

УДК 553.08:552.56:552.57(234.853:234.852)

**МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ГЕМАТИТ- И УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ
АЛЕВРОПЕЛИТОВ АЛЕКСАНДРИНСКОГО И САФЬЯНОВСКОГО
КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (УРАЛ)**

Н.С. Архиреева, В.А. Котляров

Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс; nata@ilmeny.ac.ru

**MINERAL COMPOSITION OF Fe-POOR FERRUGINOUS AND CARBONACEOUS
SHALES FROM THE ALEXANDRINSKOE
AND SAF'YANOVSKOE DEPOSITS (THE URALS)**

N.S. Arkhireeva, V.A. Kotlyarov

Institute of Mineralogy UB RAS, Miass; nata@ilmeny.ac.ru

Гематитсодержащие и углеродсодержащие алевропелиты Александринского и Сафьяновского месторождений состоят из псевдоморфоз хлорита, кварца и гидрослюды по гиалокластам, содержат обломки кварца и плагиоклаза, циркон, апатит, рутил, сидерит, барит, пирит, марказит, халькопирит, пирротин, сфалерит, галенит. В гематитсодержащих алевропелитах выявлены гематит, маггемит, магнетит, эпидот, доломит, борнит, штютцит, раклиджит, алтаит, золото и псевдоморфозы кварца по радиоляриям; а в углеродсодержащих – рассеянное органическое вещество, графит, титанит, теннантит, фрайбергит, акантит, арсенопирит, а также алюмофосфат стронция, близкий по составу к гоудкениту. Для углеродистых алевропелитов типичными являются псевдоморфозы кварца и апатита по фораминиферам.

Илл. 3. Табл. 5. Библ. 28.

Ключевые слова: гематитсодержащие алевропелиты, углеродсодержащие алевропелиты, Сафьяновское месторождение, Александринское месторождение, Урал, колчеданные месторождения.

Ferruginous and carbonaceous shales of the Alexandrinskoe and Saf'yanovskoe massive sulfide deposits are composed of pseudomorphic chlorite, quartz and hydromica after hyaloclasts and contain quartz and plagioclase clasts, as well as zircon, apatite, rutile, siderite, barite, pyrite, marcasite, chalcopyrite, pyrrhotite, sphalerite and galena. Ferruginous shales also host hematite, maghemite, magnetite, epidote, dolomite, bornite, stutzite, rucklidgeite, altaite and pseudomorphic quartz after radiolarians. Carbonaceous shales contain organic matter, graphite, xenotime, titanite, tennantite, freibergite, acanthite, arsenopyrite and Sr alumophosphate similar to goedkenite. Pseudomorphs of apatite and quartz after foraminiferas are typical of carbonaceous shales.

Figures 3. Tables 5. References 28.

Key words: ferruginous shale, carbonaceous shale, Saf'yanovskoe deposit, Alexandrinskoe deposit, the Urals, massive sulfide deposits.

Введение

Большинство колчеданных месторождений мира приурочены к рудоконтролирующим вулканогенно-осадочным горизонтам, каждый из кото-

рых характеризуется своими литологическими и минералого-геохимическими особенностями, позволяющими отличать их от безрудных слоистых пачек (Масленников, 1999). Более чем на половине колчеданных месторождений мира колчедано-

носные горизонты содержат углеродистые алевропелиты (Беспаев и др., 1997; Moreno et al., 2008; Tornos et al., 2008; Rosa et al., 2008). В других горизонтах доминируют красноцветные отложения – гематитсодержащие алевропелиты или яшмы и их высокожелезистые разновидности (Масленников, 2006). Минералого-геохимические особенности высокожелезистых разновидностей гематитсодержащих гальмиролититов, среди которых выделены госсаниты, джаспериты и умбриты, детально изучены (Maslennikov et al., 2012). Гораздо меньше известно о минеральном составе углеродсодержащих и маложелезистых гематитсодержащих алевропелитов. Эти породы несут ценную информацию об источниках вещества и процессах, происходивших в бассейне колчеданообразования, в том числе об обстановках седиментогенеза, условиях диагенеза, катагенеза и метаморфизма (Пуркин, Денисова, 1987; Злотник-Хоткевич, 1988; Зайков, 1991; 2006; Теленков, Масленников, 1995; Масленников, 1999; Hannington, 1999; Goodfellow, Scott McCatcheon, 2003; Peter et al., 2003). Изучение особенностей минерального состава этих пород необходимо для разработки новых литолого-минералогических критериев прогнозирования колчеданных месторождений, сформированных как в «хорошо аэрируемых», так и в аноксических бассейнах.

Геологическая позиция

Александринское медно-цинково-колчеданное месторождение расположено в Учалино-Александринской колчеданноносной зоне Южного Урала (Зайков и др., 1993; Тесалина и др., 1994; 1998). В риолит-дацитовый толще Александринского месторождения распространены кремнистые и гематитсодержащие алевропелитовые и песчаные разновидности красноцветных вулканогенно-осадочных пород. Гематитсодержащие алевропелиты, наряду с госсанитами, залегают среди дацитовых ксеногидроалокластитов в кровле и на флангах колчеданной залежи (Тесалина и др., 1998; Масленников, 1999).

