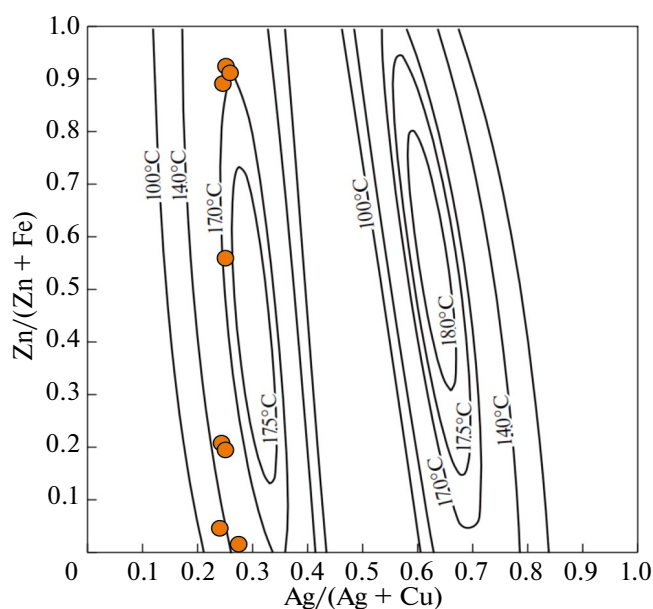


Рис. 5. Составы тетраэдрита-(Fe) и тетраэдрита-(Zn) (отмечены оранжевыми кружками), сосуществующие с тетраэдритом-(Cd), нанесены на график, заимствованный из [25]. Нарисованы изотермы и области несмесимости блёклой руды $(\text{Cu}, \text{Ag})_{10}(\text{Fe}, \text{Zn})_2\text{As}_4\text{S}_{13}$ при 100, 140, 170, 180 и 185°C , рассчитанные для $\Delta G^*_{3s} = 10$ кДж/моль (слева) и $\Delta G^*_{3s} = -10$ кДж/моль (справа).

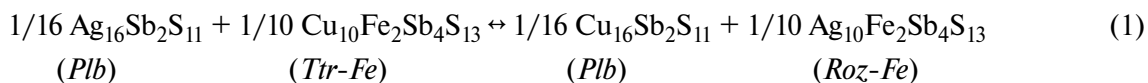
([26], приложение 5), что согласуется с данными изучения блёклых руд из нескольких месторождений Карамазара (от 0.10 до 35.73 мас. % Ag, [20]). До данного исследования максимальное оцененное содержание Cd в блёклой руде на территории Таджикистана было установлено в аргентотетраэдрите-(Zn) из месторождения Школьное, и составляло 2.76 мас. % (по данным [21], приложение 5) и из личного сообщения Н.С. Бортникова).

По своему химическому составу Ag-содержащий тетраэдрит-(Cd) из Кон-Дары близок к таковому из Pb–Zn-минерализации Тиндрума (Tyndrum) в Шотландии [4], барит-флюоритового-(Ag,Cu) месторождения Клара (Clara mine) в Германии [8] и Pb–Zn-месторождения Ксайтишань (Xitieshan) в Китае [5].

Ag-содержащий тетраэдрит-(Cd) образовался на месторождении в результате ретроградных реакций замещения раннего бурнонита вновь образованными минеральными агрегатами. При этом часть металлов: Cu, Pb, Sb и S, содержащихся в бурноните, связываются во вновь образованные минералы, а часть металлов: Ag, Cd, Fe и Zn, привносится поздними растворами, проникающими по тонким трещинкам в бурноните. Следовательно, процесс замещения бурнонита скорее был не изохимическим, хотя баланс вещества не рассчитывался.

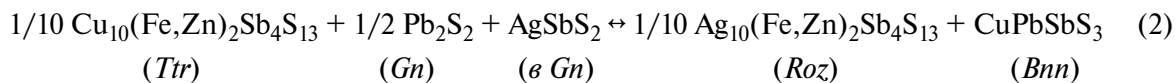
Вероятные ретроградные реакции, которые могли иметь место при образовании Ag-содержащих блёклых руд на месторождении Кон-Дара:

Ag–Cu-обменная реакция между блёклой рудой и полибазитом:



(реакция 4 в [27], приложение 5)

и реакция обогащения блёклой руды серебром при охлаждении:



(реакция 45 в [27], Приложение 5).

