

УДК 552.57:553.435(234.852)

УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИЕ АЛЕВРОПЕЛИТЫ САФЬЯНОВСКОГО МЕДНО-ЦИНКОВО-КОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СРЕДНИЙ УРАЛ)

© 2012 г. Н. С. Ярославцева*, В. В. Масленников*, Н. П. Сафина*,
Н. В. Лещев**, Е. И. Сорока***

*Институт минералогии УрО РАН
456317, Челябинская обл., г. Миасс
E-mail: nata@ilmeny.ac.ru

**Филиал “Сафьяновская медь” ОАО “Уралэлектромедь”
623730, Свердловская обл., г. Реж

***Институт геологии и геохимии УрО РАН
620075, г. Екатеринбург, пер. Почтовый, 7

Поступила в редакцию 15.04.2011 г.

В рудовмещающей риолит-дацитовый толще Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения выделено семь рудоносных вулканогенно-осадочных горизонтов. Они представляют собой чередование углеродистых алевропелитов, тефротурбидитов, сульфидных турбидитов и их диагенитов, брекчий смешанного состава с фрагментами риодацитов, черных сланцев и колчеданных руд. В составе углеродистых отложений участвуют гиалокластогенные, рудокластические, биогенные компоненты и аутигенные продукты их преобразования. Гиалокластогенная составляющая включает многочисленные обломки кварца и плагиоклаза, псевдоморфозы хлорита, кварца, гидрослюда и каолинита по гиалокластам, калиевый полевой шпат, акцессорные минералы – циркон, апатит, ксенотим, сфен, рутил, тонкодисперсный гематит, сидерит, а также алюмофосфат стронция, близкий по составу к гоудкениту. Рудные минералы представлены обломками сульфидов и барита, а также аутигенными выделениями пирита, марказита, халькопирита, сфалерита, галенита, теннантита, фрейбергита (высокосеребристый тетраэдрит), акантита, пирротина и арсенопирита. Биогенные компоненты представлены кварцевыми радиолариями, псевдоморфозами апатита по фораминиферам и слабо преобразованным (стадия мезокатагенеза) органическим веществом сапропелевого ряда, иногда содержащим эвгедральный графит. Примесь рудной составляющей фиксируется положительными корреляциями Zn–Cd, Pb–Bi, Sb–As и Pb–Ba. Повышенные, по сравнению с данными по риодацитам, содержания РЗЭ обусловлены обилием ксенотима, апатита и фосфата стронция. Аномально высокие отношения V/Cr (2–8) указывают на анокисческие и субокисческие среды формирования. По соотношению La–Th–Sc можно предполагать, что отложение углеродистых алевропелитов происходило в бассейне зрелой приконтинентальной или энсиалической островной дуги.

Ключевые слова: *углеродсодержащие алевропелиты, Сафьяновское медно-цинково-колчеданное месторождение, Средний Урал, вулканогенно-осадочный горизонт, органическое вещество, петрогенетические модули, фациальные индикаторы.*

ВВЕДЕНИЕ

Алевропелиты, широко представленные в вулканогенно-осадочных и осадочных толщах Урала, являются чуткими индикаторами источников, обстановок и процессов осадконакопления [7, 19–21, 29, 40, 43]. Рудные тела многих колчеданных месторождений приурочены к маломощным вулканогенно-осадочным горизонтам, фиксирующим кратковременные перерывы в эффузивной деятельности, формировавшей рудовмещающие толщи. Каждый горизонт представляет собой слоистую пачку, содержащую слои сульфидных руд, гиалокластитов, алевропелитов и других вулканогенно-осадочных и осадочных отложений. По составу алевропелитов рудоконтролирующие

горизонты подразделяются на “яшмовые”, “черносланцевые” и смешанные [16]. Наиболее изученными являются яшмоносные вулканогенно-осадочные горизонты [5, 6, 8, 15, 16, 30, 37, 49, 51, 59]. Важным результатом их изучения стало выявление диагностических признаков апосульфидных (“госсанитов”) и безрудных (“джасперитов”) кремнистых окисно-железистых алевропелитов и обоснование их гальмиролитического происхождения [1, 15–17].

Гораздо менее изученными оказались колчеданосные горизонты, содержащие углеродистые алевропелиты (“черные сланцы”). Такие горизонты широко представлены на многих колчеданных месторождениях мира (Рудный Алтай, Иберийский пояс, Батурст). На Южном Урале углеродистые отложения встречаются в основном в надруд-

ных толщах колчеданных месторождений (Блявинское, Учалинское, Теренсайское и др.). На Среднем Урале они присутствуют в рудоконтролирующих вулканогенно-осадочных горизонтах метаморфизованных колчеданных месторождений (Левиха, III Интернационала и др.). В последние годы появились сведения о широком распространении углеродистых алевропелитов в рудовмещающей толще Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения [36]. Систематические данные по минеральному составу и содержанию элементов-примесей в околорудных углеродсодержащих алевропелитах отсутствуют. Сафьяновское месторождение, вскрытое карьером, не метаморфизовано [3] и поэтому является благоприятным объектом для литолого-минералогических и геохимических исследований.