Сафьяновское медно-цинково-колчеданное месторождение расположено в Восточной зоне Среднего Урала в пределах Режевского рудного района (Язева и др., 1992; Коротеев и др., 1997; Масленников, 2006). На флангах сульфидной залежи (в пределах карьера) Сафьяновского месторождения выявлено семь вулканогенно-осадочных горизонтов – два подрудных, три рудоконтролирующих и два надрудных (Ярославцева и др., 2012). Они

представляют собой чередование углеродсодержащих алевропелитов, песчаников, рудокластитов и брекчий смешанного состава. Каждый вулканогенно-осадочный горизонт перекрывается лавовыми потоками риолит-дацитового состава.

Методы исследований

Минералого-петрографические исследования проводились на микроскопе Olympus BX51 в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс). Этим методом были определены кварц, хлорит, гематит, апатит, калиевый полевой шпат, плагиоклаз, слюда, барит, сидерит, доломит, рутил, марказит, халькопирит, сфалерит, галенит, теннантит, пирротин, арсенопирит.

Рентгеновские исследования выполнены на установках ДРОН-2.0 и УРС-2.0 (ИМин УрО РАН, аналитики П.В. Хворов, Е.Д. Зенович, Т.М. Рябухина) и диагностированы хлорит, иллит, каолинит, серицит, гидрослюда.

Химический состав минералов исследован на растровом электронном микроскопе РЭММА-202МВ с энергодисперсионной приставкой LZ-5 (ИМин УрО РАН, аналитик В.А. Котляров). С помощью данного метода определены апатит, барит, сидерит, рутил, титанит, циркон, ксенотим, борнит, теннантит, арсенопирит, золото, фрайбергит, алтаит, штюцит, раклиджит.

Определение содержания $C_{орг}$ в породах проводилось методом термического анализа (ИМин УрО РАН, аналитик П.В. Хворов).

Состав гематитсодержащих алевропелитов Александринского месторождения

В гематитсодержащих алевропелитах Александринского месторождения преобладают кварц, гематит, магнетит, лейкоксен и рутил, замещающие гиадокластический материал и раковины радиолярий. Второстепенные минералы представлены разнообразными оксидами, силикатами, карбонатами, сульфидами, теллуридами, сульфатами, фосфатами и самородными элементами (табл. 1). Слоистые силикаты по результатам рентгеноструктурного анализа представлены хлоритом, мусковитом и серицитом.

Из самородных элементов при изучении гематитсодержащих алевропелитов под электронным микроскопом было обнаружено *золото* в зёрнах величиной около 5 мкм, по химическому составу

Таблица 1

Минеральный состав гематит- и углеродсодержащих алевропелитов Александринского и Сафьяновского месторождений

Table 1

Mineral composition of Fe-poor ferruginous and carbonaceous shales from the Alexandrinskoe and Saŷyanovskoe deposits

	Минералы			Органические остатки	C _{орг} , мас. %
	Нерудные	Рудные	Акцессорные		
Гематитсодержащие	Q, Hem, Chl, Pl, Mu, Ser, гиадокластита, Ep, Ca, Sd, Dol, Ba, Ap	Py, Mt, Mag, Cpy, Po, Bo, Gln, Sph, Au, Al, Sht, Rak	Lc, Rut, Ti	Остатки радиолярий, фораминифер, бактерий и водорослей	—
Углеродсодержащие	Q (+халцедон), Pl, Kl, Hm, Sd, Ba, Chl, Il, G, Hem, Ap, Kf	Py, Mc, Cpy, Sph, Gln, Tn, Fr, Po, Ars, Ac, Au	Ti, Zr, Rut, алюмофосфат стронция, Ks	Остатки радиолярий, фораминифер и водорослей	2–3.5

Примечание: Ac – акантит, Al – алтаит, Ap – апатит, Ars – арсенопирит, Au – золото, Ba – барит, Bo – борнит, Ca – кальцит, Chl – хлорит, Cpy – халькопирит, Dol – доломит, Ep – эпидот, Fr – фрайбергит, G – графит, Gln – галенит, Hem – гематит, Hm – гидрослюда, Il – иллит, Kf – калиевый полевой шпат, Kl – каолинит, Ks – ксенотим, Lc – лейкоксен, Mag – маггемит, Mc – марказит, Mt – магнетит, Mu – мусковит, Pl – плагиоклаз, Po – пирротин, Py – пирит, Q – кварц, Rak – раклиджит, Rut – рутил, Sd – сидерит, Ser – серицит, Sht – штютцит, Sph – сфалерит, Ti – сфен, Tn – теннантит, Zr – циркон.

Note. Ac – acanthite, Ap – apatite, Al – altaite, Ars – arsenopyrite, Au – gold, Ba – barite, Bo – bornite, Ca – calcite, Chl – chlorite, Cpy – chalcopyrite, Dol – dolomite, Ep – epidote, Fr – freibergite, G – graphite, Gln – galena, Hem – hematite, Hm – hydromica, Il – illite, Kf – potassium feldspar, Kl – kaolinite, Ks – xenotime, Lc – leucoxene, Mag – maghemite, Mc – marcasite, Mt – magnetite, Mu – muscovite, Pl – plagioclase, Po – pyrrhotite, Py – pyrite, Q – quartz, Rak – rucklidgeite, Rut – rutile, Sd – siderite, Ser – sericite, Sht – stutzite, Sph – sphalerite, Ti – titanite, Tn – tennantite, Zr – zircon.

