

УДК 553.549.3

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ГИДРОТЕРМАЛЬНО-ИЗМЕНЕННЫМ ПОРОДАМ САФЬЯНОВСКОГО КОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СРЕДНИЙ УРАЛ)

Е.И. Сорока, В.П. Молошаг, Л.В. Леонова, А.А. Галеев

Аннотация

Сафьяновское колчеданное месторождение имеет ряд особенностей, отличающих его от колчеданных месторождений уральского типа (Гайского, Дегтярского, Узельгинского и др.). На контакте с рудными телами была выделена зона измененных пород алунит-каолинит-серицит-пирит-кварцевого состава, образование которой происходило в низкотемпературных условиях кислой среды. Температура образования метасоматитов соответствовала энаргитовой субфации руд (180–300 °С), о чем косвенно свидетельствуют и данные, полученные методом ЭПР. В рудной зоне наблюдается повышенное содержание легких РЗЭ, обнаружен редкоземельный алюмофосфат стронция (гойяцит), который отлагался совместно с баритом.

Ключевые слова: колчеданные месторождения, метасоматическая зональность, энаргит, алунит, каолинит, серицит, барит, РЗЭ-алюмофосфаты, ЭПР-спектры.

Введение

Колчеданные месторождения Урала подразделяются на пять типов: домбаровский (кипрский), уральский, баймакский (малокавказский), рудноалтайский и филизчайский [1]. Наиболее распространены месторождения уральского типа. К ним относится большинство месторождений Магнитогорского и Тагильского погружений, а за их пределами месторождения Медногорского рудного района и Восточно-Уральского поднятия. В них сосредоточена основная доля промышленных запасов руд, в том числе крупные: Дегтярское, Узельгинское, Сибайское, Подольское, Юбилейное и уникальное по запасам меди Гайское месторождение. Главная особенность геологической позиции месторождений уральского типа – приуроченность к вулканитам натриевой риолит-базальтовой формации, распространенной в виде субмеридиональных палеовулканических поясов. Колчеданные залежи располагаются преимущественно в верхней части разреза этой формации, в толщах кислых риолит-дацитовых вулканитов или на контактах их со смежными базальтовыми и андезито-базальтовыми толщами. В пределах указанных толщ рудные тела приурочены к горизонтам вулканогенно-осадочных пород. Отдельные месторождения уральского типа в той или иной степени подвергались метаморфическим изменениям, связанным с внедрением интрузий гранитоидов или метаморфизмом линейных зон.

Недавно открытое Сафьяновское колчеданное месторождение расположено в 10 км к северо-востоку от г. Реж (рис. 1). Оно локализовано в пределах Восточно-Уральского поднятия в южной части Режевской структурно-формационной

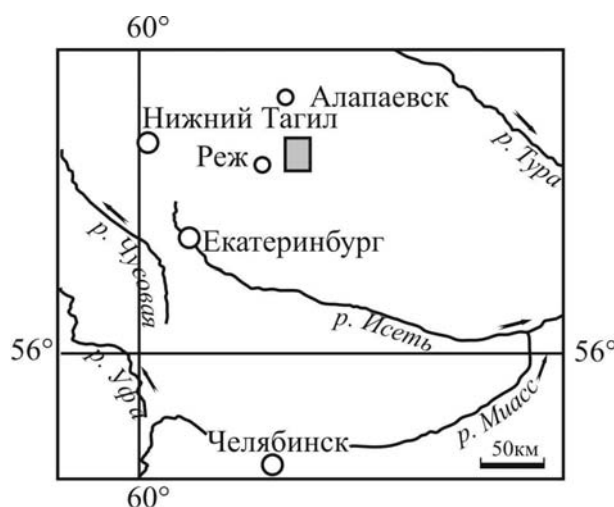


Рис. 1. Обзорная карта района. Затемненным прямоугольником показано примерное расположение Сафьяновского рудного поля

зоны Половина запасов меди месторождения представлена прожилково-вкрапленными рудами в гидротермально-измененных вулканогенно-осадочных породах. По составу главных рудных минералов, ассоциации с кислыми вулканогенными породами, широкому развитию серицит-кварцевых метасоматитов Сафьяновское месторождение сходно с уральским типом колчеданных месторождений. В то же время оно имеет ряд особенностей.