Самым интересным в обнаруженной в прожилках бурнонита ассоциации является совместное нахождение трёх минералов из группы блёклых руд, трёх тетраэдритов с резко различающимся содержанием в них Cd, Fe и Zn при почти одинаковых концентрациях Ag, Cu и Sb. На небольшом участке (всего 0.7×0.4 мм) в тесных сростаниях встречено три практически крайних члена тетраэдритовой серии группы блёклой руды: тетраэдрит-(Cd), тетраэдрит-(Fe) и тетраэдрит-(Zn) без промежуточных составов (рис. 6 а). Тесное сростание этих минералов в тонких прожилках свидетельствует об их отложении из одного и того же флюида, одновременно в одних и тех же физико-химических условиях. Вероятнее всего, такие взаимоотношения могут предполагать разрыв смесимости в блёклых рудах между их крайними членами, различающихся по содержанию двухвалентных (Cd, Fe и Zn) металлов. Возможно, одновременная кристаллизация разных по составу минералов из группы блёклых руд на месторождении Кон-Дара произошла в неравновесных условиях.

Картина распределения двухвалентных металлов в Ag-содержащих тетраэдритах из месторождения Кон-Дара близка к таковой для составов аргентотетраэдритов и Ag-содержащих тетраэдритов на месторождении Тиндрум (Шотландия) (рис. 5 б). На месторождении Баруилья (Испания) мы видим противоположную месторождениям Кон-Дара и Тиндрум картину: составы Cd–Fe–Zn-содержащих тетраэдритов (с содержанием Ag менее 4 мас. %) скученно занимают центральную часть поля (рис. 5 в).

Можно предположить, что на распределение двухвалентных металлов в кристаллических структурах тетраэдрита и аргентотетраэдрита влияет содержание Ag. При содержаниях Ag меньше 4 мас. % тетраэдрит с одинаковой способностью готов включать в себя любой из представленных двухвалентных металлов. Содержания Ag выше 6 мас. % делают кристаллические структуры тетраэдрита и аргентотетраэдрита более разборчивыми в выборе двухвалентного металла, и в разное время (вероятно, в зависимости от химического состава флюида и активностей

компонентов в нём) тетраэдрит/аргентотетраэдрит включает в себя либо тот, либо другой двухвалентный металл.

Кроме кристаллохимических особенностей блёклой руды, подобное распределение двухвалентных металлов может быть связано с разрывом смесимости в теннантит-тетраэдритовом ряду Ag-содержащих блёклых руд при температурах ниже 170°C, предсказанным Р.О. Сэком ([24], приложение 5 и ссылки там). Составы Ag-содержащих блёклых руд из месторождений Кон-Дара и Тиндрум, а также результаты применения блёклорудного геотермометра для тетраэдритов из Кон-Дары, подтверждают это предсказание Р.О. Сэка.

Проведённые исследования и анализ опубликованных данных по кадмиевым блёклым рудам позволяют сделать некоторые заключения об особенностях их распространения и химического состава. Кадмиевые и Cd-содержащие блёклые руды являются крайне редкими в природе. Известно 19 месторождений и рудопроявлений, в которых обнаружены эти минералы с содержаниями выше 1 мас. % до максимально возможных 12.31 мас. % на основании 101 анализа (см. приложение 3, 4). Среди обогащенных кадмием минералов группы тетраэдрита обнаружено 4 крайних кадмиевых члена блёклорудного твёрдого раствора, которые, согласно принятой CNMNC IMA номенклатуре, определены как самостоятельные минеральные виды [1] (табл. 3).

Среди минералов блёклых руд самое высокое содержание кадмия 12.31 мас. % (2.01 ф.к.) выявлено в тетраэдрите-(Cd) из кварцевых жил рудопроявления золота Красное (Бодайбинский район) ([7] и по данным личного сообщения Е.Е. Паленовой) (приложения 3 и 4, ан. 50).

В нём присутствует 6.12 мас. % Ag (1.04 ф.к.), а концентрации Fe и Zn оказались ниже минимальных пределов обнаружения. Вероятно, этот минерал является крайним кадмиевым природным членом блёклорудного твёрдого раствора.

Рассмотрение совокупности анализов ($n = 101$) не выявило каких-либо чётких взаимосвязей содержаний кадмия с тем или иным элементом в химическом составе Cd-содержащих блёклых руд (рис. 7). Тем не менее, некоторые особенности их состава проявляются. Среди блёклых руд наиболее обогащённым кадмием минералом (до 2.02 ф.к. или 12.31 мас. % Cd) является тетраэдрит, чуть меньшие содержания Cd (1.88 ф.к. или 11.15 мас. %) встречаются в аргентотетраэдрите, ещё меньше (1.68 ф.к. или 11.79 мас. %) — в теннантите, а всех меньше, содержание Cd в хаките — не превышает 1.36 ф.к. или 6.55 мас. % (приложение 3, 4 и ссылки там).