ву отвечающее аурикуприту (мас. %): Cu 29.87, Ag 5.59, Au 54.74.

Теллуриды встречаются очень редко: в изученных образцах они представлены раклиджитом, алтаитом и штютцитом. *Раклиджит* PbBi₂Te₄ образует сросток с галенитом величиной около 25 мкм (рис. 1а). Зёрна *алтаита* PbTe до 3 мкм встречены в ассоциации с баритом, а *штютцит* AgTe в зёрнах от 1 до 2 мкм – в основной гематит-кремнистой массе.

Сульфиды – пирит, халькопирит, пирротин, борнит, галенит и сфалерит – обнаружены также в гематитсодержащих алевропелитах.

Пирит представлен аутигенными зёрнами до 60 мкм, в сечении близкими к квадратной или гексагональной формам, реже рудокластами. Встреча-

ются прожилки пирита в ассоциации с магнетитом, гематитом и кварцем. Рудокласты пирита частично замещаются гематитом и содержат микровключения самородного золота, пирротина и борнита. С помощью структурного травления (в HNO₃) рудокластов пирита установлено, что они содержат в ядре участки с колломорфным строением, окружённые кристаллической каймой. Почти все обломки пирита имеют пористую поверхность и содержат мельчайшие включения халькопирита, пирротина, иногда галенита, а также мелкие включения (до 3 мкм) магнетита, рутила и титанита.

Халькопирит в виде редких зёрен до 200 мкм встречается в ассоциации с пиритом, магнетитом, сфалеритом или образует самостоятельные выделения.

Галенит в тесной ассоциации с раклиджитом (см. рис. 1а) встречается редко и образует единичные зёрна сложной формы до 2 мкм в гематит-кремнистой массе.

Сфалерит в ассоциации с халькопиритом, пиритом, магнетитом образует зёрна размером до 20 мкм в породе.

Пирротин и *борнит* встречены в виде мелких включений в пирите.

Оксиды. *Кварц* встречен в микрокристаллических агрегатах гематита и хлорита (см. рис. 1б). Относительно чистый от примеси гематита бесцветный кварц образует прожилки и гнезда.

В изученных отложениях выявлено три разновидности *гематита*, условно названные: гематит-1 – сгустковые выделения оранжево-красного цвета в массе породы; гематит-2 – кирпично-красный, в жилках в ассоциации с кварцем и в виде псевдоморфоз по гиалокластам; гематит-3 – серо-белые пластинчатые и округлые зёрна в основной массе, также замещают магнетит и пирит. Совместно с кварцем гематит слагает хлопьевидные и зернистые агрегаты, в которых часто встречаются биоморфные образования и структуры замещения филлосиликатов.

Магнетит образует угловатые сростки, реже зёрна удлинённой и сложной форм, и часто в ассоциации с гематитом-3 замещает сульфиды. Некоторые зёрна магнетита подвержены гематитизации с образованием маргита.

Рутил образует игольчатые, реже – короткостолбчатые кристаллы до 7 мкм, часто встречается как включения в пирите. В виде агрегата (лейкоксона) образует тонкие прерывающиеся каёмки вокруг гематита.

Силикаты представлены хлоритом, слюдами, плагиоклазом, титанитом и эпидотом. Наиболее распространёнными являются хлорит и слюда.

Хлорит тёмно-зелёный, почти чёрный, содержится в большом количестве, вплоть до образования прослоев, а также образует тонкочешуйчатые агрегаты с кварцем и гематитом. Реже встречаются отдельные гексагональные пластинки и чешуйки.

Мусковит и мелкочешуйчатый бесцветный агрегат до 10 мкм (*серицит*) совместно с кварцем и гематитом выполняют основную массу породы. Мусковит образует короткостолбчатые кристаллы светло-коричневого цвета величиной до 6 мкм.

Альбит в виде фенокристаллов удлинённо-изометричной формы и беспорядочно ориентированных микролитов без чётких очертаний развит в массе породы.

Титанит встречен в виде самостоятельных зёрен около 15 мкм клиновидной формы со спайностью, а также как включения в пирите совместно с рутилом.

Эпидот представлен зернистыми агрегатами фиштаккового цвета размером от 5 до 30 мкм и гнездовидными обособлениями в основной гематит-кремнистой массе.

Карбонаты (*кальцит*, *сидерит* и *доломит*) выполняют жилки и образуют самостоятельные кристаллы в основной гематит-кремнистой массе. Кальцит бесцветный, зёрна его в сечении таблитчатой формы (до 10 мкм) или сложной (до 50 мкм). Доломит обнаружен в виде хорошо огранённых турых ромбоэдров.

Сульфаты и фосфаты. В гематитсодержащих алевропелитах *барит* образует таблитчатые кристаллы и зёрна сложной формы с совершенной

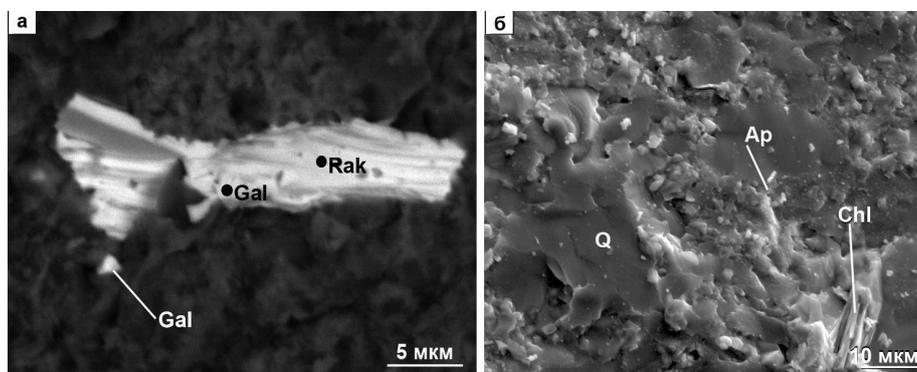


Рис. 1. Минералы гематитсодержащих алевропелитов Александринского месторождения.