Сафьяновское месторождение локализовано в измененных вулканитах кислого и среднего состава [2], которые вскрыты в карьере Главной рудной залежи (рис. 2). Главная залежь массивных, колчеданных руд имеет длину 400 м, ширину до 140 м. Западный ее контакт совпадает с Сафьяновским разломом, а восточный – близок к Восточному разлому, имеющему крутое западное и северо-западное падение. Южный фланг залежи резко выклинивается, а северный переходит в серию апофиз, которые представлены массивным медным колчеданом и прожилково-вкрапленными рудами. В западной части Главной залежи развит преимущественно медный колчедан, а в юго-восточной – медно-цинковый колчедан. Вблизи западного контакта залежи выделяется субмеридиональная зона богатых медных руд шириной от 2 до 30 м. К залежи массивных руд с запада примыкают прожилково-вкрапленные медные руды. Массивные медноколчеданные руды состоят в основном из пирита, халькопирита и сфалерита. В подчиненном количестве присутствуют блеклые руды (теннантит и тетраэдрит), дигенит, энаргит, фаматинит и галенит; редко встречаются марказит, пирротин, арсенопирит, золото. Медно-цинковые руды отличаются повышенным содержанием сфалерита и присутствием галенита. Прожилково-вкрапленные руды развиты в серицит-кварцевых метасоматитах. Сульфиды представлены пиритом и халькопиритом, в подчиненном количестве встречаются сфалерит, теннантит, энаргит, а к редким минералам относятся галенит, фаматинит, гессит, эмпрессит, тетрадимит, теллурувисмутит, сульфотеллурид висмута [3].



Рис. 2. Общий вид северо-восточной части карьера, которым разрабатывается Главная рудная залежь Сафьяновского колчеданного месторождения

1. Методы и результаты исследований

Нами изучались кварц-серицитовые метасоматиты в тектонической зоне субмеридиональных разломов на контакте рудных тел Главной залежи (рис. 3). Пробы отбирались в бортах карьера на линиях 5, 6, 7 и горизонтах 140, 130 и 120 м, где рудные породы перемежаются с обеленными породами преимущественно серицит-кварцевого состава (рис. 4). Субстратом метасоматитов являются вулканы кислого состава и брекчии. Брекчии, скорее всего, имеют тектоническое происхождение. В бортах карьера четко прослеживаются тектонические зоны, которые часто сопровождают зеркала скольжения, а иногда будинаж.

В цементе обломочных пород отмечаются биоморфные образования, а также графит и следы ископаемого рассеянного органического вещества (РОВ). Для изучения РОВ применялся метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Этот метод позволяет выявлять сигналы ЭПР-радикалов без разрушения минеральной части пород. Предпосылкой применения этого метода к изучаемым породам послужили данные по исследованиям осадочных морских отложений [4].

Исследования изучаемых пород проводились в лаборатории физики минералов Казанского государственного университета. Запись спектров исходных образцов и прогретых при температурах 350 и 600 °С в течение 30 мин производилась при комнатной температуре в автоматическом режиме на портативном спектрометре ПС100.Х с рабочей частотой 9.2 ГГц.

В результате исследований углеродные радикалы (Rc-org) были установлены на спектрах ЭПР в образцах обеленных приконтактных метасоматитов

