

КРАТКИЕ
СООБЩЕНИЯ

УДК 553.2

СОСУЩЕСТВУЮЩИЕ ТЕТРАЭДРИТ–(Zn) И СФАЛЕРИТ
НА ЗОЛОТОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ТЕРЕМКИ
(ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ): ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ
И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ

© 2021 г. Н. Г. Любимцева^а, *, В. Ю. Прокофьев^а, Н. С. Бортников^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

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

Поступила в редакцию 05.03.2021 г.

После доработки 30.05.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2021 г.

На золоторудном месторождении Теремки выделена парагенетическая ассоциация тетраэдрита–(Zn) и сфалерита. Определены химические составы этой пары сосуществующих минералов. В тетраэдрите–(Zn) соотношения $Sb/(Sb + As)$ и $Fe/(Fe + Zn)$ изменяются соответственно от 0.66 до 0.97 и от 0.28 до 0.40. Между соотношениями $Sb/(Sb + As)$ и $Fe/(Fe + Zn)$ установлена отрицательная корреляция. Содержание Fe в сфалерите изменяется от 0.88 до 1.43 мас. % (1.5–2.5 мол. % FeS). Оценены температура и фугитивность серы при отложении тетраэдрит–(Zn)–сфалеритового парагенезиса, которые изменялись от 130 до 280°C и от $10^{-13.2}$ до $10^{-8.1}$ соответственно.

Ключевые слова: месторождение Теремки, тетраэдрит–(Zn), сфалерит, сосуществующие минералы, распределение Fe и Zn, геотермометр, условия образования

DOI: 10.31857/S0016777021050038

ВВЕДЕНИЕ

Реконструкция условий минералообразования, выявление закономерностей распределения элементов между сосуществующими минералами – это одна из ключевых проблем современной минералогии, геохимии и учения о рудных месторождениях. При решении вопросов генезиса руд значительный интерес представляют минералы переменного состава, соотношение элементов в которых определяется физико-химическими параметрами минералообразующего флюида и закономерностями их распределения между минералом и флюидом.

Объектом исследования были выбраны сосуществующие блеклая руда и сфалерит золоторудного месторождения Теремки (Восточное Забайкалье). Эти два сульфида обладают широкими вариациями состава, часто находятся в ассоциации, и их химический состав (и его изменение) нередко используется в качестве индикатора физико-химических условий образования руд. Область использования минеральной ассоциации блеклой руды и сфалерита для оценки температур расширилась благодаря исследованиям термодинамических свойств этой пары минералов (Raabe, Sack, 1984; Sack, Loucks, 1985; Сэк, 2017; и др.).

Месторождение Теремки находится в 5 км от крупного золоторудного месторождения Дарасун. Ассоциации минералов на этих месторождениях схожи, однако на месторождении Теремки ассоциации не изучены с той же детальностью (Тимофеевский, 1972; Прокофьев и др., 2004; Любимцева и др., 2018_{1,2}; и др.). Условия образования продуктивной стадии месторождения Теремки были определены по данным изучения флюидных включений в кварце (Прокофьев и др., 2004; Prokofiev et al., 2010), а изучение рудных минералов переменного состава, таких как блеклая руда и сфалерит, которые могут находиться в ассоциации с самородным золотом, с этой целью не проводилось.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Теремки расположено в Читинской области, вблизи населенного пункта Вершино–Дарасунский (фиг. 1а, б). Месторождение состоит из серии пологих золоторудных турмалин–кварцевых сульфидных жил и зон вкрапленных руд и связано с системой разломов и гранодиорит–порфирами амуджиканского комплекса

(J_2-K_1), вмещающими породами являются габброиды (Pz_1) и гранитоиды среднепалеозойского–раннемезозойского возраста (Тимофеевский, 1972; Прокофьев и др., 2004; Prokofiev et al., 2010; и др.) (фиг. 1в). Минерализация золоторудных жил сформировалась в три стадии: *раннерудную* (кварц, турмалин, серицит, пирит, арсенопирит, халькопирит), *продуктивную* (кварц, пирит, халькопирит, сфалерит, блеклая руда, галенит, марказит, халькопирит, самородное золото, самородное серебро, пирротин, бурнонит, самородный висмут, висмутин, матильдит, айкинит, козалин, тетрадимит и др.) и *пострудную* (кварц, карбонат). Зерна самородного золота округлые, с плавными границами, размером до 50 мкм, находятся в сростаниях с кварцем, халькопиритом, сфалеритом, галенитом и минералами висмута. В некоторых жилах можно проследить смену от зальбандов к центру кварц-турмалиновых и кварц-пиритовых ассоциаций кварц-сульфидными парагенезисами с самородным золотом и кварц-карбонатными агрегатами в центре жил. Раздробленные кварц-турмалиновые и пиритовые обломки часто цементированы сульфидами.

ВЗАИМООТНОШЕНИЯ МИНЕРАЛОВ

Рудные минералы на месторождении Теремки представлены обломками мономинеральных зерен и сростаниями сульфидов размером 1–2 мм и меньше, сцементированных карбонатом, а также образуют вкрапленность во вмещающей породе (фиг. 2а, б).

Наблюдение взаимоотношений минералов под микроскопом показало, что блеклая руда (тетраэдрит) и сфалерит совместно с галенитом, халькопиритом и карбонатом выполняют интерстиции между зернами кварца. Галенит-халькопирит-тетраэдритовые агрегаты цементируют раздробленные зерна раннего пирита (фиг. 2в) и образуют крупнозернистые агрегаты, сцементированные карбонатом (фиг. 2д, е). Взаимоотношения тетраэдрита и халькопирита в этих агрегатах неоднозначны. Наблюдаются как сростания со взаимными ровными границами между зернами этих минералов (фиг. 2д, е, з, 3б, г), так и прожилки тетраэдрита, секущие халькопирит (фиг. 2з, 3в). Сфалерит-га-

ленит-халькопирит-тетраэдритовые агрегаты образуют крупнозернистые агрегаты в карбонате (фиг. 2ж, 3в), совместно с карбонатом выполняют интерстиции между зернами кварца (фиг. 3г), мелкие зерна этих агрегатов цементируются карбонатом (фиг. 3а, б). Эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите, приуроченная к халькопирит-галенитовым сростаниям, образующим цепочки выделений, свидетельствует о замещении сфалерита этими минералами (фиг. 2ж). Вероятно, на месторождении присутствуют две генерации блеклой руды: ранняя (тетраэдрит) образует взаимные сростания с халькопиритом, галенитом и сфалеритом, а другая – поздняя – обрастает ранние агрегаты тетраэдрита, замещает халькопирит и в виде тончайших прожилков проникает в сфалерит и галенит.

Одинаковое положение тетраэдрита и сфалерита относительно ранних минералов, ровные границы, отсутствие пересечений и коррозионных взаимоотношений между ними указывают на близкое по времени образование этих минералов при достижении равновесных условий.