Предыдущие исследования дали информацию о позиции вулканогенно-осадочных горизонтов в геологическом разрезе месторождения, о составе рудокластитов и продуктов их преобразования [32]. Оставались неизученными особенности вещественного состава углеродистых отложений, не установлена их связь с колчеданообразованием и определенными обстановками осадконакопления. Эти задачи решались на основе современных минералогических и геохимических исследований, а также реконструкций палеогеографических условий осадконакопления по литологическим и геохимическим данным [48]. В статье, на основе новых полученных результатов изучения углеродистых отложений, обсуждается возможность выявления на Урале обстановки колчеданообразования, не типичной для большинства колчеданных месторождений уральского типа.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поставленные задачи решались на основе комплекса современных геохимических, петрографических и минералогических методов, включая метод определения компонентного состава органического вещества. Главные породообразующие компоненты углеродсодержащих пород определены классическим методом силикатного анализа (Южно-Уральский центр коллективного использования по исследованию минерального сырья, ИМин УрО РАН, аналитики Т.Ф. Семенова, М.Н. Маляренко). Анализ содержаний элементов-примесей (V, Mn, Co, Cu, Zn, Ga, As, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb, Bi, U) выполнен в Институте геологии и геохимии УрО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре ELAN 9000 (г. Екатеринбург, аналитик Д.В. Киселева). Оптические исследования проводились на микроскопе Olympus BX51 в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс). Рентгеновские исследования выполнены на установках ДРОН-2.0 и

УРС-2.0 (ИМин УрО РАН, аналитик П.В. Хворов, Е.В. Зенович, Т.М. Рябухина). Химический состав минералов определялся на растровом электронном микроскопе с энергодисперсионным микроанализатором РЭММА-202МВ (ИМин УрО РАН, аналитик В.А. Котляров). Определение содержания $C_{орг}$ в породах проводилось методом термического анализа (ИМин УрО РАН, аналитик П.В. Хворов). Изучение компонентного состава ОВ углеродсодержащей породы включало определение в породе нерастворимого остатка и содержания $C_{орг}$, извлечение хлороформного (Ахл) и спиртобензольного (Асп-б) битумоидов, гуминовых кислот (ГК), определение группового состава Ахл и углеводов. Фракции насыщенных и ароматических углеводов (УВ) выделялись хроматографически и исследовались методом газо-хроматографии на комплексе Hewlett Packard 5973/6850 с квадрупольным масс-детектором и программным пакетом обработки аналитической информации (ВНИИ Океангеология, отдел нефтегазоносности Арктики и Мирового океана, лаборатория органической геохимии, г. Санкт-Петербург, аналитик В.И. Петрова).

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Сафьяновское месторождение расположено в Восточной зоне Среднего Урала в Режевском рудном районе (рис. 1а). Согласно геодинамическим

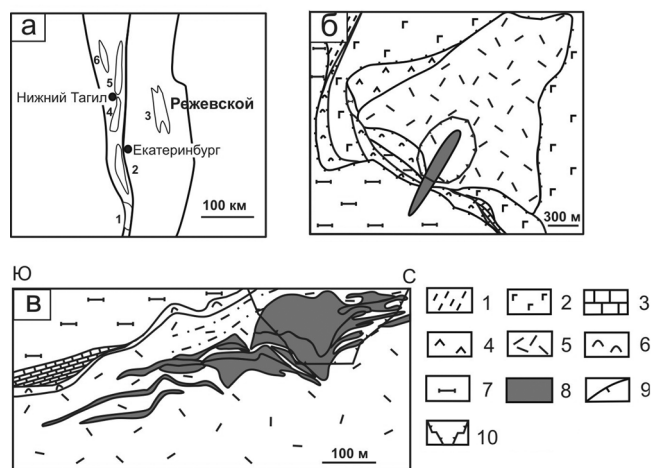


Рис. 1. Положение Сафьянского месторождения среди рудных районов Среднего Урала (а) по [16, 27], его карта-схема (б) по [46] и геологический разрез (в) по [42] с упрощениями.

а: Рудные районы: 1 – Маукский, 2 – Дегтярский, 3 – Режевской, 4 – Кировоградский, 5 – Красноуральский, 6 – Кабанский; б и в: 1 – углеродсодержащие алевропелиты; 2 – андезито-базальты; 3 – известняки; 4 – андезиты и андезито-дациты; 5 – риодациты, их лавокластиты и ксенолавокластиты; 6 – прослои вулканогенно-осадочных пород; 7 – серпентиниты; 8 – медно-цинково-колчеданная руда; 9 – главные тектонические нарушения; 10 – контуры карьера.