Среди кадмиевых блёклых руд встречаются как богатые серебром (аргентотетраэдрит и Ag-содержащий тетраэдрит), так и почти полностью бессеребряные минералы (теннантит и хакит) (рис. 7 а). При этом обращает на себя внимание график распределения Cd vs Ag, на котором фиксируется отсутствие Cd-содержащих блёклых руд с содержанием Ag от 1 до 2.5 ф.к. (~ от 6 до 13.7 мас. %) (рис. 7 а). В Cd-содержащей блёклой руде максимальное содержание Ag, равное 6.66 ф.к. (35.82 мас. %), обнаружено в аргентотетраэдрите-(Cd) из минерализации Маврокорифи (Mavrokoryfi) (Греция) [15]. Паттрик и Холл изучали замещение Ag в синтетическом тетраэдрите, содержащем Zn, Cd и Fe, и сделали вывод, что для Cd-содержащих блёклых руд максимально возможное содержание Ag равно 7.02 ф.к [18].

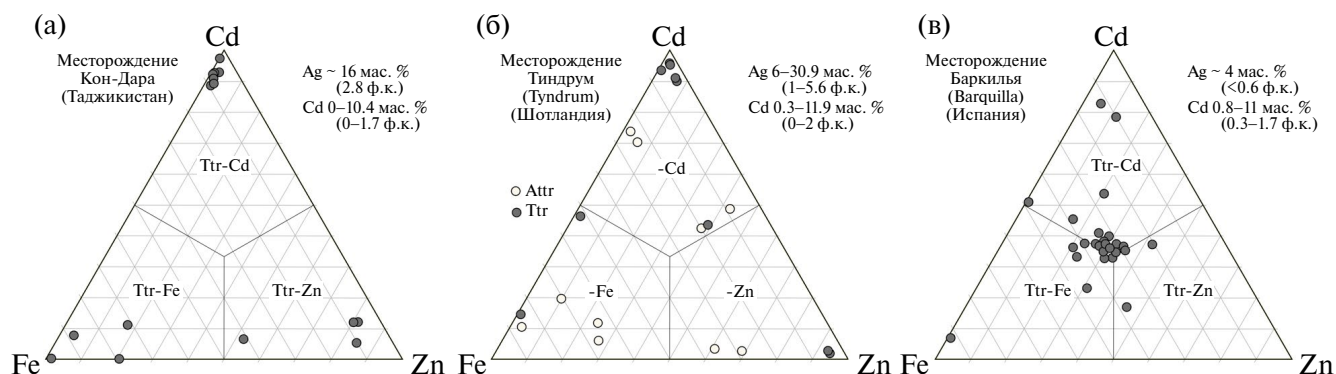


Рис. 6. Содержания двухвалентных металлов Cd, Zn и Fe в минералах группы блёклой руды из месторождения Кон-Дара (Таджикистан) (данная работа) (а) в сравнении с таковыми из месторождений Тиндрум (Шотландия) (график построен авторами на основании анализов, приведённых в работах [3, 4]) (б) и Баркилья (Испания) (рис. 7 из [6] с дополнениями) (в).