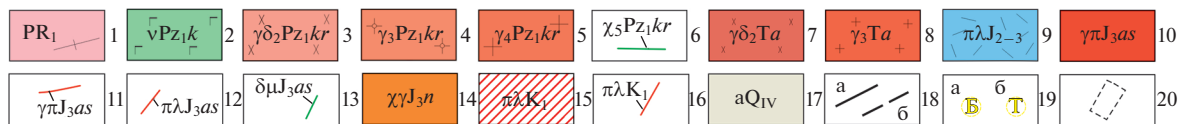
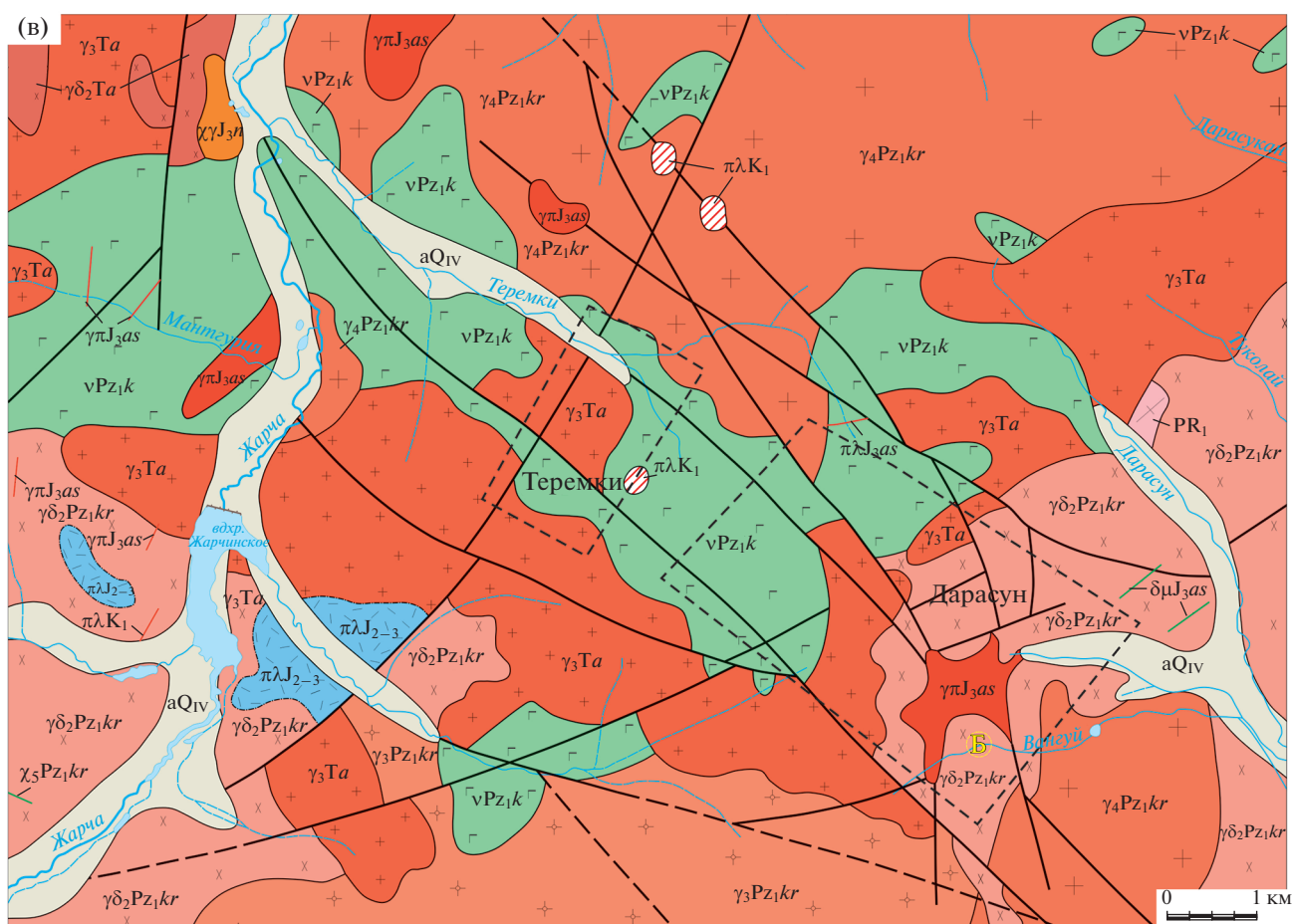
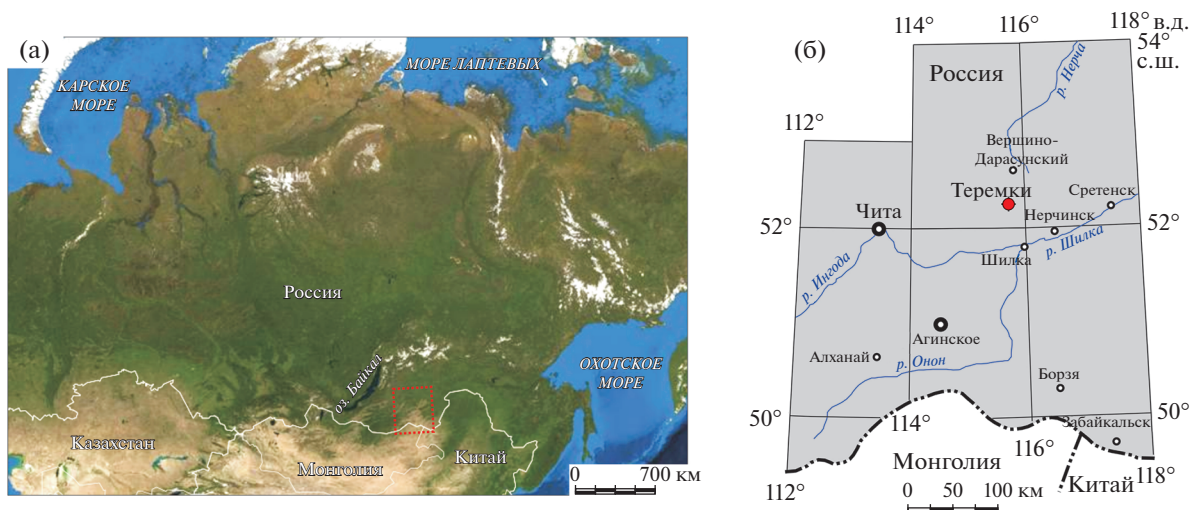
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТЕТРАЭДРИТА И СФАЛЕРИТА