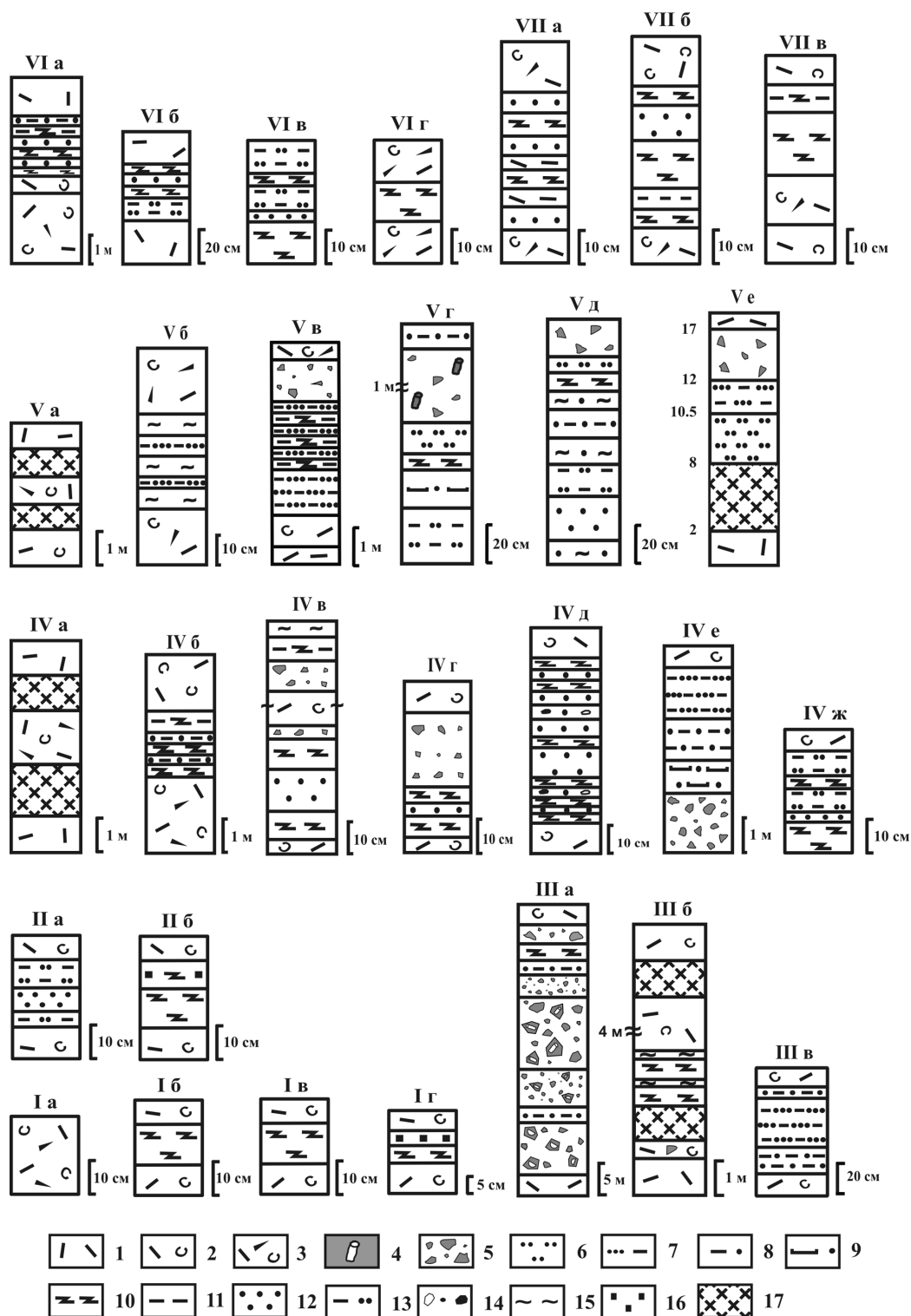


Рис. 3. Литологические колонки Сафьяновского месторождения (составили Н.С. Ярославцева, В.В. Масленников, Н.П. Сафина).

1 – риодациты, 2 – брекчии риодацитов, 3 – обломки кислых эффузивов в кварц-углеродистом матриксе, 4 – сфалерит-халькопирит-пиритовые гидротермальные руды с включениями сульфидных труб, 5 – рудокластиты, 6 – сульфидные песчаники, 7 – чередование сульфидных песчаников и углеродсодержащих алевропелитов, 8 – тонкослоистые сульфидно-углеродистые ритмиты, 9 – чередование сульфидных диагенитов с барит-кремнистыми породами, 10 – углеродсодержащие алевропелиты, 11 – кремнистые алевропелиты, 12 – вулканомиктовые песчаники, 13 – чередование вулканомиктовых песчаников с углеродсодержащими алевропелитами, 14 – полиминеральные обломки, 15 – зона рассланцевания, 16 – сульфидная вкрапленность, 17 – пирит-халькопиритовые руды.