Таблица 3. Кадмиевые блёкые руды, обнаруженные в природе, и их реальные составы

Минеральный вид (формула)	Кол-во мест находок	Место находки (страна)	Формула минерала	Ссылка
Тетраэдрит-(Cd) $Cu_6(Cu_4Cd_2)Sb_4S_{13}$	8	1 – Тиндрум (Шотландия), 2 – рудопроявление Красное (Россия), 3 – Xitieshan (Китай), 4 – Radětice (Чехия), 5 – Clara mine (Германия), 6 – Кон-Дара (Таджикистан), 7 – Barquilla (Испания), 8 – Змеиногорское (Россия)	1 – $(Cu_{8.72}Ag_{1.04})\Sigma_{9.76}Cd_{2.01}(Sb_{3.95}As_{0.16})\Sigma_{4.11}S_{13.02}$ 2 – $(Cu_{7.12}Ag_{2.65})\Sigma_{9.77}(Cd_{2.02}Zn_{0.05}Fe_{0.05})\Sigma_{2.12}(Sb_{4.16}As_{0.16})\Sigma_{4.32}S_{12.80}$ 3 – $(Cu_{6.84}Ag_{2.95})\Sigma_{9.79}(Cd_{1.82}Zn_{0.15}Fe_{0.15})\Sigma_{2.12}(Sb_{4.06}As_{0.25})\Sigma_{4.31}S_{12.79}$ 4 – $(Cu_{9.71}Ag_{0.34})\Sigma_{10.05}(Cd_{1.74}Hg_{0.07}Zn_{0.07}Fe_{0.06})\Sigma_{1.94}Sb_{4.08}S_{12.91}$ 5 – $(Cu_{8.28}Ag_{2.74})\Sigma_{11.02}(Cd_{1.74}Fe_{0.36})\Sigma_{2.10}Sb_{3.52}S_{12.36}$ 6 – $(Cu_{7.40}Ag_{2.83})\Sigma_{10.23}(Cd_{1.74}Fe_{0.05})\Sigma_{1.79}(Sb_{3.91}As_{0.05})\Sigma_{3.96}S_{13.00}$ 7 – $(Cu_{9.64}Ag_{0.34})\Sigma_{9.98}(Cd_{1.71}Fe_{0.25}Zn_{0.09})\Sigma_{2.05}(Sb_{3.57}As_{0.52})\Sigma_{4.09}S_{12.87}$ 8 – $(Cu_{9.61}Ag_{1.12})\Sigma_{10.73}(Cd_{1.04}Mn_{0.26}Zn_{0.10}Fe_{0.04})\Sigma_{1.44}(Sb_{3.25}As_{0.61})\Sigma_{3.86}S_{12.97}$	1 – [4]; прил. 3-4, ан. 31 2 – [7]; прил. 3-4, ан. 50 3 – [5]; прил. 3-4, ан. 35 4 – [9]; прил. 3-4, ан. 52 5 – [8]; прил. 3-4, ан. 36 6 – авторы; табл. 2, ан. 1; прил. 3-4, ан. 37 7 – [6]; прил. 3-4, ан. 53 8 – [9]; прил. 3-4, ан. 55
Аргентотетраэ- дрит-(Cd) $Ag_6(Cu_4Cd_2)Sb_4S_{13}$	5	1 – Rudno nad Hronom (Словакия), 2 – минерализация Mavrokovufi (Греция), 3 – Тиндрум (Шотландия), 4 – Ушкатын-III (Казахстан) 5 – Tunaberg (Швеция)	1 – $(Cu_{6.86}Ag_{3.17})\Sigma_{10.03}(Cd_{1.88}Fe_{0.06}Zn_{0.04})\Sigma_{1.98}(Sb_{3.70}As_{0.25})\Sigma_{3.95}S_{13.04}$ 2 – $(Cu_{6.66}Ag_{3.52})\Sigma_{10.18}(Cd_{1.45}Fe_{0.12})\Sigma_{1.57}(Sb_{3.44}As_{0.64})\Sigma_{4.08}S_{13.05}$ 3 – $(Cu_{6.69}Ag_{3.11})\Sigma_{9.80}(Cd_{1.40}Fe_{0.47}Zn_{0.12})\Sigma_{1.99}(Sb_{4.13}As_{0.01})\Sigma_{4.14}S_{13.07}$ 4 – $(Cu_{6.84}Ag_{3.16})\Sigma_{10.00}(Cd_{0.99}Fe_{0.71}Zn_{0.14})\Sigma_{1.84}(Sb_{3.94}As_{0.17})\Sigma_{4.11}S_{13.04}$ 5 – $(Cu_{6.46}Ag_{3.61})\Sigma_{10.07}(Cd_{0.86}Mn_{0.78}Fe_{0.43})\Sigma_{2.07}(Sb_{3.81}Bi_{0.14})\Sigma_{3.95}S_{12.91}$	1 – [16]; прил. 3-4, ан. 1 2 – [15]; прил. 3-4, ан. 16 3 – [3]; прил. 3-4, ан. 14 4 – [13]; прил. 3-4, ан. 18 5 – [14]; прил. 3-4, ан. 21
Теннантит-(Cd) $Cu_6(Cu_4Cd_2)As_4S_{13}$	2	1 – Томинское (Россия), 2 – Berenguela (Боливия)	1 – $(Cu_{9.90}Ag_{0.01})\Sigma_{9.91}(Cd_{1.68}Zn_{0.09}Fe_{0.05})\Sigma_{1.82}(As_{2.63}Sb_{1.25})\Sigma_{3.88}S_{13.31}$ 2 – $(Cu_{9.96}Ag_{0.01})\Sigma_{9.97}(Cd_{1.57}Zn_{0.46}Fe_{0.01})\Sigma_{2.04}As_{3.96}S_{13.03}$	1 – [11]; прил. 3-4, ан. 73 2 – [12] прил. 3-4, ан. 75
Хакит-(Cd) $Cu_6(Cu_4Cd_2)Sb_4Se_{13}$	1	Příbram (Чехия)	$(Cu_{9.95}Ag_{0.16})\Sigma_{10.11}(Cd_{1.36}Zn_{0.53}Hg_{0.07}Fe_{0.03})\Sigma_{1.99}(Sb_{4.06}Bi_{0.16})\Sigma_{4.22}(Se_{12.28}S_{0.39})\Sigma_{12.67}$	[17]; прил. 3-4, ан. 88

Примечание. Формулы минералов рассчитаны на 29 атомов.