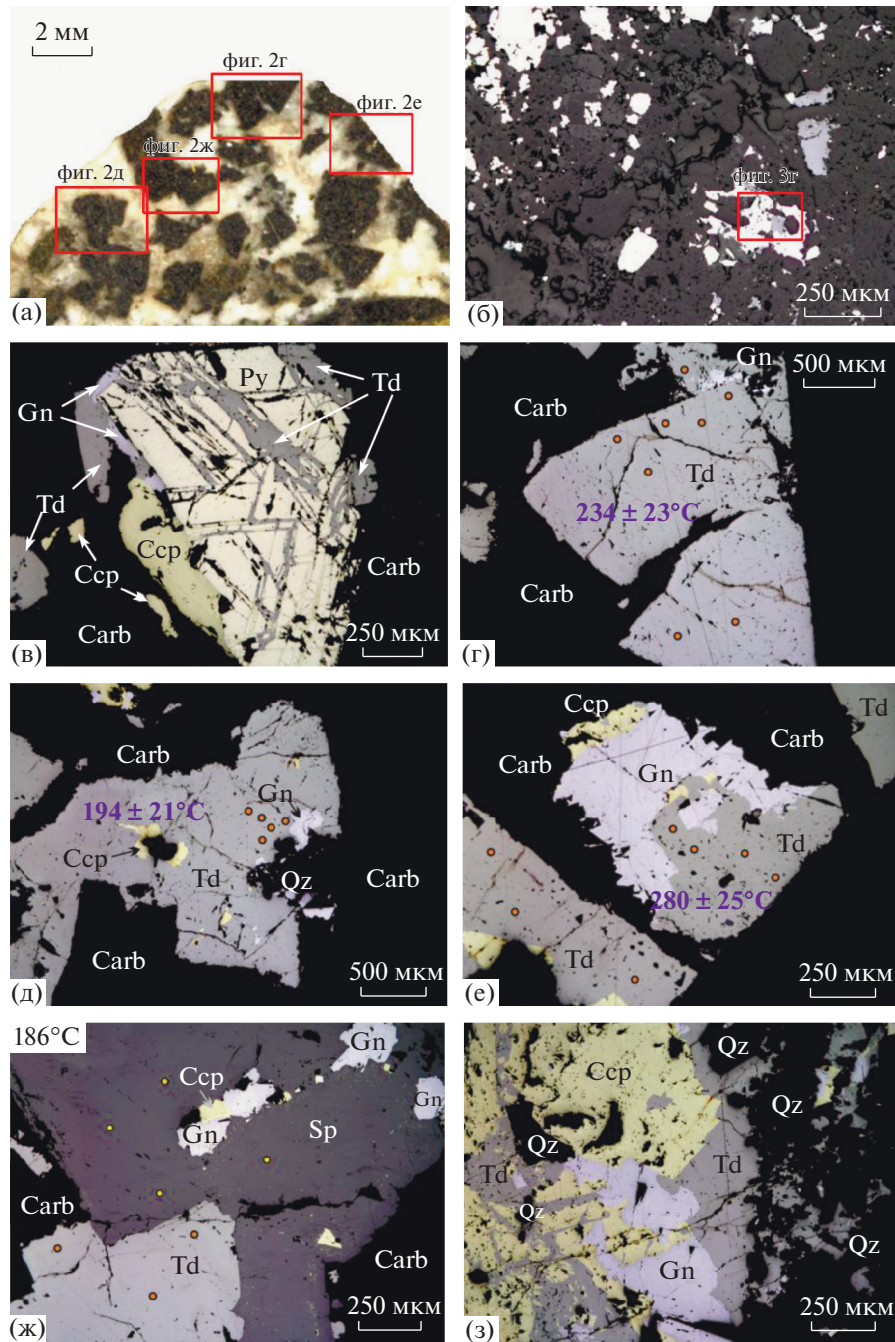
Химический состав тетраэдрита и сфалерита изучен с помощью рентгеноспектрального микроанализатора (РСМА) Camebax-microbeam (аналитик Н.Н. Кононова, ГЕОХИ РАН). Условия анализа: ток зонда – 30 нА, ускоряющее напряжение – 20 кВ, диаметр пучка зонда – 2–5 мкм.

По данным РСМА (51 анализ), тетраэдрит-(Zn) на месторождении Теремки содержит низкие концентрации Ag (0.5–0.9 мас. %) и Bi (до 1 мас. %): соотношения $Sb/(Sb + As) = 0.66–0.97$ и $Fe/(Fe + Zn) = 0.27–0.43$ (фиг. 4а). Между соотношениями $Sb/(Sb + As)$ и $Fe/(Fe + Zn)$ в тетраэдрите отмечается средняя отрицательная корреляция (коэффициент корреляции –0.6).

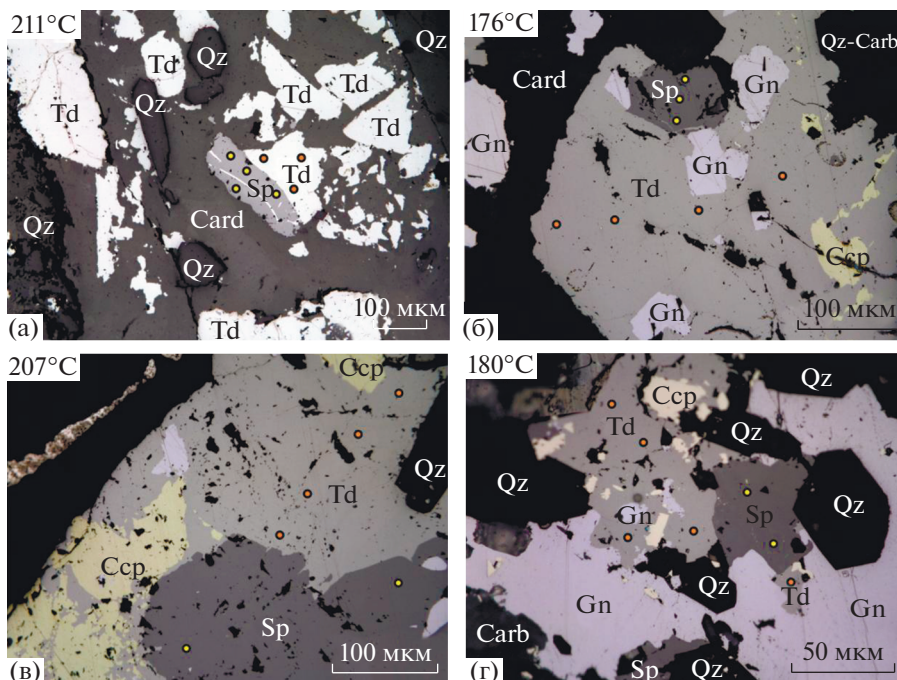
Сфалерит на месторождении (по данным 15 анализов) характеризуется низкими содержаниями Fe: 0.52–2.39 мас. % (0.9–4.2 мол. % FeS), концентрации Cu не превышают 0.56 мас. %, Cd 0.24–0.86 мас. %. Ранее сообщалось, что содержание Fe в