Rak – раклиджит, Gal – галенит, Q – кварц, Ap – апатит, Chl – хлорит. BSE-фото, СЭМ РЭММА-202М.

Fig. 1. Minerals of Fe-poor ferruginous shales of the Alexandrinskoe deposit.

Rak – rucklidgeite, Gal – galena, Q – quartz, Ap – apatite, Chl – chlorite. BSE-image, SEM REMMA-202M.

спайностью в трёх направлениях. *Anatum* встречается в зёрнах столбчатого в сечении облика, а также и сложной формы размером до 15 мкм в ассоциации с кварцем и хлоритом.

Гиалокластический материал гематитсодержащих алевропелитов Александринского месторождения представлен несортированными угловатыми, изометричными и удлинёнными обломками стекловатого облика. Цвет их меняется от зелёного, тёмно-зелёного, почти до чёрного. Размер обломков варьирует от пылевидных до 1–2 см. В некоторых случаях в них встречаются лейсты альбита и включения лейкоксена. Цемент – базальный, представлен гидрослюдисто-кварцевым агрегатом, в котором заключены реликты мельчайших гиалокластов. Гиалокласты в различной степени подверглись изменениям, таким как окремнение, эпидотизация, гематитизация, хлоритизация и карбонатизация, причём эти процессы проявлены неравномерно. Иногда выделяются в одном обломке более светлые участки (эпидотизированные) и тёмные (хлоритизированные). Признаки аналогичных процессов наблюдаются в цементе гиалокластических песчанников, где мелкие гиалокласты почти полностью замещены мелкозернистым кварцем.

Биогенная компонента представлена остатками бактерий сферической и нитевидной форм, фораминифер и радиолярий хорошей сохранности. Остатки сферических бактерий размером до 10 мкм замещены гематит-кварцевым материалом и представляют собой скопления округлых образований. Также наблюдаются остатки нитевидных бактерий размером до 20 мкм гематит-кварцевого состава, образующие беспорядочные скопления в основной массе. Фораминиферы гематитсодержащих алевропелитов имеют наружный диаметр до 80 мкм и внутренний диаметр до 60 мкм. Изученные экземпляры характеризуются концентрически-зональным строением, центр замещён преимущественно кварцем. Радиолярии встречаются в виде разнообразных ажурных форм величиной до 0.05 мм. Их стенки выполнены кварцем или гематит-кварцевым материалом, полость замещена гематит-кварцевым материалом или кварцем.

Минеральный состав углеродсодержащих алевропелитов Сафьяновского месторождения

Углеродсодержащие алевропелиты Сафьяновского месторождения также имеют сложный и

разнообразный минеральный состав с преобладанием кварца, глинистых минералов и рассеянного углеродистого вещества. Кластогенные компоненты – полевые шпаты, реже риодациты и обломки алевропелитов – присутствуют в подчинённом количестве. Среди второстепенных аутигенных минералов определены оксиды, силикаты, карбонаты, сульфиды, сульфосоли, сульфаты, фосфаты и самородные элементы (см. табл. 1). Слоистые силикаты по результатам рентгеноструктурного анализа представлены хлоритом, иллитом и каолинитом.

Из простых веществ (*самородных*) в алевропелитах Сафьяновского месторождения встречаются графит и золото. *Графит* очень редок, представлен тремя разновидностями. Первая – непрозрачные чёрные гексагональные чешуйки (10–50 мкм); вторая – таблитчатые в сечении зёрна около 20 мкм, третья – микрозернистые агрегаты. Первая и третья разновидности наблюдаются в глинисто-кремнистой массе. Вторая разновидность встречается в тесной ассоциации с кварцем, выполняющим прожилки. *Золото* (электрум) – одно зерно ромбовидного сечения величиной 4 мкм в кварце – имеет состав, мас. %: Au 63.42–67.73, Ag 29.73–33.41, Cu 2.51–2.87.

Из сульфидов в углеродсодержащих алевропелитах Сафьяновского месторождения обнаружены пирит, марказит, халькопирит, сфалерит, галенит, блёклые руды, акантит, пирротин, аргентит и арсенипирит.