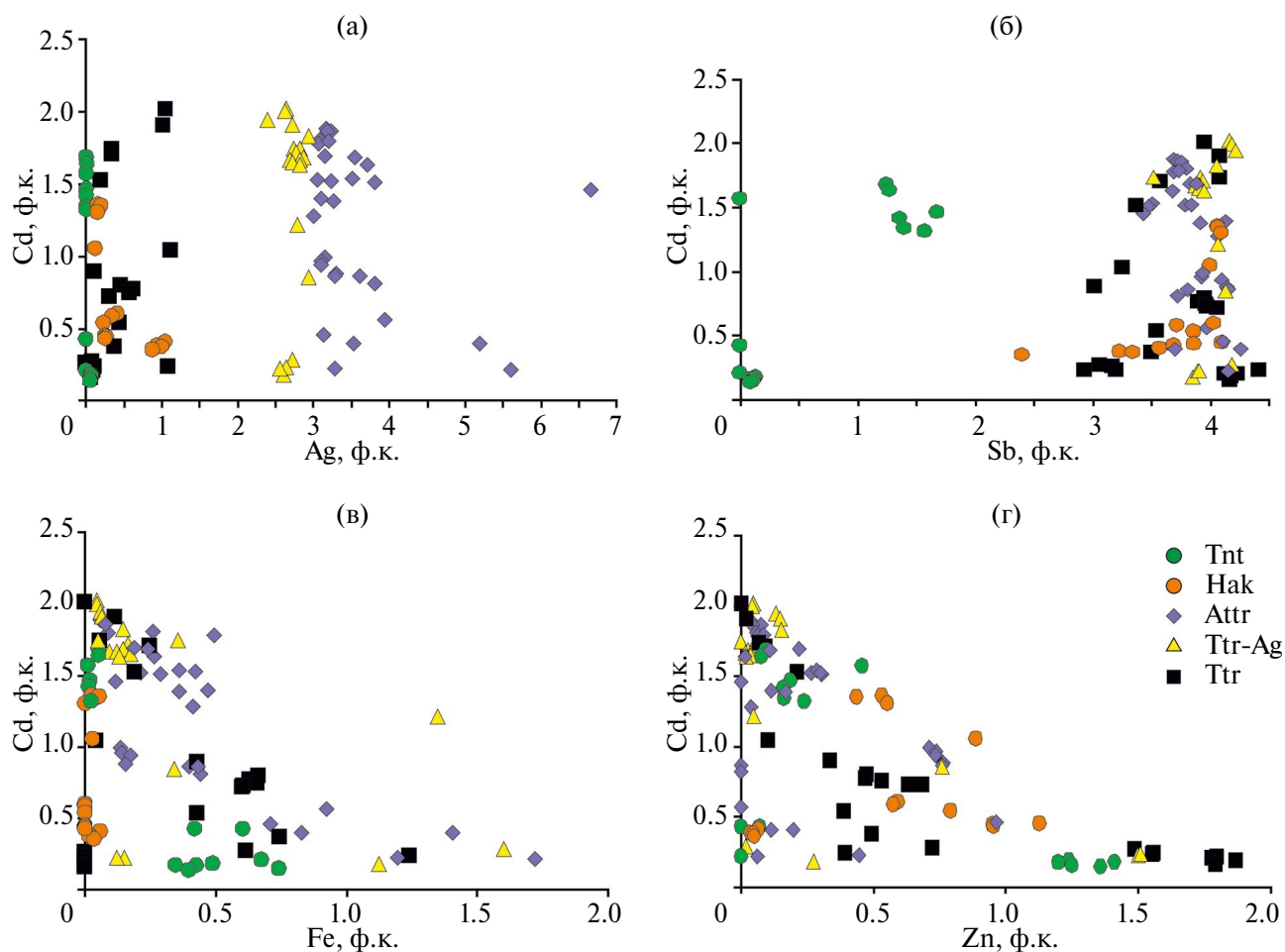


Рис. 7. Содержания Cd против содержаний Ag (а), Sb (б), Fe (в) и Zn (г) (в ф.к.) в кадмиевых блёклых рудах. Графики построены на основании обобщённой таблицы анализов (приложения 3 и 4), полученных из различных источников. Формульные коэффициенты в минералах рассчитаны на основании 29 атомов в формуле.

Рисунок 7 б позволяет сделать вывод, что Cd предпочтительнее концентрируется в сурьмяных блёклых рудах. При этом, вероятнее всего, что присутствие значимых содержаний серебра в тетраэдрите-(Cd) и аргентотетраэдрите-(Cd) связано с тем, что Ag предпочтительнее концентрируется в сурьмяных блёклых рудах.

Картины распределения двухвалентных металлов в Cd-содержащих блёклых рудах на графиках Cd vs Fe и Cd vs Zn схожи (рис. 7 в, г). Не наблюдается приуроченность концентраций кадмия в блёклых рудах к Fe или Zn: встречаются как железистые, так и цинкистые крайние члены Cd-содержащих тетраэдрита, аргентотетраэдрита и теннантита (рис. 7 в, г, 8). Исключением является хакит-(Fe), в котором пока ещё не было обнаружено значимых (более 1 мас. %) концентраций Cd.