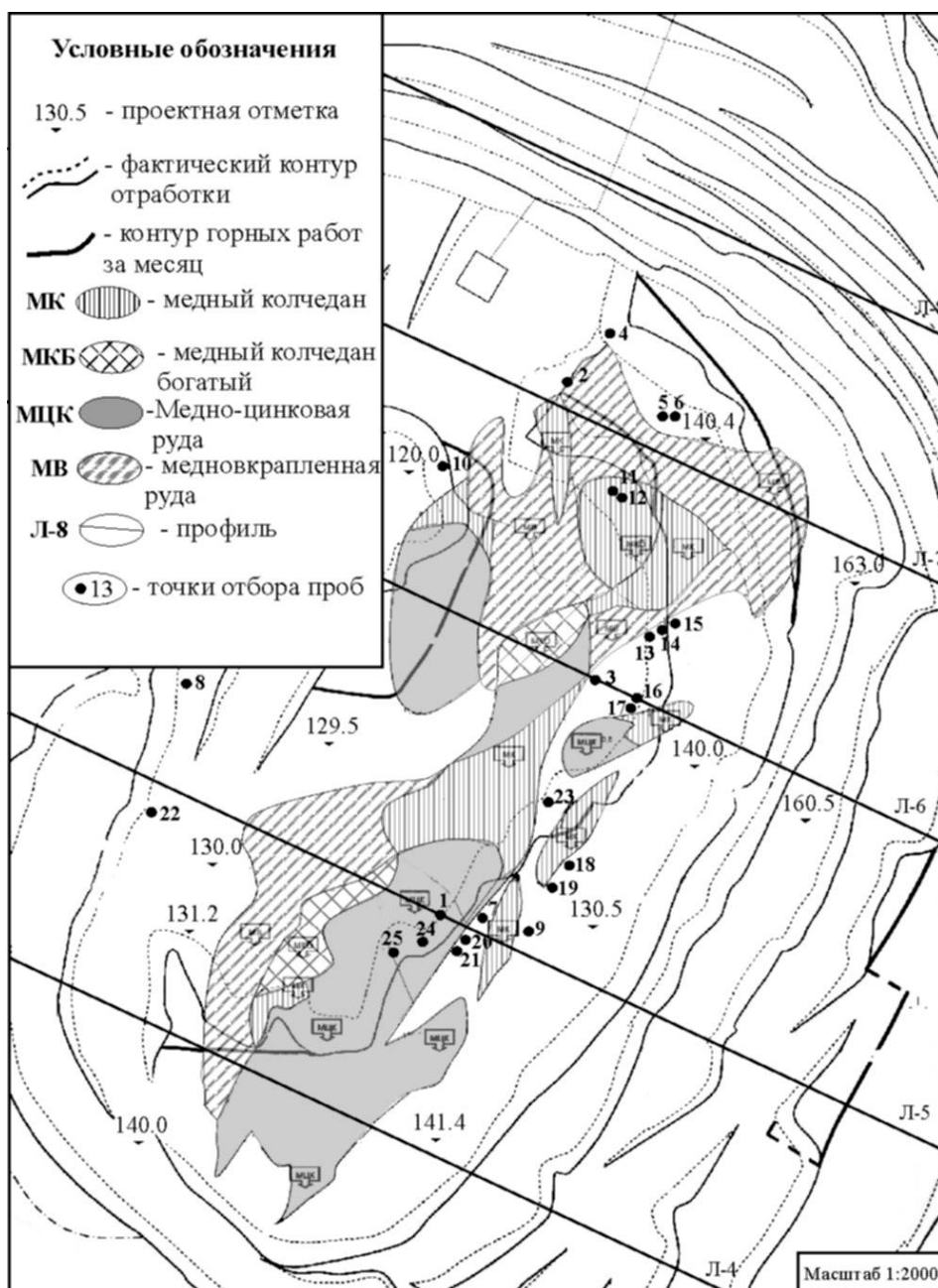


Рис. 3. Схема отбора образцов в карьере Главной рудной залежи Сафьяновского колчеданного месторождения

(обр. 19-05) и брекчии (Саф 121/99). Наиболее отчетливые сигналы углеродного радикала наблюдались в более темной части цемента брекчии: в исходном образце одиночная линия характеризуется положением в спектре с $g \sim 2.0031 \pm 0.0001$ и шириной ~ 0.5 мТл (рис. 5). При нагреве пробы до более 350°C она практически исчезает. Такое поведение сигнала углеродного радикала свидетельствует о наличии остатков органического вещества, претерпевшего метаморфизацию



Рис. 4. Обеленные породы на контакте с рудным телом на горизонте 140, 0 м между разведочными линиями 5–6. Высота борта 10 м. Сплошной линией показана граница зоны контакта с рудным телом; стрелкой показана область развития минеральной ассоциации алунит-каолинит-серицит-пирит-кварц; точками показана примерная граница развития ассоциации каолинит-серицит-хлорит-кварц (примерно 1 м от границы с рудным телом)