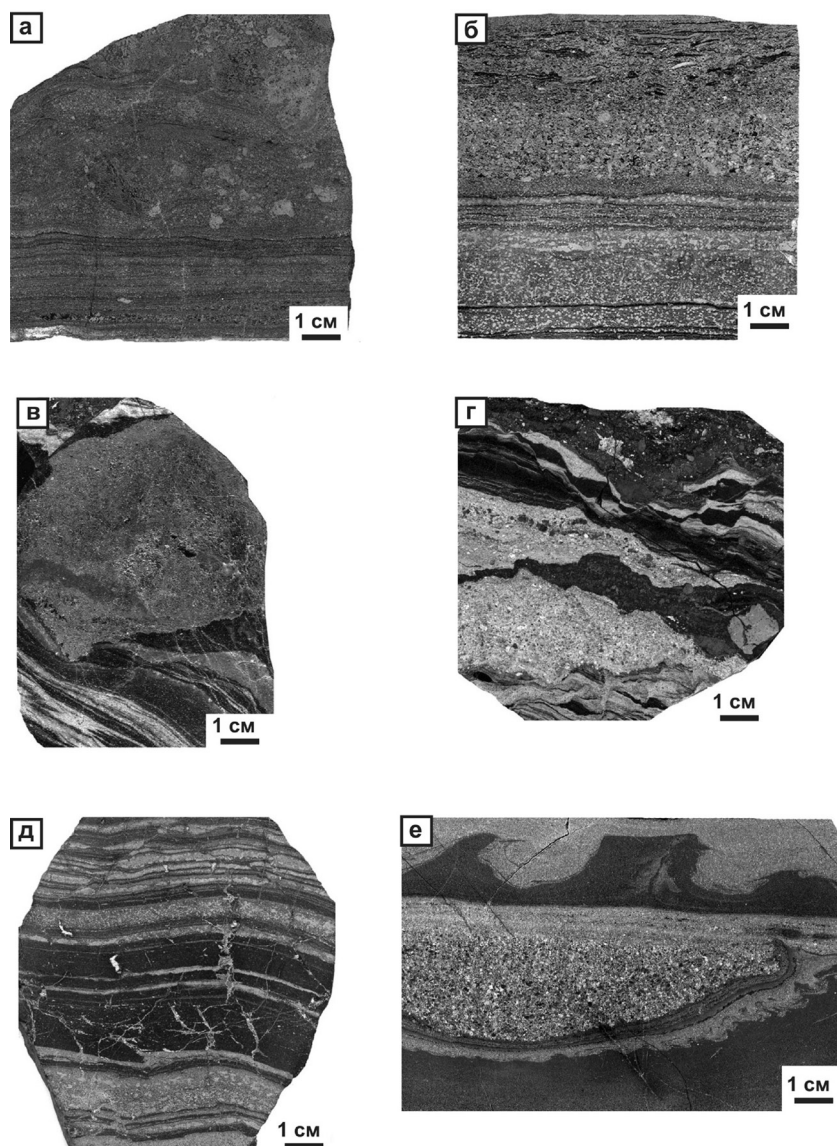


Рис. 4. Разновидности углеродсодержащих алевропелитов Сафьяновского месторождения.

а – чередование сульфидных брекчий с сульфидными диагенитами и тонкими слоями углеродсодержащих алевропелитов, литологическая колонка (л. к.) III-в; б – в верхней части образца – сульфидный песчаник, в нижней – чередование тонкообломочных сульфидно-углеродистых ритмитов, насыщенных конкрециями пирита, л. к. IV-б; в – переслаивание углеродсодержащих алевропелитов с кремнистыми алевролитами и коллювиальными брекчиями, л. к. IV-в; г – верхняя часть представлена чередованием углеродсодержащего алевропелита с вулканомиктовым песчаником с обломками кислых пород, в нижней части появляются слойки брекчий, л. к. V-в; д – переслаивание сульфидных диагенитов и углеродсодержащих алевропелитов, л. к. V-б; е – переслаивание углеродсодержащих алевропелитов с кремнистым алевролитом и вулканомиктовым песчаником, л. к. VII-б.

стых алевропелитов, а также присутствие углеродистой цементирующей массы указывают на то, что разрушались не литифицированные или слабо литифицированные осадки.

Четвертый вулканогенно-осадочный горизонт занимает основную часть колчеданной залежи. На месте его максимального раздува преобладают массивные, реже брекчиевидные пиритовые и халькопирит-пиритовые руды с заполнением межобломочного пространства окварцованным вулка-

нокластическим материалом (*литологическая колонка IV-a*). На северном фланге рудного горизонта массивные руды переходят в брекчиевидные разновидности. В их составе преобладают обломки пиритовых, реже сфалеритовых и халькопиритовых руд. В вышележащих частях рудного тела чередуются сульфидные микститы, песчаники и алевролиты.

На южном выклинивании средней рудной линзы грубообломочные сульфидные брекчии постепенно сменяются мелкообломочными рудокластитами.

В этом же направлении нарастает степень окварцевания цементирующей массы рудокластитов, появляются многочисленные пиритовые конкреции и сегрегации эвгедральных кристаллов пирита. По мере выклинивания рудной линзы нарастает количество слоев углеродистых алевропелитов.

На участке *литологической колонки IV-б* (рис. 3) тонкообломочные сульфидные слои чередуются с углеродистыми алевропелитами (рис. 4б). В нижней части колонки встречаются гиалокластиты кислого состава и обломки риодацитов, заключенные в кварц-углеродистую цементирующую массу.

На участках *литологических колонок IV-в и IV-г* (рис. 3) наблюдается переслаивание углеродистых алевропелитов с вулканомиктовыми песчаниками и сульфидными брекчиями (рис. 4в). Вулканомиктовые песчаники состоят из угловатых или сглажено-угловатых обломков кварца, плагиоклаза, сульфидной руды, риодацитов и фрагментов углеродсодержащих алевропелитов. *Литологическая колонка IV-д* характеризует верхнюю часть южного фланга рудовмещающей риодацитовой толщи и представлена чередованием черных и серых слоев углеродсодержащих алевропелитов и вулканомиктовых песчаников (рис. 3). В серых слоях концентрируются обломки барита, сульфидов и углеродсодержащих пород.