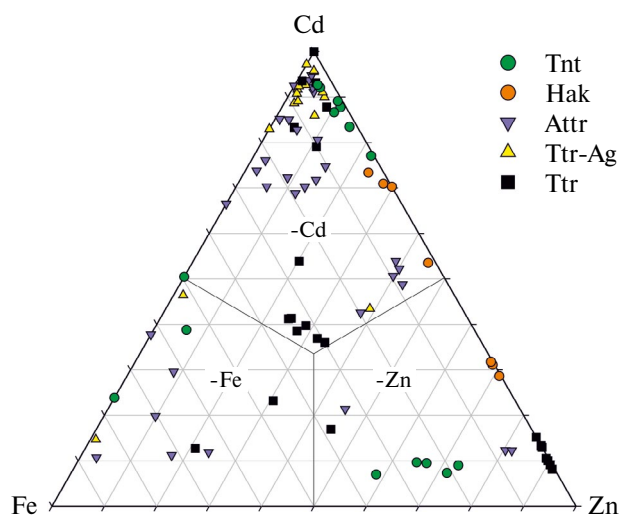


Рис. 8. Распределение двухвалентных металлов Cd, Zn и Fe в Cd-содержащих блёклых рудах, известных в мире. На график нанесены все анализы из приложений 3 и 4 за исключением Cd-содержащих аргентотетраэдрита-(Mn) и хакита-(Hg).

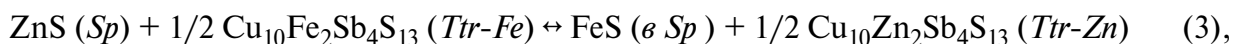
Тройная диаграмма распределения двухвалентных металлов, построенная по всем известным в природе Cd-содержащим блёклым рудам, демонстрирует относительно небольшое количество анализов в центральной её части (рис. 8). Это говорит о том, что промежуточные Cd–Zn–Fe-содержащие блёклые руды крайне редки. Они обнаружены только на месторождении Barquilla в Испании. Приведённые данные могут свидетельствовать о наличии разрывов смесимости в Cd–Zn–Fe-содержащем теннантит-тетраэдритовом твёрдом растворе. Разрыв смесимости может быть обусловлен низкими температурами образования Cd-содержащих блёклых руд (< 200°C), при которых имеет место распад блёклорудного твёрдого раствора на крайние Fe-, Zn- и Cd-члены, либо может быть связан с определёнными физико-химическими условиями кристаллизации Cd–Zn–Fe-содержащих блёклых руд и составом минералообразующего флюида.

Частыми спутниками кадмия в кадмиевых блёклых рудах являются Sb и Ag, а также в меньшем количестве Zn и Fe. Но кроме этих элементов в литературе описывались следующие сопутствующие с Cd элементы: As, Se, Mn, Hg, Bi и Co

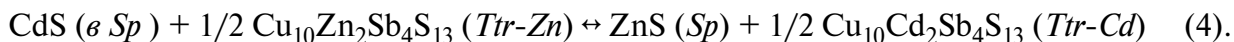
в Cd-содержащих блёклых рудах (см. приложение 3 и ссылки там).

Редкость кадмиевых блёклых руд может быть связана с низким содержанием Cd в породах коры. Высказывалось мнение, что Cd предпочтительнее встраивается в сокристаллизующиеся с блёклой рудой халькопирит и сфалерит, и что содержание Cd выше в тех образцах блёклой руды, которые кристаллизуются в ассоциациях, не содержащих сфалерита и халькопирита, или в средах, необычно обогащённых Cd ([28], приложение 5). Однако результаты данного исследования показали, что Cd в раннем сфалерите содержится в незначительных количествах (до 0.4 мас. %) и полностью отсутствует в халькопирите, образовавшемся близко-одновременно с Ag-содержащим тетраэдритом-(Cd).

Отмечалось, что в гипергенных условиях Cd, содержащийся изоморфно в сфалерите, легко отделяется от Zn ([29], приложение. 5). Вероятно, в рудах месторождения Кон-Дара имела место ретроградная Fe–Zn-обменная реакция между сфалеритом и тетраэдритом (реакция 19 в [27], Приложение 5):



а также подобная ей Cd–Zn-обменная реакция:



В результате последней реакции (4) при остывании флюида блёклые руды обогащались кадмием, вынесенным из сфалерита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые обнаружен редкий минерал крайней кадмиевой блёклой руды – Ag-содержащий тетраэдрит-(Cd) – на территории Таджикистана. Его необычные тесные срастания с другими крайними членами группы блёклой руды (тетраэдритом-(Fe) и тетраэдритом-(Zn)) могут свидетельствовать о разрыве смесимости в блёклорудном твёрдом растворе при температурах ниже 200°C.