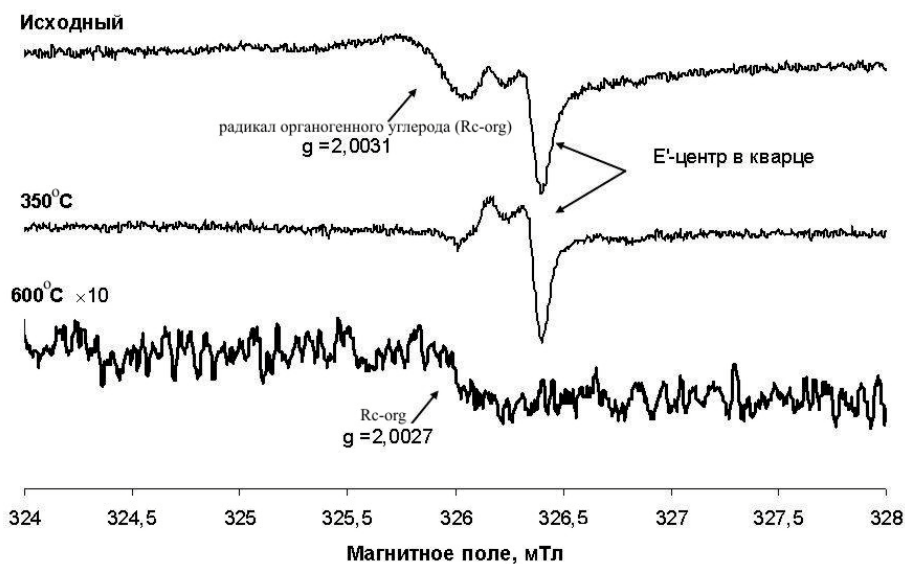


Рис. 5. Спектры ЭПР темноцветной части образца вулканической брекчии (Саф 121/99) Сафьяновского колчеданного месторождения, термически обработанной в лабораторных условиях при 350 °С и 600 °С. Отмечены линии радиационных центров в кварце (E') и углеродных радикалов (Rc-org)

в природных условиях под воздействием температуры не выше 300°C. Объясняется это тем, что образование радикала в его наименее полимеризованной компоненте практически завершено, тогда как в наиболее термически устойчивой компоненте, обогащенной ароматической составляющей, ещё не достигло своего максимума. При последующем нагреве пробы до 600 °С появляется слабая одиночная линия другого углеродного радикала с $g \sim 2.0027 \pm 0.0001$ и шириной ~ 0.2 мТл (рис. 5).

Наиболее мощная зона обеленных серицит-кварцевых метасоматитов наблюдается на горизонте 140 м, где были отобраны образцы по мере удаления от контакта (1–4 м) с рудными телами (рис. 4). При помощи рентгенофазового анализа отобранных образцов (Институт геологии и геохимии УрО РАН, оператор Т.Я. Гуляева) было установлено наличие каолинита практически во всех образцах обеленных пород, а также в незначительном количестве, но практически всегда присутствуют алунит, серицит, гипс и барит. Силикатный анализ показал, что содержание Al_2O_3 в некоторых образцах достигает 28 мас. % (табл. 1).

В 4 м от контакта с рудной зоной, представленной богатыми медновкрапленными рудами, между линиями 6–7, состав пород преимущественно кварц-хлоритовый с каолинитом и пиритом. Ближе к контакту с рудной зоной, представленной медным колчеданом (примерно в 1 м), состав обеленных пород каолинит-кварцевый с незначительной примесью хлорита. Непосредственно на контакте с рудной зоной, представленной медным колчеданом, между линиями 5–6, сильно рассланцованная порода состоит из кварца, гидрослюд, каолинита, алунита и пирита (рис. 4). Отмечаются более светлые прожилки с алунитом, серицитом и пиритом. Алунит находится в тонких сростках с серицитом и слагает прожилки и межзерновое пространство. В шлифах иногда наблюдается замещение полевых шпатов алунитом и серицитом. Наиболее четкие пики отражения алунита на рентгеновских дифрактограммах соответствуют 5.77, 4.96, 2.99, 2.29, 1.92 Å. Алунит подтвержден термовесовым анализом (Институт геологии и геохимии УрО РАН, оператор В.Г. Петрищева). Для алунита выделяются два эндотермических максимума: первый – при 560 °С, связанный с потерей конституционной воды, и второй – при 820 °С, обусловленный диссоциацией безводных квасцов (рис. 6).

Таким образом, в измененных породах вблизи рудных тел намечается следующая зональность: непосредственно на контакте с рудными телами находится зона наиболее глиноземистых образований алунит-каолинит-серицит-пирит-кварцевого состава, а затем следует каолинит-серицит-хлорит-кварцевая зона (рис. 4). Предыдущими исследователями на месторождении были выделены следующие зоны: каолинит-карбонат-кварцевых метасоматитов, хлорит-гидросерицит-кварцевых, карбонат-гидросерицит-хлорит-кварцевых и кварцевых метасоматитов [2, 5].