Фиг. 1. Географическая (а, б) и геологическая (в) схемы размещения золоторудного месторождения Теремки (Восточное Забайкалье). Геологическая схема составлена по материалам Дарасунской ГРЭ и с использованием материалов геологической съемки масштаба 1 : 200 000. 1 – метаморфических комплекс (PR₁): гнейсы и кристаллические сланцы; 2 – кручининский габбро-амфиболитовый комплекс (Pz₁k); 3–6 – крестовский комплекс (Pz₁kr): 3 – гранодиориты, диориты, 4 – граниты, плагиограниты, 5 – граниты, 6 – дайки лампрофиров; 7–8 – аманский комплекс (Ta): 7 – граниты, гранодиориты, диориты, монцодиориты, 8 – граниты, аляскиты; 9–13 – амуджиканский комплекс (J₃as): 9 – риолиты, фельзиты и их туфы и лавобрекчии, 10 – гранит-порфиры и плагиогранит-порфиры, 11 – дайки гранит-порфиры и плагиогранит-порфиры, 12 – дайки фельзитов, 13 – дайки лампрофиров; 14 – нерчуганский комплекс щелочных гранитов (J₃л); 15–16 – раннемеловой субвулканический комплекс (K₁): 15 – риолиты, фельзиты, перлиты, обсидианы, 16 – дайки фельзитов; 17 – аллювиальные отложения (Q_{IV}); 18 – тектонические нарушения: достоверные (а), предполагаемые (б); 19 – внемасштабные метасоматические тела: березитов (а), турмалинитов (б); 20 – контур месторождения.

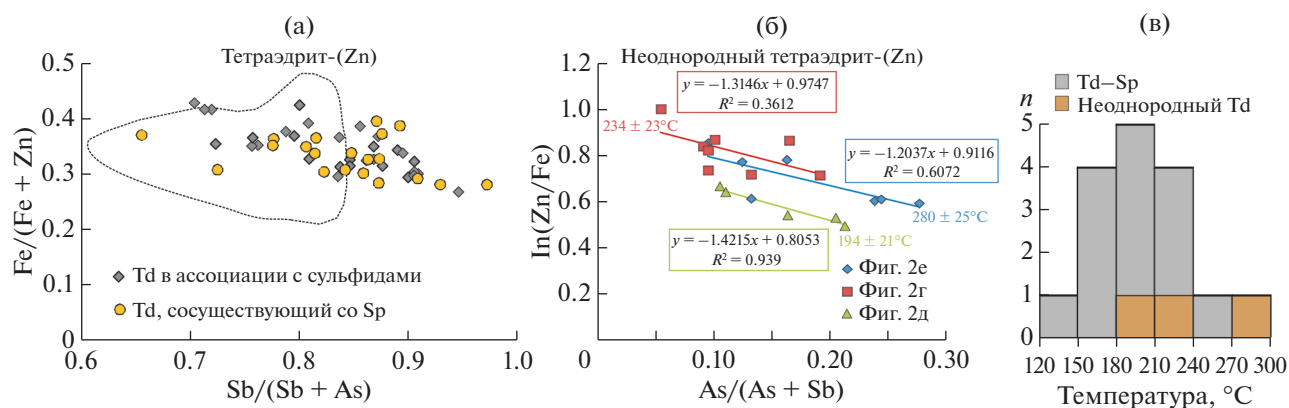




Фиг. 2. Взаимоотношения минералов в рудах Теремкинского месторождения. а – обломки сульфидов и их срастания (черное) сцементированы карбонатом (белое); б – агрегаты сульфидов образуют гнезда и вкрапленность (светлое) во вмещающих нерудных минералах (темно-серое); сульфиды совместно с карбонатом (Carb) выполняют интерстиции между зернами кварца (Qz); в – катаклазированный пирит (Py) сцементирован галенит-халькопирит-тетраэдритовым агрегатом; г – на крупнозернистый тетраэдрит (Td) нарастает галенит-тетраэдритовый агрегат; трещины в нем залечены карбонатом; д – агрегат тетраэдрита с включениями халькопирита (Csp) и галенита (Gn) в карбонате; е – зерна тетраэдрита и срастания тетраэдрита с галенитом и халькопиритом сцементированы карбонатом; ж – срастание тетраэдрита, сфалерита (Sp) и галенита. Галенит в срастании с халькопиритом образует цепочки выделений в сфалерите. Сфалерит на контактах с сульфидами и по периферии содержит эмульсионную вкрапленность халькопирита; з – галенит-халькопирит-тетраэдритовый агрегат, выполняющий интерстиции между зернами кварца. Тетраэдрит образует с халькопиритом как взаимные срастания с ровными границами, так и замещает его, образуя сеть прожилков. Здесь и далее: точками отмечены РСМА-анализы и указаны температуры, рассчитанные для сосуществующих тетраэдрита-(Zn) и сфалерита (по усредненным составам) и для неоднородного тетраэдрита-(Zn). Фотографии в отраженном свете.



Фиг. 3. Взаимоотношения сосуществующих тетраэдрита-(Zn) и сфалерита в рудах Теремкинского месторождения. а – обломки зерен тетраэдрита и срastания тетраэдрита со сфалеритом, кристаллы кварца сцементированы карбонатом; б – агрегат тетраэдрита с включениями сфалерита, галенита и халькопирита в карбонате; в – аллотриоморфнозернистое срastание тетраэдрита, сфалерита и халькопирита. Тетраэдрит замещает халькопирит, образуя в нем прожилки и корродируя по краям, проникает по контакту халькопирита и сфалерита, содержит включения галенита; г – сфалерит-галенит-халькопирит-тетраэдритовый агрегат с карбонатом выполняющий интерстиции между зернами кварца. Фотографии в отраженном свете.



Фиг. 4. Состав тетраэдрита-(Zn) (а, б) и гистограмма рассчитанных температур кристаллизации тетраэдрит-сфалеритового парагенезиса (в) Теремкинского месторождения. Пунктиром на фиг. 4а обозначена область составов блеклой руды, сосуществующей со сфалеритом, на месторождении Дарасун (Любимцева и др., 2018₂).

сфалерите варьирует от 1.74 до 8.2 мас. %, что соответствует 3.0–13.8 мол. % FeS (Прокофьев и др., 2004).

Сосуществующие тетраэдрит-(Zn) и сфалерит были найдены в образце из жилы № 2 (обр.2419шт82).