Пирит образует фрамбоиды, конкреции и кристаллы. Фрамбоидальный пирит неравномерно рассеян в нерудной массе и образует скопления округлой формы размером около 15 мкм. Фрамбоиды пирита обычно сцементированы нерудным материалом. Они содержат включения сульфидов и нерудных минералов и, в очень редких случаях, замещаются другими сульфидами и сульфосолями. Конкреции отличаются более крупными размерами (от 2 мм до 1 см), овальной или слегка уплощённой формой. В их внутренних частях содержатся одиночные или сгустковые обособления фрамбоидального пирита, окружённые мелкозернистым пиритом или марказитом. Вокруг конкреций пирита нередко каймы кварца, чистого от включений. В разных кристаллах пирита размером от 2 до 25 мкм при травлении выявляется тонкая зональность роста. В центральном участке зерна пирита содержание As 0.06 мас. %, в периферическом – As 2.99 мас. %. В центре кристаллов есть фрамбоиды, редко – реликты грубозонального пирита, час-

тью замещённого марказитом, а также включения других минералов, захваченных при росте. В ассоциации с пиритом встречаются кварц, марказит, халькопирит, сфалерит, галенит и блёклые руды.

Марказит встречается в сростании с пиритом. *Пирротин* обнаружен в виде реликтовых удлиненно-таблитчатых или ромбовидных (в сечении) микровключений до 5 мкм в кристаллах пирита. Отмечается как ориентированное распределение включений пирротина по зонам роста в кристаллах пирита, так и хаотичное. *Халькопирит* обычно находится в ассоциации с пиритом и сфалеритом, реже образует самостоятельные зёрна до 10 мкм.

Сфалерит образует включения (от 20 до 35 мкм) и тончайшие прожилочки в пирите. Агрегат сфалерита встречается в виде кайм вокруг обломков халькопирита; особенно много такого сфалерита обнаружено в ассоциации с новообразованными выделениями галенита и теннантита. Отмечаются сростки сфалерита с обособлениями пирита.

Галенит в зёрнах до 10–15 мкм ассоциирует с конкреционным или фрамбоидальным пиритом. Наиболее часто галенит встречается в ассоциации со сфалеритом, баритом и теннантитом. *Акантит* (табл. 2, ан. 1, 2) в зёрнах сложной формы до 5 мкм, ассоциирует со сфалеритом и тетраэдритом. *Штернбергит* тонкотаблитчатый, размером около

5 мкм, со спайностью, встречается в тесном сростании с халькопиритом. *Гриноцит* (см. табл. 2, ан. 3, 4) – серовато-белые зёрна до 100 мкм – обнаружен в тесном сростании с галенитом и баритом.

Большинство образцов блёклой руды представлено железистой разновидностью – *теннантитом* с зёрнами до 5–10 мкм, ассоциирующим с галенитом и фрамбоидами и конкрециями пирита (рис. 2а). *Тетраэдрит* (зёрна до 6 мкм) высокосурьмянистый (Sb до 28.3 мас. %) и серебросодержащий (Ag до 4.8 мас. %) ассоциирует с пиритом и сфалеритом. *Фрайбергит* – высокосеребристая разновидность блёклых руд (Ag до 13.2 мас. %) – образует зёрна сложной формы до 6 мкм в основной глинисто-кремнистой массе и встречается в ассоциации с пиритом (см. рис. 2б).

Арсенопирит (табл. 3, ан. 1, 2) образует удлиненно-таблитчатые в сечении зёрна до 10 мкм в тесной ассоциации с пиритом. *Кобальтин* (см. табл. 3, ан. 3, 4) до 4 мкм встречается в ассоциации со сфалеритом и фрамбоидальным пиритом (рис. 3а). *Фармакосидерит бариевый* ($BaFe_4[AsO_4]_3 \times (OH)5 \cdot 5H_2O$) (табл. 4) – одно зерно таблитчатой формы размером около 100 мкм – развит по бариту (см. рис. 3б).

Из *оксидов*, наряду с кварцем и халцедоном, встречаются рутил и очень редко гематит. Но, как уже было отмечено, минералы кремнезёма рас-

Химический состав акантита и гринокита (мас. %)

Chemical composition of acanthite and greenockite (wt. %)

№ ан.	Минерал	S	Cu	Zn	Ag	Fe	As	Sb	Cd	Сумма
1	Акантит	14.06	4.18	2.60	77.47	0.27	0.00	0.89	–	99.47
2	Акантит	14.52	1.48	6.25	77.42	0.00	0.00	0.00	–	99.67
3	Гриноцит	22.35	–	2.18	–	–	–	–	75.34	99.87
4	Гриноцит	22.71	–	1.71	–	–	–	–	75.52	99.94

Примечание. Здесь и далее: прочерк – не обнаружено. РЭММА-202М, аналитик В.А. Котляров.

Note: Here and hereafter, dash – not determined. SEM REMMA-202M, analyst V.A. Kotlyarov.

Рис. 2. Сульфосоли в углеродсодержащих алевропелитах Сафьяновского месторождения.

а – ассоциация блёклой руды (а–f) с пиритом (Py); б – фрайбергит (Fr) и пирит в кварце. BSE-фото, СЭМ РЭММА-202М.

Fig. 2. Sulfosalts in carboniferous shales of the SaFYanovskoe deposit.

а – assemblage of fahllore (points a–f) with pyrite (Py); б – freibergite (Fr) and pyrite in quartz. BSE-image, SEM REMMA-202M.