В блёклых рудах Cd предпочтительнее концентрируется в сурьмяных минералах: тетраэдрите, аргентотетраэдрите, хаките. Кадмиевые блёклые руды часто содержат значимые концентрации Ag, которые, скорее всего, связаны с Sb, а не с Cd.

По имеющимся в литературе анализам Cd-содержащих блёклых руд в твёрдом растворе между тетраэдритом-(Cd) и аргентотетраэдритом-(Cd) не наблюдается полной смесимости: на основании РСМА установлен разрыв смесимости в интервале содержаний Ag от 1 до 2.5 ф.к. (~ от 6 до 13.7 мас. %). На месторождении Кон-Дара разрыв смесимости наблюдался и в Cd–Zn–Fe-содержащем тетраэдритовом твёрдом растворе между двухвалентными металлами.

Оценена температура образования Ag-содержащего тетраэдрита-(Cd) и сосуществующих с ним Ag-содержащих тетраэдрита-(Fe) и тетраэдрита-(Zn) на месторождении Кон-Дара – (170–140)±20°C. Образование Ag-содержащего тетраэдрита-(Cd) происходило при остывании флюида в результате ретроградных реакций Cd–Zn-обмена, при которых блёклые руды обогащались кадмием, вынесенным из сфалерита.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта № 124022400142-2 “Кристаллохимические особенности, химический состав минералов и их ассоциаций как генетические индикаторы эндогенных и экзогенных процессов” Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН).

Приложения 1–5 доступны в виде электронных приложений по DOI данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Biagioni C., George L. G., Cook N. J., Makovicky E., Moëlo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C. J., Welch M. D., Bosi F. The tetrahedrite group: Nomenclature and classification. *Am. Miner.* 2020. V. 105. P. 109–122.
2. Warr L. N. IMA–CNMNC approved mineral symbols // *Mineralogical Magazine*. 2021. V. 85. № 3. P. 291–320.
3. Pattrick R. A. D. Microprobe analyses of cadmium-rich tetrahedrites from Tyndrum, Perthshire, Scotland // *Mineralogical Magazine*. 1978. V. 42. № 322. P. 286–288.
4. Pattrick R. A. D. Pb–Zn and minor U mineralization at Tyndrum, Scotland // *Mineralogical Magazine*. 1985. V. 49. № 354. P. 671–681.
5. Jia D., Fu Z., Zhang H., Zhao C. The first discovery of Cd-freibergite in China // *Acta Miner. Sinica*. 1988. V. 8. P. 136–137 (in Chinese with English abstract).
6. Pascua M. I., Muriego A., Pellitero E., Babkine J., Dusausoy Y. Sn–Ge–Cd–Cu–Fe-bearing sulfides and sulfosalts from the Barquilla deposit, Salamanca, Spain // *Canadian Mineralogist*. 1997. V. 35. P. 39–52.
7. Паленова Е. Е., Блинов И. А., Заботина М. В. Минералы серебра в кварцевых жилах рудопроявления золота Красное (Бодайбинский район) // *Минералогия*. 2015. № 2. С. 9–17.
8. Bayerl R., Desor J., Möhn G. New Minerals for the Clara mine, Oberwolfach, Germany. 2022. <https://www.mindat.org/reference.php?id=16098796>
9. Sejkora J., Biagioni C., Škácha P., Musetti S., Kasatkin A. V., Nestola F. Tetrahedrite-(Cd), $\text{Cu}_6(\text{Cu}_4\text{Cd}_2)\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, from Radětice near Příbram, Czech Republic: the new Cd member of the tetrahedrite group // *European Journal of Mineralogy*. 2023. V. 35. № 6. P. 897–907.
10. Тихомирова В. Д. Особенности состава блеклых руд месторождений формации медистых песчаников на Севере Урала / Теория, история, философия и практика минералогии: Материалы IV Междунар. минерал. семинара. 2006. С. 193–195.
11. Плотинская О. Ю., Ковальчук Е. В. Блеклые руды Cu-(Mo)-порфировых месторождений Урала // *Минералогия*. 2022. Т. 8. № 3. С. 5–22.
12. Biagioni C., Kasatkin A., Sejkora J., Nestola F., Škoda R. 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 // *Mineral. Mag.* 2022. V. 86. P. 834–840.
13. Воронаев А. В., Спирidonov Э. М., Щибрик В. И. Тетраэдрит-Cd – первая находка в СССР // *Доклады АН СССР*. 1988. Т. 300. № 6. С. 1446–1448.
14. Dobbe R. T. M. Manganoan-cadmian tetrahedrite from the Tunaberg Cu–Co deposit, Bergslagen, central Sweden // *Mineral. Mag.* 1992. V. 56. P. 113–115.
15. Voudouris P. C. Conditions of formation of the mavrokoryfi high-sulfidation epithermal Cu–Ag–Au–Te mineralization (Petrota Graben, NE Greece) // *Mineralogy and Petrology*. 2011. V. 101. P. 97–113.
16. Mikuš T., Vlasáč J., Majzlan J., Sejkora J., Steciuk G., Plášil J., Rößler C., Matthes C. Argentotetrahedrite-(Cd), $\text{Ag}_6(\text{Cu}_4\text{Cd}_2)\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, a new member of the tetrahedrite group from Rudno nad Hronom, Slovakia // *Mineralogical Magazine*. 2023. V. 87. № 2. P. 262–270.
17. Škácha P., Sejkora J., Palatinus L., Makovicky E., Plášil J., Macek I., Goliáš V. Hakite from Příbram, Czech Republic: compositional variability, crystal structure and the role in Se mineralization // *Mineralogical Magazine*. 2016. V. 80. № 6. P. 1115–1128. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.038>
18. Pattrick R. A. D., Hall A. J. Silver substitution into synthetic zinc, cadmium, and iron tetrahedrites // *Mineralogical Magazine*. 1983. V. 47. № 345. P. 441–451.
19. Юшкин Н. П. Новая кадмиевая разновидность тетраэдрита // *Доклады АН СССР*. 1978. Т. 242. № 2. С. 246–249.
20. Бортников Н. С., Коваленкер В. А., Гейнке В. Р., Тронева Н. В., Раздолина Н. В. Химический состав и парагенетические ассоциации сульфосолей в серебро-полиметаллических месторождениях Средней Азии / В кн.: Метасоматоз, минералогия и вопросы генезиса золотых и серебряных месторождений. М.: Наука, 1986. С. 146–167.

