

Масленников В. В., Сафина Н. П., Масленникова С. П., Ярославцева Н. С. О разделении изотопов серы в гидротермально-гипергенных системах древних «черных курильщиков» // *Металлогения древних и современных океанов–2010*. Миасс: ИМин УрО РАН, 2010. С. 116–119.

Масленников В. В., Целуйко А. С., Аюпова Н. Р., Сафина Н. П., Мелекесцева И. Ю., Третьяков Г. А., Ярославцева Н. С. Минералогия, микропохимия и типохимизм сульфидных конкреций колчеданных месторождений // *Уральская минералогическая школа–2018*. Екатеринбург: Альфа Принт, 2018. С. 108–112.

Сафина Н. П., Масленников В. В., Артемьев Д. А., Архиреева Н. С. Микропохимия и типохимизм пиритовой конкреции из углеродистых алевропелитов Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал) // *Минералогия*. 2017. Т. 3. № 4. С. 22–36.

Целуйко А. С., Масленников В. В., Артемьев Д. А. Микропохимия конкреций пирита в кремнистых алевропелитах Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал) по данным ЛА-ИСП-МС // *Литосфера*. 2018. № 4. С. 621–641.

Целуйко А. С., Масленников В. В., Аюпова Н. Р., Садыков С. А. Изотопный состав серы продуктов разрушения палеокурильщиков Юбилейного медноколчеданного месторождения // *Минералогия*. 2015. № 4. С. 103–111.

А. В. Шахтиярова^{1,2}, Н. Г. Любимцева¹, Л. О. Магазина¹

*¹ – Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва
shakhtiyarova@bk.ru*

² – Российский университет дружбы народов, г. Москва

**Сосуществующие блеклая руда и сфалерит
Ново-Учалинского колчеданного месторождения (Южный Урал):
химический состав и условия образования
(научный руководитель д.г.-м.н. И. В. Викентьев)**

Целью работы является изучение химического состава сосуществующих блеклой руды и сфалерита Ново-Учалинского медно-цинкового колчеданного месторождения (Южный Урал) и определение условий их образования. Ново-Учалинское месторождение находится в северной части Магнитогорской мегазоны в 2 км южнее Учалинского месторождения, в строении которого участвуют вулканы среднедевонского возраста карамалыташской (D_{2e} *kr*) и улутаусской свиты (D_{2gv} *ul*) [Маслов, Артющкова, 2000]. Рудная залежь месторождения приурочена к контакту пород кислого и основного состава карамалыташской свиты (D_{2e} *kr*) и сверху перекрыта мощной толщей базальтов. Она состоит из двух сближенных рудных тел – линз сложного строения, невыдержанных по падению, простиранию и мощности [Пшеничный и др., 1999]. Пирит, халькопирит и сфалерит являются главными рудными минералами месторождения. Преобладающие нерудные минералы – кварц, серицит и кальцит. В отдельных блоках встречается барит. Блеклая руда относится к наиболее часто встречаемым второстепенным минералам, ее содержание в рудах составляет до 0.2–0.5 об. %.

На месторождении установлено пять стадий рудоотложения и несколько парагенетических минеральных ассоциаций [Минеральные..., 1994]. Блеклая руда и сфалерит кристаллизовались на всем протяжении колчеданного рудообразования, но основное их количество отложилось в третью стадию. Агрегаты сфалерита, галенита,