Литологическая колонка IV-е представляет северный фланг рудного тела (рис. 2). Верхняя часть колонки представлена чередованием сульфидных песчаников с углеродистыми алевропелитами, средняя – переслаиванием тонкообломочных сульфидных слоев с углеродистыми (рис. 4б) и барит-кремнистыми породами. В нижней части колонки встречаются сульфидные брекчии, заключенные в окварцованный межобломочный цемент. *Литологическая колонка IV-ж* относится к верхней части северного фланга рудовмещающей риодацитовой толщи и представлена чередованием вулканомиктовых песчаников серого цвета с углеродсодержащими алевропелитами (рис. 3).

Пятый вулканогенно-осадочный горизонт располагается в кровле сульфидного холма. Так же, как и в четвертом горизонте, на месте его максимального раздува преобладают массивные, реже брекчиевидные пиритовые и халькопирит-пиритовые руды с заполнением межобломочного пространства окварцованным вулканокластическим материалом (*литологическая колонка V-а*). На южном выклинивании рудной линзы халькопирит-пиритовые руды постепенно сменяются сульфидными песчаниками, чередующимися с углеродистыми алевропелитами и метасоматитами по риодацитам (*литологическая колонка V-б*).

На северном фланге рудного горизонта массивные руды переходят в брекчиевидные разновидности. В *литологической колонке V-в*, расположенной над центром сульфидного холма, выделяются две части, характеризующие прогрессивное строение

слоистой пачки (рис. 3). В основании и средней части колонки располагаются сульфидные средне- и мелкообломочные песчаники, переслаивающиеся с углеродистыми и кремнистыми алевропелитами, границы между сульфидными и нерудными слоями волнистые и нечеткие (рис. 4г). Верхняя часть колонки представлена сульфидными отложениями с пятнисто-брекчиевой текстурой. Слоистая пачка перекрывается измененными риодацитами с включениями рудных обломков и кварц-углеродистой цементирующей массой.

Особенностью *литологической колонки V-г* является присутствие в верхней части сульфидных брекчий, состоящих из обломков колломорфных пиритовых руд и фрагментов халькопирит-сфалеритовых труб “белых курильщиков”. Средняя часть представлена сульфидными песчаниками и углеродистыми алевропелитами, а в основании встречаются барит-кремнистые породы, сульфидные и вулканомиктовые песчаники. Основание *литологической колонки V-д* представлено вулканомиктовыми песчаниками, которые чередуются с углеродистыми алевропелитами. Выше залегают тонкослоистые сульфидно-углеродистые породы (рис. 4д). А верхняя часть – сульфидные брекчии и песчаники (рис. 3). *Литологическая колонка V-е* является верхней частью северного фланга (рис. 2 и 3). Нижняя часть колонки представлена пирит-халькопиритовыми рудами, выше расположены сульфидные песчаники. Верхняя часть – переслаивание сульфидных песчаников с углеродистыми алевропелитами и сульфидные брекчии.

Шестой и седьмой вулканогенно-осадочные горизонты являются надрудными и не имеют пространственной связи с главным рудным телом. В центральной и фланговой частях горизонтов преобладают вулканомиктовые песчаники, чередующиеся с углеродсодержащими алевропелитами. Отличительной чертой шестого горизонта является присутствие сульфидно-углеродистых отложений в *литологической колонке VI-а* (рис. 3). Седьмой горизонт отличается тем, что в *литологической колонке VII-б* встречаются образцы, где наблюдаются знаки нагрузки, которые образовались при наложении песчаного материала на не литифицированные слои углеродистых алевропелитов (рис. 4е).

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ АЛЕВРОПЕЛИТОВ

Углеродсодержащие алевропелиты Сафьяновского месторождения имеют сложный и разнообразный минеральный состав, в котором основную роль играют аутигенный кремнезем, глинистые минералы и рассеянное углеродистое вещество. Кластогенные компоненты – кварц, полевые шпаты; риодациты и обломки алевропелитов присутствуют в подчиненном количе-

стве. Среди второстепенных аутигенных минералов определены разнообразные оксиды, силикаты, карбонаты, сульфиды, сульфосоли, сульфаты, фосфаты и самородные элементы (табл. 1). Слоистые силикаты, по результатам рентгеноструктурного анализа, представлены хлоритом, иллитом и каолинитом.

Оксиды. В составе углеродсодержащих алевропелитов, наряду с кварцем и халцедоном, встречаются рутил и очень редко – гематит. Но, как уже было отмечено, минералы кремнезема распространены наиболее широко. Прежде всего, они цементируют основную массу породы и замещают раковины радиолярий и фораминифер. Эвгедральные кварц выполняет прожилки, пересекающие основную глинисто-кремнистую массу. Сегрегационный кварц присутствует в виде каемок вокруг пиритовых конкреций. Кластогенный кварц представлен кристаллами размером до 130 мкм остроугольной и реликтовой гексагональной формы. Кварц присутствует в виде микровключений в гематите, апатите, хлорите и органических остатках. Более поздний кварц замещает все минеральные фазы. *Халцедон* – единичные выполнения фораминифер.

Гематит находится в виде кирпично-красных обособлений размером около 0.15 мм, выполняющих прожилки в ассоциации с эвгедральным кварцем. *Рутил* образует мельчайшие включения в пирите, реже встречается в виде призматических кристаллов размером до 8 мкм в основной массе углеродсодержащих алевропелитов.