2. Обсуждение и выводы

Поскольку ассоциация глиноземистых минералов с алунитом на Сафьяновском месторождении развита на контакте с рудной зоной, можно предположить ее близко-одновременное происхождение с рудными минералами. Присутствие

Табл. 1

Химический состав метасоматитов Сафьяновского колчеданного месторождения (горизонты 140–130 м)

№ обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O ⁻	П.п.п.	P ₂ O ₅	SO ₄ ²⁻	CO ₂	S ²⁻	Сумма
10-05	53.05	0.23	24.48	3.56	0.13	0.01	2.23	0.34	0.25	4.36	6.58	1.34	0.15	1.58		2.18	98.29
13-05	7.54	0.07	5.27	56.75		< 0.10	0.19	0.33	0.11	0.62	0.16	29.92	0.08	0.39	< 0.10	32.76	101.43
14-05	55.98	0.30	24.77	2.62	0.54	0.01	0.97	0.59	3.04	5.48	0.42	4.94	0.14	0.46	< 0.10	2.09	100.26
15-05	71.24	0.10	7.81	7.17	3.34	0.01	2.70	0.48	0.13	0.16	< 0.10	6.16	0.08	0.56	< 0.10	5.04	99.94
16-05	58.66	0.10	17.90	9.15	0.40	0.01	0.48	0.31	0.10	0.21	0.20	12.00	0.06	0.45	< 0.10	7.24	100.03
17-05	68.96	0.12	11.36	3.25	0.11	< 0.10	0.44	0.58	0.20	1.59	0.40	6.48	0.06	1.89	< 0.10	2.38	95.44
18-05	68.44	0.11	15.00	4.96	0.40	< 0.10	0.56	0.37	0.33	2.20	0.72	6.48	0.10	0.41	< 0.10	3.88	100.08
19-05	37.70	0.05	28.33	2.07	0.12	< 0.10	0.12	0.35	0.19	4.06	0.36	17.34	0.17	1.59	< 0.10	5.26	92.45

Примечание. Анализы выполнены в ИМин УрО РАН, г. Миасс.



Рис. 6. Термограмма образца алуנית-серицит-каолинит-пирит-кварцевой породы (обр. 19/05)

алунита характерно для выделенной В.П. Логиновым (1976) формации колчеданных месторождений с рудами, содержащими энаргит и люционит [6]. Руды этих месторождений пространственно и генетически связаны с вулканитами кремнекислого состава. Их образование происходило в условиях окислительной среды. В структуре люционита и энаргита ($\text{Cu}_3\text{AsS}_4 - \text{Cu}_3\text{SbS}_4$) мышьяк и сурьма присутствуют в окисленном пятивалентном состоянии, что свидетельствует о повышенной активности кислорода при их образовании. Считается, что на Сафьяновском месторождении энаргит образовался при участии газообразных соединений мышьяка в виде AsS , то есть при достаточно высоком значении давления паров серы ($-\log f_{\text{S}_2} = 10-12$) [7]. Температура образования энаргитовой субфации 180–300 °С (табл. 2). Как видно из диаграммы (рис. 7), для 250 °С образование глиноземистой ассоциации алунита, мусковита, каолинита одновременно с энаргитом возможно при достаточно высокой активности кислорода ($\log f_{\text{O}_2} = -38$) в области значений рН от 2.8–5.2. При рН выше 4.5 происходит образование преимущественно серицита. Судя по диаграмме $\log f_{\text{O}_2} - \text{pH}$, барит образовывался при нейтральных значениях рН. Он является здесь более поздним широко распространенным минералом. Месторождения упомянутой формации распространены в пределах Средногорской структурно-металлогенической зоны: Бор (Югославия), Елшице, Челопеч (Болгария). К ним также можно отнести Маднеули, Мец-Дзор и Биттибулахское месторождение пирит-энаргитовых руд (Малый Кавказ).

На собственно алунитовых, а также меднопорфировых и эпитермальных месторождениях в ассоциациях с алунитом, люционитом и энаргитом довольно часто отмечаются фосфор-алюминиевые сульфаты и арсенаты с примесями

Табл. 2

Минеральные ассоциации и термохимические условия образования руд колчеданных месторождений Урала