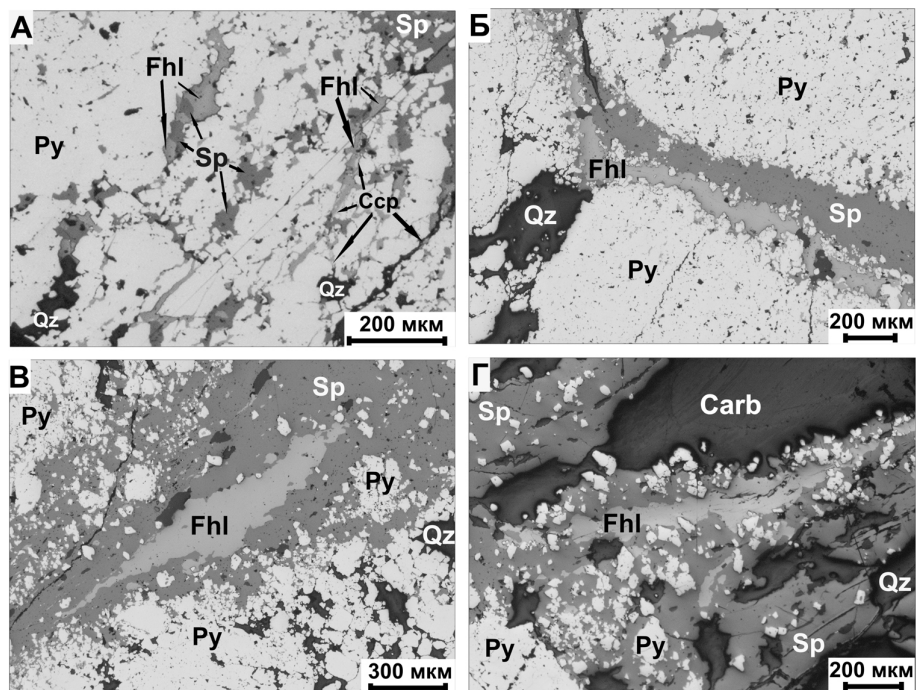


Рис. 1. Срастания пирита, сфалерита и блеклой руды в неяснополосчатой брекчиевидной медно-цинковой руде Ново-Учалинского месторождения: а) халькопирит-сфалерит-блекловорудные прожилки в интерстициях пирита; б) сфалерит-блекловорудный прожилок с включениями мелкокристаллического пирита; в) включение блеклой руды удлиненной формы и мелких кристаллов пирита в агрегате сфалерита; г) интерстициальный агрегат сфалерита и блеклой руды, насыщенный вкрапленностью пирита.

Отраженный свет. Py – пирит, Sp – сфалерит, Fhl – блеклая руда, Ccp – халькопирит, Qz – кварц, Carb – карбонат.

блеклой руды и барита цементируют более ранний пирит и халькопирит и образуют в них прожилки.

Нами изучены образцы руд главного рудного тела № 1 из скважины 2541-1 (глубина по падению 1054.5 м, горизонт ~420 м). В образцах выделены две ассоциации блеклой руды и сфалерита: ранняя (с халькопиритом) и поздняя (без халькопирита). Тончайшие прожилки (местами с раздувами) сфалерита, блеклой руды и халькопирита ранней ассоциации пересекают кристаллический пирит и заполняют межзерновое пространство (рис. 1а). Сфалерит поздней ассоциации цементирует мелкозернистый пирит, содержит разнообразные включения блеклой руды и образует тонкие короткие прожилки мощностью до 1.5 мм. И в прожилках, и по границе с ним развиты скопления мелкозернистого пирита. Большая часть блеклой руды располагается в прожилках сфалерита, где тяготеет к зальбандам (рис. 1б) и осевым частям (рис. 1в) или образует скопления (рис. 1г), которые ориентированы вдоль простирания прожилка. Взаимоотношения блеклой руды и сфалерита в обеих ассоциациях, а именно, ровные границы и отсутствие признаков замещения, указывают на близкое время кристаллизации этих минералов, вероятно, в равновесных условиях.

Химический состав блеклой руды характеризуется следующими содержаниями элементов (мас. %): Cu 40.05–43.27, Zn 5.51–8.02, Fe 0.97–2.98, Sb 2.76–4.68, As 16.37–18.87, S 26.39–28.65, который соответствует формуле $Cu_{9.62-10.23}(Zn_{1.27-1.88}Fe_{0.27-0.82})_{1.89-2.43}(Sb_{0.34-0.58}As_{3.30-3.79})_{3.80-4.30}S_{12.60-13.31}$ (рассчитано на 29 атомов) (табл.). Блеклая руда однородна и представлена Zn-теннантитом¹ с отношениями Sb/(Sb+As) 0.08–0.15 и Fe/(Fe+Zn) 0.12–0.39 (рис. 2а). Результаты совпадают с таковыми, полученными ранее [Пшеничный, Рыкус, 2001]. Крайние мышьяковистый теннантит и сурьмянистый тетраэдрит на Ново–Учалинском месторождении встречены не были [Пшеничный, Рыкус, 2001]. Для блеклой руды описана обратная зависимость между соотношениями Sb/(Sb+As) и Fe/(Fe+Zn) [Пшеничный, Рыкус, 2001], что не наблюдается в изученных образцах (рис. 2а).

Сфалерит характеризуется следующим составом (мас. %): Zn 64.94–67.95, Fe до 1.44 (до 2.54 мол. % FeS), S 31.52–34.00, и рассчитывается на формулу $(Zn_{0.98-1.01}Fe_{0-0.03})_{0.99-1.02}S_{0.98-1.01}$ (см. табл.).