Силикаты. *Плагиоклаз* представлен кристаллами размером до 60 мкм остроугольной и реликтовой таблитчато-призматической форм, иногда с по-

лисинтетическим двойникованием, некоторые зерна сосюритизированы. *Калиевый полевой шпат* встречается в виде остроугольных и реликтовых призматических кристаллов размером до 50 мкм, в некоторых зернах наблюдаются пертитовые вроски. *Хлорит* в углеродсодержащих породах представлен желтовато-зелеными тонкочешуйчатыми агрегатами с примесью кварца и самостоятельными эвгедральными таблитчатыми кристаллами размером до 30 мкм. Слабо окристаллизованная *гидрослюда (иллит)* и *каолинит* слагает оранжево-бурые псевдоморфные, реже чешуйчато-зернистые агрегаты. *Сфен* образует кристаллы размером около 17 мкм клиновидной формы со спайностью, *циркон* – эвгедральные короткостолбчатые кристаллы размером до 16 мкм в основной глинисто-кремнистой массе.

Сульфиды. В углеродсодержащих алевропелитах обнаружены пирит, марказит, халькопирит, сфалерит, галенит, блеклые руды, акантит, пирротин и арсенопирит.

Пирит представлен несколькими морфоструктурными разновидностями – фрамбоиды (рис. 5а), конкреции (рис. 5б) 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 сульфидами и сульфосолями. Конкреции отличаются более крупными размерами (от 2 мм до 1 см), овальной или слегка уплощенной формой. В их внутренних частях со-

Таблица 1. Минеральный состав углеродсодержащих алевропелитов Сафьяновского месторождения

№ колонки	Минералы			Органические остатки	Содержание $C_{орг}$, %
	нерудные	рудные	акцессорные		
IV-в	<i>Q</i> (до 70%), <i>Pl</i> (до 13%), <i>Hm</i> (до 3%), <i>Sd</i> (до 48%), <i>Ba</i> (до 11%), <i>Chl</i> , <i>Il</i>	<i>Py</i> , <i>Mc</i> , <i>Chp</i> , <i>Sph</i> , <i>Gln</i> , <i>Tn</i> , <i>Fr</i> , <i>Po</i> , <i>Ars</i> , <i>Ac</i>	<i>Ti</i> , <i>Zr</i> , <i>Rut</i>		2.7–3
IV-г	<i>Q</i> (до 75%), <i>Hm</i> (до 2%), <i>Pl</i> , <i>Chl</i> , <i>Hem</i>	<i>Py</i> , <i>Mc</i> , <i>Chp</i> , <i>Sph</i> , <i>Gln</i> , <i>Tn</i> , <i>Po</i>	<i>Zr</i> , <i>Rut</i>	остатки радиолярий, фораминифер и водорослей	3
IV-д	<i>Q</i> (+халцедон) (до 70 %), <i>Kl</i> , <i>Chl</i> , <i>Hm</i> , <i>Ba</i> , <i>Hem</i> , <i>Pl</i> , <i>Ap</i> , <i>Kf</i> , <i>G</i>	<i>Py</i> ; <i>Sph</i> , <i>Mc</i> , <i>Po</i> и <i>Chp</i> в виде включений в <i>Py</i>	<i>Zr</i> , <i>Rut</i> , алюмофосфат стронция, <i>Ks</i>		2.8–3.5
VII-б	<i>Q</i> (до 80%), <i>Pl</i> , <i>Ap</i> , <i>Hem</i> , <i>Hm</i>	<i>Py</i> , <i>Mc</i> , <i>Gln</i> , <i>Sph</i> , <i>Tn</i> , <i>Chp</i>	<i>Zr</i> , <i>Rut</i>		2
VII-в	<i>Q</i> (до 80%), <i>Pl</i> (до 15%), <i>Ap</i> , <i>Hem</i> , <i>Hm</i>	<i>Py</i> , <i>Mc</i> , <i>Gln</i> , <i>Sph</i> , <i>Tn</i> , редко <i>Chp</i>	<i>Zr</i> , <i>Rut</i>		1

Примечание. *Q* – кварц, *Chl* – хлорит, *Il* – иллит, *Kl* – каолинит, *Hem* – гематит, *Ap* – апатит, *Kf* – калиевый полевой шпат, *Pl* – плагиоклаз, *G* – графит, *Hm* – гидрослюда, *Ba* – барит, *Sd* – сидерит, *Rut* – рутил, *Ti* – сфен, *Zr* – циркон, *Ks* – ксенотим, *Py* – пирит, *Mc* – марказит, *Chp* – халькопирит, *Sph* – сфалерит, *Gln* – галенит, *Tn* – теннантит, *Po* – пирротин, *Ars* – арсенопирит, *Ac* – акантит, *Fr* – фрейбергит. *Q*, *Chl*, *Hem*, *Ap*, *Kf*, *Pl*, *Cr*, *Hm*, *Ba*, *Sd*, *Rut*, *Py*, *Mc*, *Chp*, *Sph*, *Gln*, *Tn*, *Po*, *Ars* – определены оптическим методом; *Ap*, *Ba*, *Sd*, *Rut*, *Ti*, *Zr*, *Ks*, *Tn*, *Ars*, *Ac*, *Fr* – на растровом электронном микроскопе с энергодисперсионным микроанализатором; *Chl*, *Il*, *Kl*, *Hm* – рентгеновским методом; содержания $C_{орг}$ – термическим методом.