Состав тетраэдрита-(Zn) (мас. %): Cu 38.76–39.86, Ag 0.60–0.94, Zn 4.69–5.54, Fe 1.82–2.63, Sn 0.11–0.27, Cd до 0.14, Hg до 0.17, Sb 19.96–27.95, As 0.50–6.46, Bi 0.05–0.77, Te до 0.07, S 24.23–24.86, Se до 0.09; обобщенная формула

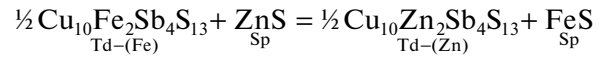
($\text{Cu}_{10.09-10.24}\text{Ag}_{0.09-0.14}$) $_{\Sigma(10.20-10.38)}$ ($\text{Zn}_{1.18-1.40}\text{Fe}_{0.54-0.78}\text{Sn}_{0.02-0.04}\text{Cd}_{0-0.02}\text{Hg}_{0-0.01}$) $_{\Sigma(1.95-2.02)}$ ($\text{Sb}_{2.68-3.83}\text{As}_{0.11-1.41}\text{Bi}_{0-0.06}\text{Te}_{0-0.01}$) $_{\Sigma(3.96-4.17)}$ ($\text{S}_{12.53-12.70}\text{Se}_{0-0.02}$) $_{\Sigma(12.53-12.70)}$; соотношения Sb/(Sb + As) 0.66–0.97 и Fe/(Fe + Zn) 0.28–0.40 (табл. 1, 2). Состав сфалерита (мас. %): Zn 64.36–65.51, Fe 0.88–1.43, Cu до 0.56, Cd 0.29–0.86, S 32.64–33.42; обобщенная формула ($\text{Zn}_{0.96-0.97}\text{Fe}_{0.02-0.03}\text{Cu}_{0-0.01}\text{Cd}_{0-0.01}$) $_{\Sigma(0.99-1.00)}$ $\text{S}_{1.00-1.01}$; железистость – 1.5–2.5 мол. % FeS.

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СФАЛЕРИТ-ТЕТРАЭДРИТОВЫХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ

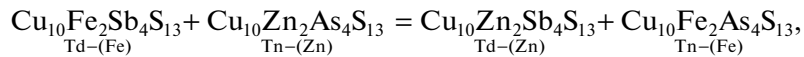
Описанные выше взаимоотношения тетраэдрита и сфалерита предполагают равновесные условия их кристаллизации, что позволяет использовать эту

пару минералов для определения температуры образования с помощью методов геотермометрии.

Температуры кристаллизации сосуществующих тетраэдрита-(Zn) и сфалерита рассчитаны по геотермометру (Sack, Loucks, 1985), в основе которого лежат данные распределения Fe и Zn между этими минералами и термодинамическая модель теннантит-тетраэдритового твердого раствора. Распределение Fe и Zn между сосуществующими блеклой рудой и сфалеритом характеризуется реакцией обмена Fe и Zn между тетраэдритом и сфалеритом:



и взаимной реакцией:



которые описывают изменение состава в изоморфной серии теннантит-тетраэдрита.

Температуры, рассчитанные по сфалерит-блеклорудному геотермометру (Sack, Loucks, 1985), находятся в диапазоне $(130-245) \pm 25^\circ\text{C}$, оценены для 5 участков, показанных на фиг. 2ж, 3. Из рассчитанных 13 значений температур: 8 – получены по анализам, выполненным на контактах сосуществующих зерен минералов ($130-245^\circ\text{C}$); 5 – по усредненных анализам составов сосуществующих зерен минералов на каждом участке ($175-210^\circ\text{C}$) (табл. 1).

Температуры кристаллизации неоднородного тетраэдрита-(Zn), сосуществующего со сфалеритом постоянного состава, рассчитаны по геотермометру, разработанному для блеклой руды с осцилляторной зональностью (Raabe, Sack, 1984). Применение этого геотермометра основано на “принципе локального равновесия” (Коржинский, 1973). Авторы этого геотермометра предполагают изотермальное отложение зональной блеклой руды и локальное равновесие относительно обмена Fe и Zn между водным раствором и каждой последовательной зоной роста блеклой руды, при которых сфалерит имеет постоянный состав, а отношение Fe/Zn в зоне роста обусловлено условиями осмотического равновесия обмена Fe и Zn.

Применение геотермометра (Raabe, Sack, 1984) к неоднородной блеклой руде предполагает постоянный состав сфалерита, сосуществующего с этой блеклой рудой. Поскольку содержание Fe в сфалерите в парагенезисе с тетраэдритом-(Zn) практически не варьирует (находится в диапазоне 1.5–2.5 мол. % FeS), следовательно, мы можем предположить, что достигалось осмотическое равновесие обмена Fe и Zn между тетраэдритом-(Zn) и сфалеритом.

Температура рассчитывалась по уравнению:

$$T(\text{K}) = -((664 \pm 30)/m),$$

где $T(\text{K})$ – температура Кельвина, m – наклон кривой, определенный из точек составов зональной блеклой руды, нанесенных на график As/(As + Sb) против $\ln(\text{Zn}/\text{Fe})$.

Температуры по неоднородному тетраэдриту-(Zn) были оценены для трех участков, представленных на фиг. 2г–е, и лежат в интервале $195-280^\circ\text{C}$ (табл. 2). На фиг. 4б показаны вариации состава тетраэдрита-(Zn) и определен наклон прямой линии регрессии для каждого участка.

Фугитивность серы оценена с использованием данных о рассчитанных температурах кристаллизации сосуществующих сфалерита и тетраэдрита-(Zn) и содержаниях FeS в сфалерите, ассоциирующем с сульфидами железа, последнее из которых является функцией температуры, давления и активности серы (Barton, Toulmin, 1966; Scott, Barnes, 1971; Добровольская и др., 1991). Ее величина вычислялась по уравнению (Lusk, Calder, 2004):

$$\begin{aligned} \lg fS_2 = & 11.01 - 9.49(1000/\text{K}) + \\ & + [0.187 - 0.252(1000/\text{K})] (\text{FeS}^{\text{Sp}}) + \\ & + [0.35 - 0.2(1000/\text{K})] (\text{CuS}^{\text{Sp}}), \end{aligned}$$

где K – температура Кельвина; FeS^{Sp} и CuS^{Sp} – соответственно мольные доли FeS и CuS в сфалерите.

Рассчитанная по уравнению (Lusk, Calder, 2004) фугитивность серы при отложении сфалерит-тетраэдритовых парагенезисов попадает в область значений $10^{-13.0}-10^{-8.1}$.