Блеклая руда на месторождении встречается в одном парагенезисе со сфалеритом, что позволяет нам использовать геотермометр, предложенный [Sack, Loucks, 1985]. Этот геотермометр основан на том, что железистость блеклой руды (соотношение $Fe/(Fe+Zn)^{Fhl}$) находится в прямой зависимости от железистости сфалерита (содержание FeS^{Sp}), которое, в свою очередь, имеет положительную корреляцию с температурой кристаллизации (см. рис. 2б). Диапазон рассчитанных температур составил 116–418 °C (± 20 °C) (см. табл., рис. 2б). Для ранней ассоциации

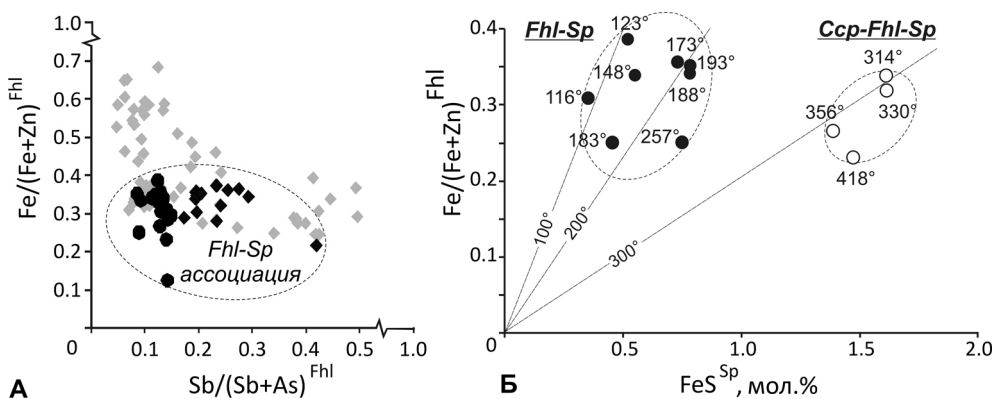


Рис. 2. Вариации соотношений Sb/(Sb+As) и Fe/(Fe+Zn) в блеклой руде (а) и зависимость между железистостью блеклой руды и сфалерита (б) из сфалерит-блеклорудной ассоциации Ново-Учалинского месторождения: а) ромбы – данные [Пшеничный, Рыкус, 2001], круги – данная работа, черные круги – составы блеклой руды из сфалерит-блеклорудной ассоциации; б) пустые символы – сосуществующие составы минералов из ранней халькопирит-сфалерит-блеклорудной ассоциации, залитые символы – из сфалерит-блеклорудной ассоциации, цифры – рассчитанные температуры, линии – изотермы.

¹ Минеральный вид блеклой руды «Zn-теннантит» назван по преобладающему изоморфному металлу и полуметаллу – Zn и As, соответственно.

Химический состав блеклой руды (Zn-Tn) и сфалерита (Sp),

№ пары	Минерал	№ ан.	Содержание, мас. %						Сумма
			Cu	Zn	Fe	Sb	As	S	
1	Zn-Tn	1	41.70	5.88	2.72	2.84	18.87	27.44	99.45
	Sp	2		66.63	0.45			33.15	100.23
2	Zn-Tn	3	43.04	6.08	2.87	4.06	17.01	27.42	100.48
	Sp	4		67.07	0.42			32.84	100.33
3	Zn-Tn	5	41.47	5.55	2.98	4.20	18.49	26.39	99.08
	Sp	6		67.39	0.30			33.15	100.84
4	Sp	7		67.80	0.26			32.26	100.89
	Zn-Tn	8	42.14	6.15	1.75	2.76	17.57	28.05	98.42
5	Sp	9		67.44	0.43			32.72	100.59
6	Zn-Tn	10	42.46	6.38	2.80	4.32	17.28	28.65	101.89
	Sp	11		67.50	0.32			33.72	101.54
7	Zn-Tn	12	41.53	6.04	2.67	4.18	17.48	27.09	98.99
	Sp	13		66.76	0.44			31.66	98.86
8	Zn-Tn	14	41.14	6.66	2.54	4.39	16.65	27.28	98.66
	Sp	15		66.44	0.20			32.69	99.33
9	Zn-Tn	16	41.94	6.29	2.77	3.81	18.40	27.73	100.94
	Sp	17		67.28	0.94			33.46	101.68
10	Zn-Tn	18	40.86	7.16	2.87	4.00	16.37	27.69	98.95
11	Zn-Tn	19	40.87	6.81	1.75	4.53	17.29	27.58	98.83
	Sp	20		67.34	0.85			32.79	100.98
12	Zn-Tn	21	40.05	7.62	2.36	4.01	16.96	27.15	98.63
	Sp	22		65.55	0.78			31.93	98.26