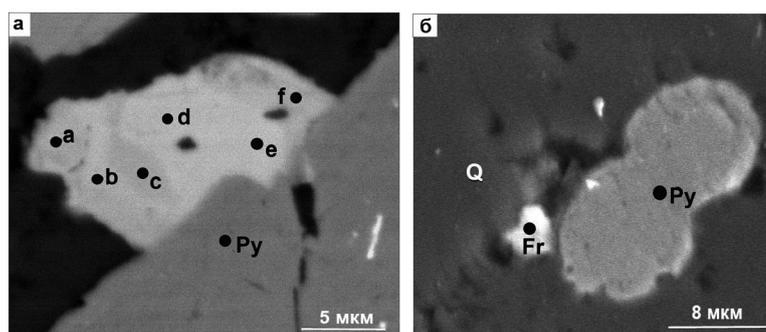


Таблица 2

Table 2

Таблица 3

Химический состав арсенопирита и кобальтина (мас. %)

Table 3

Chemical composition of arsenopyrite and cobaltite (wt. %)

№ ан.	Минерал	S	Fe	As	Zn	Co	Ni	Cu	Сумма
1	Арсенопирит	24.55	31.65	38.24	–	0.77	4.63	–	99.83
2	Арсенопирит	20.36	33.68	44.93	0.00	0.00	0.91	–	99.88
3	Кобальтин	20.76	13.60	42.54	S	5.31	15.15	1.57	99.90
4	Кобальтин	20.86	13.06	45.07	0.57	3.12	17.14	0.00	99.83

Таблица 4

Химический состав фармакосидерита бариевого (мас. %)

Table 4

Chemical composition of Ba-pharmacosiderite (wt. %)

№ ан.	FeO	As ₂ O ₅	BaO	SO ₃	ZnO	Сумма
1	25.17	35.63	8.10	–	–	68.90
2	24.71	34.26	8.34	1.04	0.39	68.75
3	25.74	35.79	8.19	–	–	69.72

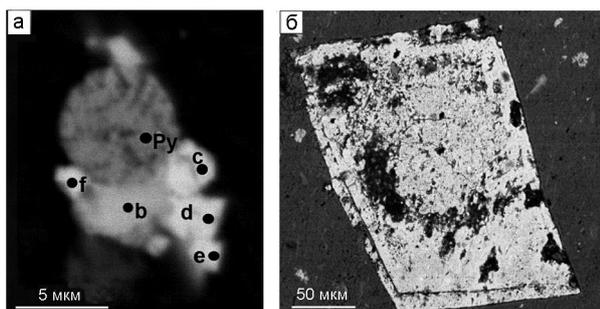


Рис. 3. Кобальтин (с–f) в срastании с фрамбоидальным пиритом (Py) (а) и псевдоморфоза бариевого фармакосидерита по бариту (б; чёрные включения – кварц). BSE-фото, СЭМ РЭММА-202М.

Fig. 3. Cobaltite (c–f) in assemblage with framboidal pyrite (Py) (a) and pseudomorphose of Ba-pharmacosiderite after barite (b). BSE-image, SEM REMMA-202M.

пространены наиболее широко. Прежде всего, они цементируют основную массу породы и замещают раковины радиолярий и фораминифер. Кварц в шлифах образует зёрна удлинённо-таблитчатой формы и выполняет прожилки в глинисто-кремнистой массе. Сегрегационный кварц присутствует в виде каёмки вокруг пиритовых конкреций. Кластогенный кварц представлен кристаллами размером до 130 мкм остроугольной и реликтовой столбчатой форм, а также в виде микровключений в гематите, апатите, хлорите и органических остатках. Халцедон бесцветный, встречается редко, замещает остатки фораминифер.

Гематит находится в виде кирпично-красных обособлений размером около 0.15 мм, выполняющих прожилки в ассоциации с кварцем. Рутил в виде мельчайших включений в пирите и, реже, в основной массе углеродсодержащих алевропелитов образует удлинённо-таблитчатые зёрна размером до 8 мкм.

Силикаты в изученных углеродсодержащих алевропелитах Сафьяновского месторождения наиболее широко распространены – это полевые шпаты, хлорит, слюды, титанит и циркон. Плаггиоклаз представлен зёрнами до 60 мкм остроуголь-

ной и реликтовой удлинённо-таблитчатой форм, иногда с полисинтетическими двойниками; некоторые зёрна сосюритизированы. Калиевый полевой шпат встречается в виде остроугольных и реликтовых призматических кристаллов до 50 мкм; в некоторых зёрнах наблюдаются пертитовые вроски. Хлорит содержится в виде желтовато-зелёных тонкочешуйчатых агрегатов с кварцем и самостоятельных таблитчатых кристаллов до 30 мкм. Слабо окристаллизованная гидрослюда (иллит) и каолинит представлены оранжево-бурыми псевдоморфными, реже чешуйчато-зернистыми агрегатами. Мусковит – бесцветные чешуйчато-зернистые агрегаты размером около 7 мкм. Титанит образует зёрна до 17 мкм клиновидной формы, циркон – субизометричные зёрна до 16 мкм в основной глинисто-кремнистой массе.

Карбонаты, фосфаты и сульфаты встречаются редко.

Кальцит обнаружен в виде остаточных кристаллов в стенках фораминифер совместно с апатитом.