Таблица 1. Результаты рентгеноспектральных микроанализов сосуществующих тетраэдрита- (Zn) и сфалерита и температуры и фугитивности серы при их отложении на месторождении Теремки

№ п/п	Ф	Мин.	n	Концентрация, мас. %											Тетраэдрит		Сфалерит, мол. %		T, °C	lg/S ₂
				Ag	Cu	Zn	Fe	Sn	Cd	Sb	As	Bi	S	Сумма	Sb/(As + Sb)	Fe/(Zn + Fe)	FeS	CuS		
1		Td	4	0.62-0.72 0.66	38.92-39.60 39.23	5.03-5.54 5.32	1.85-2.46 2.12	0.17-0.27 0.22	н.п.о.	24.15-27.47 25.72	1.29-4.28 2.67	0.05-0.77 0.31	24.43-24.71 24.59	100.82	0.78-0.93 0.86	0.28-0.36 0.32	2.12-2.22 2.16	0.09-0.86 0.33	211	-9.3
2		Sp	4	0.06-0.56 0.21	64.36-65.08 64.89	1.21-1.27 1.24	1.88	0.22	0.51-0.56 0.54	26.38	2.37	0.18	32.64-32.88 32.73	99.61	0.87	0.28	2.17	0.09	241	-8.1
3		Td	1	0.64	38.92	5.54	1.88	0.22	н.п.о.	26.38	2.37	0.18	24.51	100.64	0.87	0.28	2.17	0.09	241	-8.1
4	3a	Sp	1	0.06	0.06	65.07	1.24	0.54	0.54	26.38	2.37	0.18	32.72	99.69	0.87	0.28	2.17	0.09	241	-8.1
5		Td	1	0.72	39.16	5.19	2.27	0.17	н.п.о.	24.86	2.75	0.77	24.43	100.32	0.85	0.34	2.14	0.17	192	-10.2
6		Sp	1	0.11	0.11	65.06	1.22	0.55	0.55	24.86	2.75	0.77	32.64	99.64	0.85	0.34	2.14	0.17	192	-10.2
7		Td	1	0.62	39.60	5.03	2.46	0.27	н.п.о.	24.15	4.28	0.05	24.71	101.24	0.78	0.36	2.12	0.86	190	-10.3
8		Sp	1	0.56	0.56	64.36	1.21	0.56	0.56	24.15	4.28	0.05	32.66	99.42	0.78	0.36	2.12	0.86	190	-10.3
9		Td	4	0.60-0.81 0.70	38.96-39.39 39.23	4.69-4.97 4.81	2.45-2.63 2.53	0.19-0.22 0.21	н.п.о.-0.11 н.п.о.	24.82-26.61 25.80	1.98-3.46 2.52	0.21-0.57 0.32	24.40-24.59 24.49	100.60	0.82-0.89 0.86	0.37-0.40 0.38	2.24-2.49 2.40	0.06-0.14 0.09	176	-11.0
10	3б	Sp	3	0.04-0.09 0.06	64.91-65.28 65.06	1.28-1.43 1.38	1.28-1.43 1.38	0.33-0.45 0.41	0.33-0.45 0.41	24.82-26.61 25.80	1.98-3.46 2.52	0.21-0.57 0.32	32.68-33.16 32.94	99.85	0.82-0.89 0.86	0.37-0.40 0.38	2.24-2.49 2.40	0.06-0.14 0.09	176	-11.0
11		Td	1	0.81	38.96	4.82	2.45	0.22	н.п.о.	25.75	2.25	0.57	24.47	100.30	0.88	0.37	2.24	0.06	167	-11.4
12		Sp	1	0.04	0.04	64.99	1.28	0.45	0.45	25.75	2.25	0.57	32.99	99.75	0.88	0.37	2.24	0.06	167	-11.4
13		Td	4	0.69-0.94 0.85	39.03-39.86 39.41	5.04-5.49 5.35	1.82-2.34 2.04	0.11-0.22 0.18	н.п.о.	22.34-27.95 24.95	0.50-5.22 2.86	0.15-0.46 0.33	24.23-24.86 24.59	100.63	0.73-0.97 0.84	0.28-0.35 0.31	1.93-2.02 1.97	0-0.27 0.14	207	-9.4
14	3б	Sp	2	н.п.о.-0.18 0.09	65.37-65.51 65.44	1.11-1.17 1.14	1.11-1.17 1.14	0.63-0.86 0.75	0.63-0.86 0.75	22.34-27.95 24.95	0.50-5.22 2.86	0.15-0.46 0.33	33.11-33.42 33.27	100.68	0.73-0.97 0.84	0.28-0.35 0.31	1.93-2.02 1.97	0-0.27 0.14	207	-9.4
15		Td	1	0.69	39.86	5.49	2.09	0.11	н.п.о.	22.34	5.22	0.15	24.84	100.88	0.72	0.31	1.93	0.27	233	-8.3
16		Sp	1	0.18	0.18	65.37	1.11	0.63	0.63	22.34	5.22	0.15	33.11	100.43	0.72	0.31	1.93	0.27	233	-8.3

Таблица 1. Продолжение

№ п/п	Фиг.	Мин.	n	Концентрация, мас. %											Тетраэдрит		Сфалерит, мол. %		T, °C	lg/S ₂
				Ag	Cu	Zn	Fe	Sn	Cd	Sb	As	Bi	S	Сумма	Sb/(As + Sp)	Fe/(Zn + Fe)	FeS	CuS		
17		Td	5	0.61–0.92 0.79	38.76–39.44 39.21	4.93–5.43 5.19	2.03–2.51 2.24	0.18–0.23 0.21	н.п.о.–0.14 н.п.о.	19.96–25.94 24.12	2.32–6.46 3.63	0.19–0.57 0.42	24.34–24.84 24.58	100.52	0.65–0.83 0.80	0.30–0.37 0.34			180	–10.6
18		Sp	2		0.07–0.31 0.19	65.08–65.45 65.27	0.88–1.23 1.06		0.29–0.31 0.31				33.37–33.39 0.38	100.20			1.53–2.13 1.83	0.11–0.47 0.29		
19		Td	1	0.61	39.32	4.98	2.51	0.18	н.п.о.	19.96	6.46	0.54	24.84	99.40	0.66	0.37			161	–11.4
20		Sp	1		0.07	65.45	0.88		0.32				33.39	100.11			1.53	0.11		
21		Td	1	0.84	39.08	5.43	2.03	0.22	0.14	24.7	3.28	0.57	24.77	101.06	0.82	0.30			233	–8.4
22		Sp	1		0.31	65.08	1.23		0.29				33.37	100.28			2.13	0.47		
23		Td	3	0.64–0.73 0.70	39.39–39.64 39.51	5.14–5.35 5.27	1.98–2.24 2.08	0.19–0.22 0.20	н.п.о.–0.12 н.п.о.	24.83–25.95 25.44	2.63–3.49 3.02	0.22–0.60 0.35	24.57–24.63 24.60	101.17	0.81–0.86 0.84	0.30–0.34 0.32			186	–10.3
24		Sp	4		0.05–0.08 0.07	63.26–65.69 64.96	0.52–2.39 1.04		н.п.о.–0.30 0.21				32.32–32.53 32.39	98.67			0.92–4.23 1.84	0.08–0.12 0.11		
25		Td	1	0.72	39.64	5.35	1.98	0.22	0.12	25.95	2.63	0.22	24.63	101.46	0.86	0.30			129	–13.2
26		Sp	1		0.08	65.39	0.70		н.п.о.				32.53	98.77			1.24	0.12		

Примечание. Td – тетраэдрит-(Zn), Sp – сфалерит, n – количество анализов, н.п.о. – ниже предела обнаружения (<2σ). Содержание (мас. %): Se 0.09 (ан. 15), Te 0.07 (ан. 7). В числителе – диапазон составов, в знаменателе – среднее значение. Усредненные анализы (ан. 1–2, 9–10, 13–14, 17–18, 23–24), остальные – анализы на кон- тактах сосуществующих зерен минералов.