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории кристаллохимии минералов ИГЕМ РАН (аналитик Л. О. Магазина) на сканирующем электронном микроскопе (JSM-5610LV), оснащённом энергодисперсионным спектрометром Oxford-INCA-450 (Великобритания), по стандартной методике с использованием пользовательских эталонов с калибровкой по кобальту при ускоряющем напряжении 25 kV и угле отбора излучения – 30°, без приведения к 100 %.

(с халькопиритом) температуры оказались выше (314–418 °C), чем для поздней (116–257 °C). Используя данные о содержании FeS в сфалерите и рассчитанных температурах кристаллизации сосуществующих сфалерита и блеклой руды была оценена соответствующая фугитивность серы $fS_2 = 10^{-2.7}$ до $10^{-13.4}$ (см. табл.) по уравнению [Lusk, Calder, 2004].

Т а б л и ц а

температура и фугитивность серы при их сокристаллизации

№ пары	Формула	Sb/ (Sb+As) ^{Fhl}	Fe/ (Zn+Fe) ^{Fhl}	FeS ^{Sp} , мол. %	T, °C	logf _{S2}
1	Cu _{9.88} (Zn _{1.35} Fe _{0.73}) _{2.09} (Sb _{0.35} As _{3.79}) _{4.14} S _{12.89} (Zn _{0.99} Fe _{0.01}) _{1.00} S _{1.00}	0.08	0.35	0.78	193	-9,4
2	Cu _{10.14} (Zn _{1.39} Fe _{0.77}) _{2.16} (Sb _{0.50} As _{3.40}) _{3.90} S _{12.80} (Zn _{1.00} Fe _{0.01}) _{1.01} S _{1.00}	0.13	0.36	0.73	173	-10,3
3	Cu _{9.99} (Zn _{1.30} Fe _{0.82}) _{2.12} (Sb _{0.53} As _{3.78}) _{4.30} S _{12.60} (Zn _{1.00} Fe _{0.01}) _{1.01} S _{1.00}	0.12	0.39	0.52	123	-13,0
4	(Zn _{1.01} Fe _{0.005}) _{1.01} S _{0.98}			0.45	183	-9,8
5	Cu _{10.01} (Zn _{1.42} Fe _{0.47}) _{1.89} (Sb _{0.34} As _{3.54}) _{3.88} S _{13.21} (Zn _{1.00} Fe _{0.01}) _{1.01} S _{0.99}	0.09	0.25	0.75	257	-6,9
6	Cu _{9.81} (Zn _{1.43} Fe _{0.74}) _{2.17} (Sb _{0.52} As _{3.39}) _{3.91} S _{13.12} (Zn _{0.99} Fe _{0.01}) _{1.00} S _{1.01}	0.13	0.34	0.55	148	-11,5
7	Cu _{9.94} (Zn _{1.41} Fe _{0.73}) _{2.13} (Sb _{0.52} As _{3.55}) _{4.07} S _{12.85} (Zn _{1.01} Fe _{0.01}) _{1.02} S _{0.98}	0.13	0.34	0.78	188	-9,6
8	Cu _{9.86} (Zn _{1.55} Fe _{0.69}) _{2.24} (Sb _{0.55} As _{3.38}) _{3.93} S _{12.96} (Zn _{1.00} Fe _{0.004}) _{1.00} S _{1.00}	0.14	0.31	0.35	116	-13,4
9	Cu _{9.83} (Zn _{1.43} Fe _{0.74}) _{2.17} (Sb _{0.47} As _{3.66}) _{4.12} S _{12.88} (Zn _{0.98} Fe _{0.02}) _{1.00} S _{1.00}	0.11	0.34	1.61	314	-5,2
10	Cu _{9.72} (Zn _{1.66} Fe _{0.78}) _{2.43} (Sb _{0.50} As _{3.30}) _{3.80} S _{13.05}	0.13	0.32		330	-4,7
11	Cu _{9.78} (Zn _{1.58} Fe _{0.48}) _{2.06} (Sb _{0.57} As _{3.51}) _{4.08} S _{13.08} (Zn _{1.00} Fe _{0.01}) _{1.01} S _{0.99}	0.14	0.23	1.47	418	-2,7
12	Cu _{9.62} (Zn _{1.78} Fe _{0.65}) _{2.42} (Sb _{0.50} As _{3.46}) _{3.96} S _{12.93} (Zn _{1.00} Fe _{0.01}) _{1.01} S _{0.99}	0.13	0.27	1.39	356	-4,1