Фации	Субфации	Типоморфные минералы	Акцессорные минералы	T, °C	-log f _{S2}
Борнитовая	(7) Энаргит-дигенитовая	py, sp, dg, ba	bt, str, jal, mc, (Au, Ag), alun	150–230	9–12
	(6) Блекло-рудная	py, bn, sp, flz, ba	mw, col, ger, st, (Au, Ag), alun	150–300	8–3
Халькопиритовая	(5) Энаргитовая	py, sp, en	(Au, Ag), alt, alun	180–300	10–12
	(4) Блекло-рудная	py, sp, sp, flz, ± hm	теллуриды золота, серебра, висмута, суфотеллуриды серебра и висмута, alt, Te, (Au, Ag)	180–370	7–13
	(3) Арсенопиритовая	py, sp, sp, asp, ± mt	теллуриды висмута, серебра и золота, (Au, Ag)	250–500	8–14
Пирротиновая	(2) Арсенопиритовая	py, po, sp, sp, mt, asp	cb, pn, теллуриды висмута и серебра, mo, bs, Bi, (Au, Ag), val, ганит	560 – < 250	3.1–13
	(1) Леллингитовая	py, po, sp, sp, asp, lö, mt, ± cr	cub, pn, viol, car, (Au, Ag), nik	480–660	1.8–5.1

Примечание. Минералы: py – пирит; bn – борнит; sp – халькопирит; po – пирротин; asp – арсенопирит; dg – дигенит; mt – магнетит; hem – гематит; lö – леллингит; mo – молибденит; pn – пентландит; cb – кубанит; en – энаргит; flz – блеклые руды; ba – барит; bt – бетехтинит; gn – галенит; (Au, Ag) – самородное золото; Te – самородный теллур; Bi – самородный висмут; bs – висмутин; pbs – козалит; gfd – голдфилдит; str – штрмейерит; mc – маккинстрит; jal – ялпаит; mw – моусонит; st – станноидит; col – колусит; ger – германит; val – валлерит; car – карролит; viol – виоларит; cr – хромшпинелиды; nik – никеллин; alt – алтаит; alun – алуниит.

редких земель [8]. В серицит-кварцевых околорудных породах Сафьяновского месторождения нами впервые для колчеданных месторождений был обнаружен алюминий-стронциевый фосфат, состав которого по предварительным данным соответствует гойяциту SrAl₃(PO₄)(HPO₄)(OH)₆ с примесями редких земель, преимущественно Ce, La [9]. Он встречается здесь в сростках с баритом и сульфидами. Распределение РЗЭ в серицит-кварцевых метасоматитах месторождения соответствует распределению, характерному для кислых вулканитов [10], но отличается в основном низким содержанием РЗЭ (рис. 8, а). Вместе с тем в отдельных пробах отмечается увеличение содержания легких РЗЭ относительно тяжелых, в частности церия, лантана и празеодима, где и был установлен гойяцит. Кривая распределения РЗЭ в баритовом гнезде рудной зоны (рис. 8, б, обр. 1/05) также показывает резкое преобладание легких РЗЭ, что может свидетельствовать о присутствии их в виде РЗЭ-минералов.