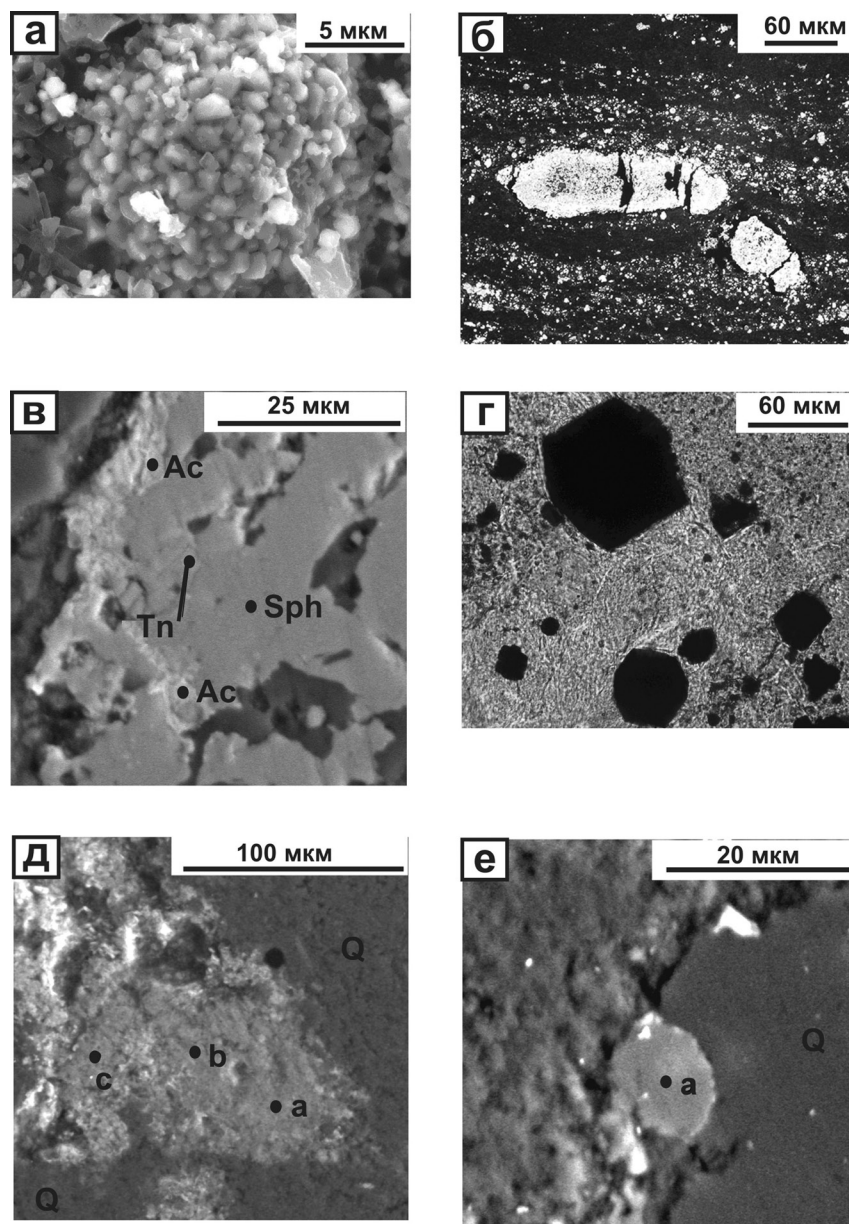


Рис. 5. Микрофотографии минералов углеродсодержащих алевропелитов Сафьяновского месторождения.

а–б – пирит: а – фрамбоидальный, б – конкреционный; в – ассоциация сфалерита (Sph), теннантита (Tn) и акантита (Ac); г – кристаллы графита с гексагональным сечением; д – ксенотим (серое) в основной глинисто-кремнистой массе (темно-серое); е – алюмофосфат стронция в основной глинисто-кремнистой массе. Фото а, в, д, е – растровый электронный микроскоп; б – отраженный свет; г – проходящий свет.

держатся одиночные или сгустковые обособления фрамбоидального пирита, окруженные мелкозернистым пиритом или марказитом. Вокруг конкреций пирита нередко каймы чистого от включений кварца, свидетельствующие о собирательной перекристаллизации пиритовых масс [13], происходящей на стадии диагенеза. В субгедральных кристаллах пирита размером от 2 до 25 мкм при травлении выявляется тонкая зональность и отчетливая секториальность роста. В ядре кристаллов содержатся включения фрамбоидов, редко реликты гру-

бозонального пирита, марказита, а также включения окружающих минералов, захваченные при росте. Встречены также псевдоморфные кристаллы пирита, которые в ряде случаев замещаются кварцем, марказитом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, блеклой рудой.

Марказит встречен в тесном срастании с кристаллическим пиритом, обнаружены также параморфозы пирита по марказиту. *Пирротин* (до 5 мкм) встречается в виде реликтовых микровключений призматической или ромбовидной формы в эв-

гедральных кристаллах пирита. Отмечается как ориентированное, так и хаотичное распределение включений пирротина по зонам роста в кристаллах пирита. *Халькопирит* обычно замещает пирит и сфалерит или находится в тесном сростании с ними. Реже образует самостоятельные псевдоморфозы размером около 10 мкм.