Таблица 2. Результаты рентгеноспектральных микроанализов неоднородного тетраэдрита-(Zn) месторождения Теремки

№ п/п	Фиг.	n	Концентрация, мас. %											Fe/(Zn + Fe)	As/(As + Sb)	ln(Zn/Fe)	m	T, °C
			Ag	Cu	Zn	Fe	Sn	Sb	As	Bi	S	Сумма						
1			0.69	39.44	5.38	1.95	0.19	26.61	1.72	0.33	24.39	100.70	0.30	0.10	0.86			
2			0.63	39.98	5.05	2.35	0.23	23.50	4.52	0.18	24.96	101.48	0.35	0.24	0.61			
3			0.64	39.52	5.28	2.06	0.20	25.52	3.05	н.п.о.	24.34	100.61	0.31	0.16	0.78			
4	2e	7	0.55	39.47	5.21	2.05	0.20	25.80	2.25	0.45	24.18	100.25	0.32	0.12	0.78	-1.20	280 ± 25	
5			0.77	40.14	5.08	2.39	0.07	22.66	5.34	0.28	25.11	101.84	0.36	0.28	0.60			
6			0.63	39.26	4.96	2.29	0.13	25.70	2.41	0.42	24.42	100.29	0.35	0.13	0.62			
7			0.68	39.70	5.04	2.33	0.20	23.01	4.56	0.35	24.79	100.87	0.35	0.24	0.61			
8			0.65	38.96	5.33	1.96	0.19	26.30	1.62	0.55	24.45	100.01	0.30	0.09	0.84			
9			0.65	39.32	5.17	2.15	0.15	26.10	2.44	0.27	24.47	100.72	0.33	0.13	0.72			
10			0.64	39.29	5.34	2.00	0.24	26.21	1.69	0.61	24.39	100.52	0.30	0.09	0.82			
11			0.66	39.24	5.38	1.92	0.22	26.48	1.82	0.60	24.44	100.76	0.29	0.10	0.87			
12	2г	8	0.48	38.91	5.59	1.75	0.22	27.33	0.96	0.71	23.99	99.94	0.27	0.05	1.00	-1.31	234 ± 23	
13			0.53	39.66	5.51	1.98	0.19	25.54	3.10	0.07	24.69	101.27	0.30	0.16	0.87			
14			0.61	39.63	5.20	2.17	0.20	24.87	3.62	0.21	24.88	101.39	0.33	0.19	0.72			
15			0.72	39.02	5.17	2.11	0.23	27.05	1.74	0.13	24.43	100.60	0.32	0.09	0.74			
16			0.68	39.91	4.95	2.48	0.17	24.50	3.89	0.23	24.92	101.73	0.37	0.21	0.53			
17			0.66	39.62	5.09	2.28	0.13	26.69	2.03	0.22	24.57	101.29	0.34	0.11	0.65			
18	2д	5	0.72	39.47	5.08	2.22	0.18	26.31	1.90	0.81	24.28	100.97	0.34	0.11	0.67	-1.42	194 ± 21	
19			0.71	39.65	4.87	2.41	0.19	24.96	3.00	0.50	24.84	101.13	0.37	0.16	0.55			
20			0.78	39.64	4.92	2.55	0.23	24.03	3.99	0.39	25.02	101.55	0.38	0.21	0.50			

Примечание. n – количество анализов, m – наклон кривой, определенный из точек составов зонального тетраэдрита-(Zn), нанесенных на график As/(As + Sb) против ln(Zn/Fe), н.п.о. – ниже предела обнаружения (<2σ). Содержание (мас. %): Se 0.08 (ан. 2), Hg 0.21 (ан. 7) и 0.11 (ан. 10), Te 0.09 (ан. 4) и 0.07 (ан. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ

Сообщалось, что рудообразующий флюид Теремкинского месторождения близок по составу и физико-химическим параметрам к флюиду месторождения Дарасун (Прокофьев и др., 2004 и ссылки там), что также отражается в схожести составов минералов руд. Сходство обнаружено также и в составах блеклой руды и сфалерита на этих месторождениях. Железистость сфалерита на месторождении Теремки варьирует от 0.52 до 8.20 мас. %, что соответствует 0.9–13.8 мол. % FeS (Прокофьев и др., 2004 и данная работа), на Дарасуне – от 0.45 до 4.71 мас. % (0.8–8.2 мол. % FeS) (Любимцева и др., 2018₂ и ссылки там). Состав блеклой руды на месторождениях несколько отличается. На месторождении Дарасун установлен почти полный диапазон составов твердого раствора теннантит-тетраэдрита с непрерывным изоморфизмом между Sb и As и между Fe и Zn (Любимцева и др., 2018₁). На месторождении Теремки был обнаружен только тетраэдрит-(Zn). Однако в блеклых рудах обоих месторождений между соотношениями Sb/(Sb + As) и Fe/(Fe + Zn) проявляется отрицательная корреляция.

Составы сосуществующих тетраэдрита и сфалерита на этих месторождениях также похожи. Железистость сфалерита на месторождении Теремки 0.88–1.43 мас. % (1.5–2.5 мол. % FeS), на Дарасуне – 0.79–2.80 мас. % (1.4–4.9 мол. % FeS) (Любимцева и др., 2018₂). Тетраэдрит на месторождении Теремки попадает в область составов тетраэдрита месторождения Дарасун (фиг. 4а), но имеет более сурьмянистые составы, сосуществующие со сфалеритом. На месторождении Теремки соотношение Sb/(Sb + As) в тетраэдрите варьирует от 0.66 до 0.97, на Дарасуне – от 0.70 до 0.84 (Любимцева и др., 2018₂). Соотношения Fe/(Fe + Zn) в тетраэдрите схожи: на Теремках – 0.28–0.40, на Дарасуне – 0.20–0.48 (Любимцева и др., 2018₂).