Апатит до 20 мкм встречается в виде «чистых» кристаллов призматического облика и зёрен сложной формы в срastании с кварцем, реже замещает радиолярии, как отдельно, так и совместно с кварцем, в том числе образует прожилки и включения в кварце. По данным микрозондового анализа, в глинисто-кремнистой массе обнаружены ксенотим-(Y) в зернистых агрегатах до 25 мкм и монацит-(Ce) –

Таблица 5

Химический состав алюмофосфата стронция (мас. %)

Table 5

Chemical composition of Sr-alumophosphate (wt. %)

№ ан.	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	SrO	BaO	Ce ₂ O ₃	PbO	Сумма
1	27.71	32.94	0.80	0.67	33.53	0.75	0.27	0.71	97.38
2	27.14	33.76	1.84	2.39	30.76	0.34	0.75	1.15	98.12
3	27.39	32.34	1.77	2.26	30.84	0.43	0.96	1.15	97.13
4	27.44	33.74	2.29	1.27	31.61	0.36	0.89	0.70	98.30

призматические кристаллы размером около 15 мкм. *Алюмофосфат стронция* Sr_{1,5}Al₂(PO₄)₂(OH) (табл. 5) (близкий по составу к гоудкениту Sr₂Al(PO₄)₂(OH) (More et al., 1975; Новые минералы..., 1978) образует мелкие зёрна величиной около 10 мкм.

Барит в углеродсодержащих алевропелитах образует таблитчатые кристаллы размером 8–25 мкм и зёрна сложной формы с совершенной спайностью в трёх направлениях. *Ангидрит* представлен таблитчатыми кристаллами размером до 14 мкм.

Биогенная компонента углеродсодержащих алевропелитов Сафьяновского месторождения представлена остатками радиолярий, целыми и сдавленными раковинами фораминифер (Чувашов и др., 2011), остатками водорослей и спикулами губок. Радиолярии округлой формы до 50–60 мкм единичны и очень плохой сохранности, замещены кварцем и встречены в глинисто-кремнистой массе. Фораминиферы замещены апатитом с небольшими включениями кальцита и кварца.

Обсуждение результатов и заключение

Сравнительный анализ минералогии гематитсодержащих алевропелитов Александринского и углеродсодержащих алевропелитов Сафьяновского колчеданных месторождений позволил выявить особенности их минерального состава. Сходством изучаемых алевропелитов является присутствие биогенных компонентов. Биогенные компоненты гематитсодержащих алевропелитов представлены кварцевыми радиоляриями и фораминиферами, также установлены многочисленные бактериоморфные структуры гематит-кварцевого состава. Биогенные компоненты изученных углеродсодержащих алевропелитов представлены кварцевыми скелетами радиолярий, псевдоморфозами апатита по раковинам фораминифер и слабо преобразованным органическим веществом сапропелевого ряда,

иногда содержащим эвгдральный графит (Ярославцева и др., 2012). Присутствие графита в минеральном составе углеродсодержащих алевропелитов Сафьяновского месторождения необязательно является индикатором высоких ступеней метаморфизма, т. к. его образование может осуществляться на стадии мезокатагенеза при температурах ниже 200–300 °С (Прошляков, Кузнецов, 1991). Ещё один из признаков слабого метаморфизма – наличие структурной неупорядоченности в слоистых алюмосиликатах (иллите, каолините) (Грим, 1959; Murray, 1988).

В формировании гематит- и углеродсодержащих алевропелитов участвовали гиалокластические, рудокластические и биогенные компоненты в различных процентных соотношениях. Гиалокластиты кислого состава поставляли обломки фенокристаллов кварца и плагиоклаза и являлись главным источником акцессорных минералов (циркон, апатит, ксенотим и титанит), а также продуктов их преобразования (лейкоксен и алюмофосфат стронция). Хлорит, гидрослюды, каолинит, калиевые полевые шпаты, гематит и карбонаты представляют собой аутигенные продукты разложения и преобразования вулканических стекол. Особенность постседиментационных изменений осадков, содержащих органическое вещество – формирование разнообразных аутигенных фосфатных минералов (Юдович, Кетрис, 1988).

Важным источником редких рудных минералов служат примесные сульфиды и барит, поступающие, очевидно, из сульфидных турбидитов (Масленников, 2006) и сульфидно-баритовых взвесей. Кроме обломков сульфидов и барита, в изученных алевропелитах широко представлены пирит, марказит, халькопирит, сфалерит, галенит, теннантит, электрум, фрайбергит, акантит, пирротин и арсенипирит. В надрудных и подрудных горизонтах и с удалением от рудных залежей эти минералы ис-

чезают, за исключением диагенетических разновидностей пирита. В связи с этим, микровключения халькогенидов в алевропелитовых отложениях могут быть использованы при прогнозировании колчеданных месторождений и разбуривке литохимических аномалий. Полученные минералогические данные послужат основой для разработки особенностей аутигенеза металлоносных отложений, сформированных в различных окислительно-восстановительных обстановках.

Авторы выражают благодарность В.В. Масленникову, Н.Р. Аюповой, Н.П. Сафиной, П.В. Хворову, Е.Д. Зенович, Т.М. Рябухиной и В.И. Поповой за помощь в работе.

Минералогические исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-35-00425/16 мол_а. Рентгеновские исследования и изучение химического состава минералов выполнены по государственной бюджетной теме Института минералогии УрО РАН «Минералогия и геохимия рудных и рудоносных фаций как отражение геологической истории гидротермальных и гипергенных систем» № АААА-А16-116021010244-0.