Температуры кристаллизации согласуются с таковыми, оцененными другими методами, и не противоречат опубликованным данным по температурному режиму колчеданного минералообразования. Так, диапазон температур 116–418 °C, рассчитанных с помощью сфалерит-блекловорудного геотермометра, согласуется с температурами рудообразования 180–330 °C и 130–440 °C, полученными для Ново-Учалинского месторождения и соседних девяти месторождений, соответственно [Карпухина и др., 2013]. Эти данные также согласуются с температурами 200–450 °C, оцененными по сфалерит-блекловорудному геотермометру и флюидным включениям в сфалеритах Узельгинского месторождения [Любимцева и др., 2016].

Авторы благодарны д.г.-м.н. И. В. Викентьеву за фактический материал и консультации, академику Н. С. Бортникову и к.г.-м.н. Л. Н. Шишаковой за ценные замечания. Исследования проводились при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 48 (полевые работы) и проекта РНФ (аналитические работы).

Литература

- Карпухина В. С., Наумов В. Б., Викентьев И. В.* Генезис колчеданных месторождений Верхнеуральского рудного района (Южный Урал, Россия): свидетельства магматического вклада металлов и флюида // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 2. С. 145–165.
- Любимцева Н. Г., Викентьев И. В., Борисовский С. Е., Грознова Е. О.* Особенности химического состава и условия образования блеклой руды Узельгинского колчеданного месторождения (Южный Урал) // VI Рос. мол. науч.-практ. школа «Новое в познании процессов рудообразования». М.: ИГЕМ РАН, 2016. С. 197–200.
- Маслов В. А., Артюшкова О. В.* Стратиграфия палеозойских образований Учалинского района Башкирии. Уфа: ИГ УфНЦ РАН, 2000. 123 с.
- Минеральные ресурсы Учалинского горно-обогатительного комбината / Серавкин И. Б., Пирожок П. И., Скуратов В. Н. и др. Уфа: Башкирское книжное изд-во, 1994. 328 с.
- Пшеничный Г. Н., Волькинштейн М. Я., Николайченков Ю. С.* Ново-Учалинское медно-цинково-колчеданное месторождение Южного Урала. Уфа: УНЦ РАН, 1999. 395 с.
- Пшеничный Г. Н., Рыкус Н. Р.* Блеклые руды Учалинского и Ново-Учалинского медно-цинково-колчеданных месторождений (Южный Урал). Уфа: ИГ УНЦ РАН, 2001. 75 с.
- 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 // *Chemical Geology*. 2004. Vol. 203. P. 319–345.
- Sack R. O., Loucks R. R.* Thermodynamic properties of tetrahedrite-tennantites: constraints on the interdependence of the Ag↔Cu, Fe↔Zn, Cu↔Fe, and As↔Sb exchange reactions // *American Mineralogist*. 1985. Vol. 70. P. 1270–1289.

**Н. П. Сафина, В. В. Масленников, Д. А. Артемьев,
С. А. Садыков, Н. С. Архиреева**
*Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс
natali.safina2015@yandex.ru*

Сопоставление пиритовых конкреций углеродистых алевропелитов Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал) по результатам ЛА-ИСП-МС и изотопного анализа

Пиритовые конкреции широко распространены в углеродистых алевролитах колчеданосной вулканогенно-черносланцевой формации. На Сафьяновском медно-колчеданном месторождении они встречаются в составе углеродсодержащих отложений из ритмично-слоистых пачек подрудного, рудного и надрудного рудоконтролирующих горизонтов [Сафина, Масленников, 2008; Ярославцева и др., 2012]. Первые работы по изучению микрохимии и типохимизма конкреций пирита из сульфидных диагенитов и углеродсодержащих алевропелитов рудного горизонта Сафьяновского месторождения показали их зональное строение и различие минеральных зон по содержаниям элементов-примесей [Сафина и др., 2017]. В настоящей работе представлены результаты изучения пиритовых конкреций из рудоносного и надрудного горизонтов месторождения. Сопоставление результатов открывает перспективы для выявления признаков отличия рудоносных и безрудных углеродсодержащих горизонтов.