Результаты данного исследования показывают, что формирование сфалерит-тетраэдритовых парагенезисов на золоторудном месторождении Теремки происходило при температуре от 130 до 280°C (фиг. 4в) и фугитивностях серы $10^{-13.0}$ – $10^{-8.1}$. Полученные данные хорошо согласуются с температурами гомогенизации (216–298°C) флюидных включений в кварце продуктивной стадии месторождения Теремки (Прокофьев и др., 2004; Prokofiev et al., 2010). Более низкие температуры, рассчитанные для сфалерит-тетраэдритовых агрегатов, можно объяснить более широкой областью кристаллизации ассоциации тетраэдрита со сфалеритом и карбонатом, но без кварца. Фугитивность серы, рассчитанная в представленной работе, сходна с фугитивностью (10^{-15} – 10^{-10}), определенной по температурам гомогенизации включе-

ний в продуктивном кварце в ассоциации со сфалеритом (Прокофьев и др., 2004).

Температуры кристаллизации сфалерит-тетраэдритовых парагенезисов на месторождении Теремки (130 до 280°C) ниже, чем температуры образования этих парагенезисов на месторождении Дарасун (175–355°C) (Любимцева и др., 2018₂), и больше схожи с температурами формирования бурнонит-зелигманит-блеклорудных парагенезисов (100–250°C) месторождения Дарасун (Любимцева и др., 2019). Фугитивность серы при формировании сфалерит-тетраэдритовых парагенезисов на месторождении Теремки ($10^{-13.0}$ – $10^{-8.1}$) в целом близка к фугитивности серы на месторождении Дарасун ($10^{-11.0}$ – $10^{-5.1}$) (Любимцева и др., 2018₂), но отличается более низкими значениями.

ВЫВОДЫ

1. Выделена парагенетическая ассоциация тетраэдрита-(Zn) и сфалерита и установлены сосуществующие составы этой пары минералов на золоторудном месторождении Теремки. В тетраэдрите соотношение Sb/(Sb + As) варьирует от 0.66 до 0.97, Fe/(Fe + Zn) – от 0.28 до 0.40, между соотношениями Sb/(Sb + As) и Fe/(Fe + Zn) установлена отрицательная корреляция. Содержание железа в сфалерите изменяется от 0.88 до 1.43 мас. % (1.5–2.5 мол. % FeS).

2. Оценены условия образования сфалерит-тетраэдритовых парагенезисов на месторождении: формирование сосуществующих тетраэдрита-(Zn) и сфалерита происходило при температуре 130–280°C и фугитивности серы $10^{-13.2}$ – $10^{-8.1}$.

3. Проведено сравнение составов минералов (блеклой руды и сфалерита) и физико-химических параметров формирования (температуры и фугитивности серы) изученного объекта с месторождением Дарасун. Показано сходство составов блеклой руды и сфалерита на этих месторождениях и близость физико-химических параметров формирования продуктивных ассоциаций рудных жил.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны анонимным рецензентам за конструктивные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования проведены при финансовой поддержке госзадания 121041500220-0 “Структурно-химические неоднородности и парагенетические ассоциации минералов как отражение процессов петро- и рудогенеза”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Добровольская М.Г., Бортников Н.С., Наумов В.Б.* Железистость сфалерита как показатель режима серы при формировании рудных месторождений // Геология руд. месторождений. 1991. № 5. С. 80–93.
- Коржинский Д.С.* Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М.: Наука, 1973.
- Любимцева Н.Г., Бортников Н.С., Борисовский С.Е., Прокофьев В.Ю., Викентьева О.В.* Блеклая руда и сфалерит золоторудного месторождения Дарасун (Восточное Забайкалье, Россия). Часть 1: Минеральные ассоциации и сростания, химический состав и его эволюция // Геология руд. месторождений. 2018₁. Т. 60. № 2. С. 109–140.
- Любимцева Н.Г., Бортников Н.С., Борисовский С.Е., Прокофьев В.Ю., Викентьева О.В.* Блеклая руда и сфалерит золоторудного месторождения Дарасун (Восточное Забайкалье, Россия). Часть 2: Распределение железа и цинка, флюидные включения, условия образования // Геология руд. месторождений. 2018₂. Т. 60. № 3. С. 251–273.
- Любимцева Н.Г., Бортников Н.С., Борисовский С.Е.* Сосуществующие бурнонит-зелигманитовый и теннантит-тетраэдритовый твердые растворы на золоторудном месторождении Дарасун (Восточное Забайкалье, Россия): оценка температур минералообразования // Геология руд. месторождений. 2019. Т. 61. № 3. С. 85–104.
- Прокофьев В.Ю., Зорина Л.Д., Бакшеев И.А., Плотинская О.Ю., Кудрявцева О.Е., Ишков Ю.М.* Состав минералов и условия формирования руд Теремкинского месторождения золота (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология руд. месторождений. 2004. Т. 46. № 5. С. 385–406.
- Сэк Р.О.* Термохимия блеклых руд: несмесимость внутри куба составов $(\text{Cu,Ag})_{10}(\text{Fe,Zn})_2(\text{Sb,As})_4\text{S}_{13}$ // Петрология. 2017. Т. 25. № 5. С. 504–522.
- Тимофеевский Д.А.* Геология и минералогия Дарасунского золоторудного региона. М.: Недра, 1972.
- Barton P.B., Toulmin P.* Phase relations involving sphalerite in the Fe–Zn–S system // Econ. Geol. 1966. V. 61. № 5. P. 815–849.
- Lusk J., Calder B.O.E.* The composition of sphalerite and associated sulfides in reactions of the Cu–Fe–Zn–S, Fe–Zn–S and Cu–Fe–S systems at 1 bar and temperatures between 250 and 535°C // Chem. Geol. 2004. V. 203. № 3. P. 319–345.
- Prokofiev V.Y., Garofalo P.S., Bortnikov N.S., Kovalenker V.A., Zorina L.D., Grichuk D.V., Selektor S.L.* Fluid inclusion constraints on the genesis of gold in the Darasun district (Eastern Transbaikalia), Russia // Econ. Geol. 2010. V. 105. № 2. P. 395–416.
- Raabe K.C., Sack R.O.* Growth zoning in tetrahedrite-tennantite from the Hock Hocking mine, Alma, Colorado // Can. Mineral. 1984. V. 22. P. 577–584.
- Sack R.O., Loucks R.R.* Thermodynamic properties of tetrahedrite-tennantite: constraints on the interdependence of the $\text{Ag} \leftrightarrow \text{Cu}$, $\text{Fe} \leftrightarrow \text{Zn}$, $\text{Cu} \leftrightarrow \text{Fe}$, and $\text{As} \leftrightarrow \text{Sb}$ exchange reactions // Am. Mineral. 1985. V. 70. № 11–12. P. 1270–1289.
- Scott S.D., Barnes H.L.* Sphalerite geothermometry and geobarometry // Econ. Geol. 1971. V. 66. P. 653–669.