Литература

- Беспяев Х.А., Полянский Н.В., Ганженко Г.Д. Геология и металлогения Юго-Западного Алтая. Алматы: Гылым, 1997. 288 с.
- Грим Р.Е. Минералогия глин. М.: Иностранная литература, 1959. 452 с.
- Зайков В.В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин. М.: Наука, 1991. 206 с.
- Зайков В.В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин (на примере колчеданосных зон Урала и Сибири). Изд. 2-ое, доп. М.: Наука, 2006. 428 с.
- Зайков В.В., Масленников В.В., Зайкова Е.В. Вулканизм и металлоносные отложения девонской островодужной системы Южного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 1993. 146 с.
- Злотник-Хоткевич А.Г. Модель формирования колчеданного оруденения в связи с явлениями субмаринного вулканизма // Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций. Новосибирск: Наука, 1988. С. 57–64.
- Коротеев В.А., Язева Р.Г., Бочкарёв В.В., Молошаг В.П., Коровко А.В., Шереметьев Ю.С. Геологическое положение и состав сульфидных руд Сафьяновского месторождения (Средний Урал). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1997. 49 с.
- Масленников В.В. Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 348 с.
- Масленников В.В. Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс: Геотур, 1999. 348 с.
- Новые минералы и первые находки в СССР // Зап. ВМО. 1978. № 3. С. 333–334.
- Прошляков Б.К., Кузнецов В.Г. Литология. М.: Недра, 1991. 444 с.
- Пуркин А.В., Денисова Т.А. Геологические критерии прогнозирования и поисков на Урале скрытых стратиформных медноколчеданных месторождений, сформированных по продуктам субмаринного выветривания базальтов. Свердловск: Уралгеология, 1987. 190 с.
- Теленков О.С., Масленников В.В. Автоматизированная экспертная система типизации кремнисто-железистых отложений палеогидротермальных полей Южного Урала. Миасс: ИМин УрО РАН, 1995. 200 с.
- Тесалина С.Г., Масленников В.В., Сурин Т.Н. Александринское медно-цинково-колчеданное месторождение (Восточно-Магнитогорская палеоостровная дуга, Урал). Миасс: ИМин УрО РАН, 1998. 228 с.
- Тесалина С.Г., Масленников В.В., Трофимов О.В. Особенности строения и состава залежи кластогенных руд Александринского медно-цинково-колчеданного месторождения // Уральский минералогический сборник № 3. Миасс: ИМин, УрО РАН, 1994. С. 131–140.
- Чувашиов Б.И., Анфимов А.Л., Сорока Е.И., Ярославцева Н.С. Новые данные о возрасте рудовмещающей толщи Сафьяновского месторождения на основе фораминифер // Доклады АН. 2011. С. 648–650.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия чёрных сланцев. Л.: Наука, 1988. 271 с.
- Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарёв В.В. Геология Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал) / Препринт. Екатеринбург: УрО РАН, 1992. 72 с.
- Ярославцева Н.С., Масленников В.В., Сафина Н.П., Лецев Н.В., Сорока Е.И. Углеродсодержащие алевропелитолиты Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения (Средний Урал) // Литосфера. 2012. № 2. С. 106–125.
- Goodfellow W.D., McCatcheon S.R. Geologic and genetic attributes of volcanic-sediment-hosted massive sulfide deposits of the Baturst Mining Camp,

Nothern New Brunswick – a synthesis // *Econ. Geol. Monograph*, 2003. Vol. 11. P. 497–512.

Hannington M.D., Scott S.D. Hydrothermal fluids and petroleum in surface sediments of Guaymas Basin, Galt of California: a case study // *Can. Mineral.* 1999. Vol. 26. Pt. 3. P. 429–888.

Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Herrington R.J., Danyushevskiy L.V., Large R.R. Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals // *Ore Geol. Rev.* 2012. Vol. 47. P. 5–41.

More P.B., Irving A.J., Kampf A.R. Foggite, goedkenite and samuelsonite: Three new species from the Palermo No. 1 Pegmatite, North Groton, New Hampshire // *Am. Mineral.* 1975. Vol. 60. P. 957–964.

Moreno C., Saez R., Gonzalez F., Almodovar G., Toscano M., Playford G., Alansari A., Rziki S., Bajd-di A. Age and depositional environment of the Draa Sfar massive sulfide deposit, Morocco // *Miner. deposita.* 2008. Vol. 43. № 8. P. 891–911.

Murray H.H. Kaolin minerals: Their genesis and occurrences // *Rev. mineral.* 1988. Vol. 19. P. 67–88.

Peter J.M., Kjarsgaard I.M., Goodfellow W.D. Hydrothermal sedimentary rocks of the Heath Steele Belt, Baturst Mining Camp, Northern New Brunswick: Part 1. Mineralogy and mineral chemistry // *Econ. Geol.* 2003. Vol. 11. P. 361–390.

Rosa C.J.P., McPhie J., Relvas J.M.R.S. Facies analyses and volcanic setting of the giant Neves Corvo massive sulfide deposit, Iberian Pyrite Belt, Portugal // *Miner. Deposita.* 2008. Vol. 43, N 4. P. 449–466.

Tornos F., Solomon M., Conde C., Spiro B.F. Formation of the Tharsis massive sulfide deposit, Iberian Pyrite Belt: geological, lithogeochemical, and stable isotope evidence for deposition in a brine pool // *Econ. Geol.* 2008. Vol. 103. N 1. P. 185–214.

Поступила в редакцию 28 июня 2016 г.