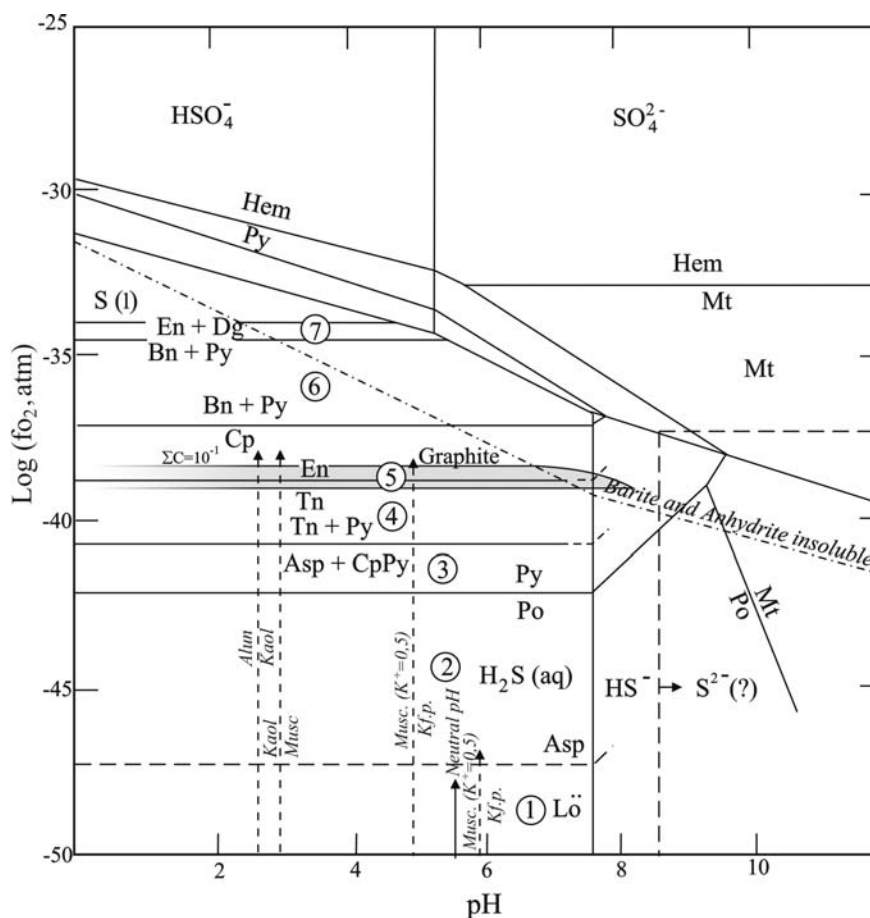


Рис. 7. Поля устойчивости минералов в системе Cu-Fe-S-O, а также барита, ангидрита, серицита (мусковита), алунита, каолинита и водных частиц серы при 250 °С в координатах pH – летучесть кислорода по [11] с изменениями. Цифрами в кружках отмечены поля устойчивости субфаций, соответствующих табл. 2: 1 – леллингит-пирротиновая; 2 – арсенопирит-пирротиновая; 3 – арсенопирит-халькопиритовая; 4 – халькопирит-блеклорудная; 5 – энаргит-халькопиритовая; 6 – борнит-блеклорудная; 7 – энаргит-дигениитовая

В результате исследований измененных пород Сафьяновского колчеданного месторождения на контакте с рудными телами выделена зона алунит-каолинит-серицит-пирит-кварцевого состава, образование которой происходило в условиях кислой среды. Метасоматиты приконтактной зоны образовались в низкотемпературных условиях, соответствующих энаргитовой субфации 180–300 °С, что коррелирует с данными исследований ЭПР-спектров рассеянного органического вещества. Околорудные метасоматиты обогащены баритом и отличаются повышенным содержанием легких РЗЭ. В них впервые на колчеданных месторождениях обнаружен редкоземельный алюмофосфат стронция (гойяцит). Полученные данные подтверждают ранее выявленные признаки сходства Сафьяновского месторождения с месторождениями, содержащими люцит и энаргит.

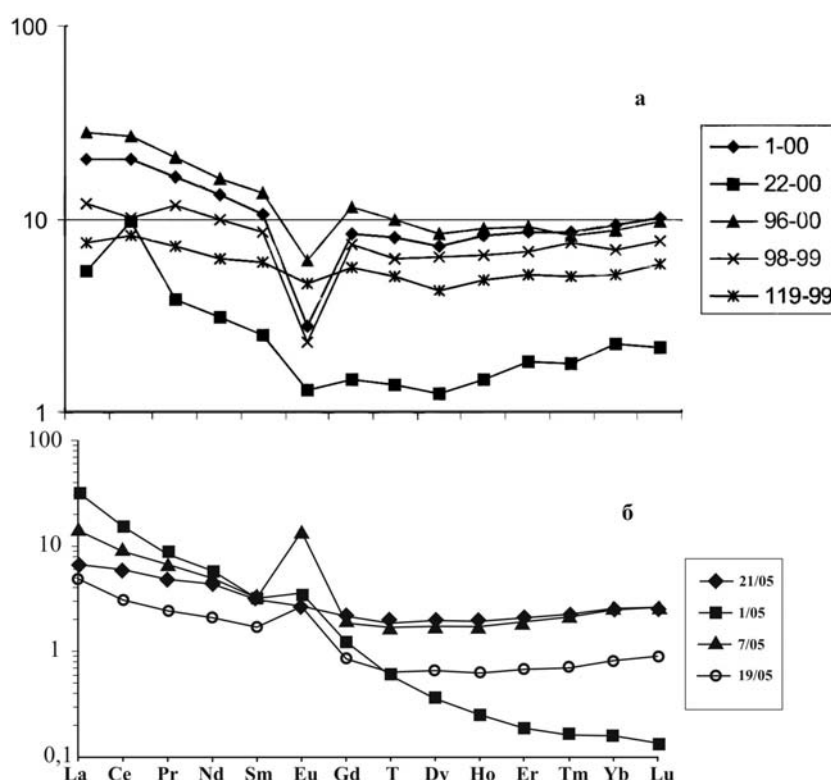


Рис. 8. Нормированные по хондриту графики содержаний РЗЭ в метасоматитах Сафьяновского колчеданного месторождения: а) в измененных субвулканических породах кислого состава по [10]; б) в метасоматитах приконтактовых зон рудных тел

Summary

E.I. Soroka, V.P. Moloshag, L.V. Leonova, A.A. Galeev. A New Data about Hydrothermal Altered Rocks of the Safyanovskoe Sulfide Deposit (the Middle Urals).