**Ag-BEARING TETRAHEDRITE-(Cd), $(\text{Cu}, \text{Ag})_6(\text{Cu}_4\text{Cd}_2)\text{Sb}_4\text{S}_{13}$,
FROM GALENITE-FLUORITE DEPOSIT KON-DARA MINERAL
(SOUTH-WESTERN PAMIRS) —
FIRST DISCOVERY IN TAJIKISTAN**

**N. G. Lyubimtseva^{a, #}, Academician of the RAS N. S. Bortnikov^a, V. M. Gekimyants^c,
S. E. Borisovsky^a, P. Yu. Plechov^b**

^a*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*A. Fersman Mineralogical Museum, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: luy-natalia@yandex.ru*

Tetrahedrite-(Cd), with the ideal formula $\text{Cu}_{10}\text{Cd}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, is a member of the tetrahedrite series of the tetrahedrite group with a predominance of Cd at the C position typically occupied by divalent metals. Cadmium end-members from the tetrahedrite group are rare: they were found in 15 deposits and ore occurrences. The article reports on a new discovery site of Ag-bearing tetrahedrite-(Cd) at the Kon-Dara mineral deposit (Southwestern Pamirs, Tajikistan) and summarizes the known data on rare Cd-bearing fahlores with Cd content from 1 to 12.31 wt. %. Ag-bearing tetrahedrite-(Cd) at the Kon-Dara deposit occurs as xenomorphic segregations 10–35 μm in size in association with tetrahedrite-(Fe), tetrahedrite-(Zn), galena, polybasite, and chalcopyrite, which replace bournonite. According to the EPMA data, its composition averaged over seven analyzes (in wt. %) is as follow: Ag 16.17, Cu 25.19, Cd 10.09, Fe 0.38, Zn 0.09, Pb 0.13, Sb 25.55, As 0.18, S 22.34. The empirical formula calculated based on 29 atoms per the unit is $(\text{Cu}_{7.40}\text{Ag}_{2.80})_{\Sigma 10.20}(\text{Cd}_{1.68}\text{Fe}_{0.13}\text{Zn}_{0.03}\text{Pb}_{0.01})_{\Sigma 1.84}(\text{Sb}_{3.92}\text{As}_{0.04})_{\Sigma 3.96}\text{S}_{13.00}$. The composition of the tetrahedrite-(Cd) from Kon-Dara is similar to those from the Tyndrum Pb-Zn mineralization in Scotland, the Clara baryte-fluorite-(Ag, Cu) mine in Germany, and the Xaitishan Pb-Zn deposit in China. The formation temperature of Ag-bearing tetrahedrite-(Cd) at the Kon-Dara deposit is estimated to have been at about $(170\text{--}140) \pm 20^\circ\text{C}$.

Keywords: tetrahedrite group, fahlore, tetrahedrite-(Cd), polybasite, bournonite, chemical composition, temperature, replacement, Kon-Dara, Pamir, Tajikistan