The Safyanovskoe massive sulfide deposit has some specific features different from the Uralian type ones (Gaiskoe, Degtyarskoe, Uzelginskoe, etc.). A mineral association (alunite-kaolinite-sericite-pyrite-quartz) occurred on the contact of ore bodies is supposed to be formed almost simultaneously with ore mineralization (in particular enargite) under the special high sulfur fugacity and acidic conditions of: $-\log f_{S_2} = 10-12$; $-\log f_{O_2} = 38$; $T = 180-300$ °C and pH up to 4.5. In ore zone, higher concentration of LREE is observed, and Sr-alumophosphate (goyazite) together with barite has been found. Also, the presence of burial organic matter was established in the studied rocks from EPR-spectrum of carbon centered free radicals.

Key words: massive sulfide deposit, metasomatic zones, enargite, alunite, kaolinite, sericite, barite, REE-alumophosphates, EPR-spectrum.

Литература

1. Медноколчеданные месторождения Урала. Геологические условия размещения / В.А. Прокин, В.М. Нечухин, П.Ф. Сопко и др. – Свердловск: УИЦ АН СССР, 1985. – 288 с.

2. *Коровко А.В., Грабежьев А.И., Двоеглазов Д.А.* Метасоматический ореол Сафьяновского цинково-медного месторождения (Средний Урал) // Докл. АН СССР. – 1988. – Т. 303, № 3. – С. 692–695.
3. *Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарев В.В.* Геология и рудные парагенезисы Сафьяновского месторождения в среднеуральском ретрошарьяже // Геология рудных месторождений. – 1991. – Т. 33, № 4. – С. 47–58.
4. *Муравьев Ф.А., Винокуров В.М., Галеев А.А., Булка Г.Р., Низамутдинов Н.М., Хасанова Н.М.* Парамагнетизм и природа рассеянного органического вещества в пермских отложениях Татарстана // Георесурсы. – 2006. – № 2(19). – С. 40–45.
5. *Грабежьев А.И., Молошаг В.П., Сотников В.И., Мурзин В.В., Коровко А.В., Жухлистов А.П.* Метасоматический ореол Сафьяновского Zn-Cu месторождения, Средний Урал // Петрология. – 2001. – Т. 9, № 3. – С. 294–312.
6. *Логинов В.П.* Формации семейства колчеданных месторождений // Рудные формации эндогенных месторождений. Т. 2. – М.: Наука, 1976. – С. 111–148.
7. *Молошаг В.П., Грабежьев А.И., Викентьев И.В., Гуляева Т.Я.* Фации рудообразования колчеданных месторождений и сульфидный руд медно-золото-порфириновых месторождений Урала // Литосфера. – 2004. – № 2. – С. 30–51.
8. *Deyell C.L., Rye R.O., Landis G.P., Bissig T.* Alunite and the role of magmatic fluids in Tambo high-sulfidation deposit, EL Indio-Pascua belt, Chile // Chem. Geol. – 2005. – V. 215. – P. 185–218.
9. *Молошаг В.П., Сорока Е.И., Филиппов В.Н.* Алюмофосфат стронция в породах Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал) // Теория, история, философия и практика минералогии: Материалы. Междунар. Симп. – Сыктывкар: Геопринт, 2006. – С. 92–193.
10. *Молошаг В.П., Прокин В.А., Удачин В.Н., Сорока Е.И.* Распределение редкоземельных и редких элементов в субвулканических породах Сафьяновского месторождения // Ежегодник-2004. – Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2005. – С. 192–198.
11. *Crerar D.A., Barnes H.L.* Ore solution chemistry. V. Solubility of chalcopyrite and chalcocite assemblages in hydrothermal solution of 200 to 350 ° C // Econ. Geol. – 1976. – V. 71, No 4. – P. 772–794.

Поступила в редакцию
20.08.08

Сорока Елена Индустровна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург.

E-mail: Soroka@igg.uran.ru

Молошаг Василий Петрович – кандидат геолого-минералогических, ведущий научный сотрудник Института геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург.

E-mail: Moloshag@igg.uran.ru

Леонова Любовь Владимировна – кандидат геолого-минералогических, старший научный сотрудник Института геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург.

Галеев Ахмет Асхатович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей геологии и гидрогеологии Казанский государственный университет.