Сфалерит (от 20 до 35 мкм) представлен псевдоморфными и сегрегационными разновидностями. Псевдоморфный сфалерит замещает пирит. Сегрегационный сфалерит встречается в виде кайм вокруг обломков халькопирита. Особенно много сегрегационного сфалерита обнаружено в ассоциации с новообразованными выделениями галенита и теннантита. Отмечаются сростки псевдоморфного и сегрегационного сфалерита с новообразованными обособлениями пирита.

Галенит также представлен псевдоморфными и сегрегационными обособлениями размером около 10–15 мкм. Псевдоморфный галенит ассоциирует с конкреционным или фрамбоидальным пиритом. Сегрегационный галенит наиболее широко представлен в ассоциации со сфалеритом, баритом и теннантитом. *Акантит* размером около 5 мкм в виде выделений сложной формы, ассоциирует со сфалеритом и тетраэдритом (рис. 5в).

Сульфосоли. Большинство образцов блеклой руды представлено железистой разновидностью – теннантитом. *Теннантит* размером от 5 до 10 мкм, находится в тесной ассоциации с галенитом и новообразованными формами пирита (фрамбоиды, конкреции). *Тетраэдрит* (около 6 мкм) представлен высокосурьмянистой (Sb до 28.3 мас. %) и высокосеребристой (Ag до 4.8 мас. %) разновидностью и ассоциирует с пиритом и сфалеритом. *Фрейбергит* – высокосеребристая разновидность блеклых руд (Ag до 13.2 мас. %) – образует кристаллы неправильной формы размером около 6 мкм в основной глинисто-кремнистой массе, встречается в ассоциации с пиритом.

Самородные элементы. *Графит* встречается очень редко, представлен тремя разновидностями. Первая – непрозрачные черные гексагональные чешуйки размером от 10 до 50 мкм (рис. 5г); вторая – таблитчатые кристаллы около 20 мкм и третья – землистые агрегаты. Первая и третья разновидности наблюдаются в основной глинисто-кремнистой массе. Вторая разновидность встречена в тесной ассо-

Таблица 2. Химический состав золота (мас. %)

№ точки	Cu	Ag	Au	Сумма
18106b	2.82	33.41	63.42	99.65
18106c	2.87	32.49	64.39	99.75
18106d	2.51	29.73	67.73	99.97

Примечание. Анализы выполнены в ИМин УрО РАН (аналитик В.А. Котляров).

циации с кварцем, выполняющим прожилки. *Золото (электрум)* (табл. 2) образует единичные зерна октаэдрического габитуса размером 4 мкм в кварце.

Сульфаты и фосфаты. *Барит* в углеродсодержащих алевропелитах образует таблитчатые кристаллы размером от 8 до 25 мкм и зерна сложной формы с совершенной спайностью в трех направлениях. *Апатит* размером до 20 мкм встречается в виде “чистых” кристаллов призматического облика и зерен сложной формы, в сростании с кварцем, реже замещает скелеты радиоларий, как отдельно, так и совместно с кварцем, в том числе образует прожилки и включения в кварце. По данным микрозондового анализа, в глинисто-кремнистой массе обнаружен *ксенотим* (YPO_4) (рис. 5д) в виде зернистых агрегатов размером около 25 мкм. *Алюмофосфат стронция* $\text{Sr}_{1.5}\text{Al}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})$ (близкий по составу к гоудкентиту $\text{Sr}_2\text{Al}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})$) (табл. 3) [25, 55] образует мелкие зерна неправильной формы размером около 10 мкм (рис. 5е).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Породообразующие элементы

Высокое содержание кремнезема (до 85%) (табл. 4) в углеродсодержащих алевропелитах Сафьяновского месторождения связано в основном с присутствием гиалокластогенной составляющей и обломков кварца. Другим источником кремнезема служат кремневые скелеты биогенных остатков, обнаруженные в породе в большом количестве. Содержание TiO_2 варьируют от 0.07 до 0.32%. Повышенное содержание TiO_2 наблюдается в углеродистых алевропелитах колонки IV-д, где обнаружено максимальное для изучаемых пород количество $\text{C}_{\text{орг}}$ (3.5%). Часть титана, входящая в состав иллита и каолинита поступала совместно с гиалокластоген-

Таблица 3. Химический состав алюмофосфата стронция $\text{Sr}_{1.5}\text{Al}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})$ (мас. %)

№ п/п	№ точки	Al_2O_3	P_2O_5	SO_3	CaO	SrO	BaO	Ce_2O_3	PbO_2	Сумма
1	17267a	27.71	32.94	0.80	0.67	33.53	0.75	0.27	0.71	97.38
2	17267b	27.14	33.76	1.84	2.39	30.76	0.34	0.75	1.15	98.12
3	17267c	27.39	32.34	1.77	2.26	30.84	0.43	0.96	1.15	97.13
4	17267d	27.44	33.74	2.29	1.27	31.61	0.36	0.89	0.70	98.30
5		13.7	34.9	н/о	11.4	32.7	н/о	н/о	н/о	92.7

Примечание. 1–4 – анализы выполнены в ИМин УрО РАН (аналитик В.А. Котляров); 5 – по [55]; н/о – элемент не обнаружен.

Таблица 4. Содержание главных породообразующих окислов (масс. %) в углеродсодержащих алевропелитах

№ колонки	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
IV-б	62.60	0.29	18.11	3.35	0.84	0.01	1.65	0.63	0.22	3.10	0.38
	70.66	0.19	15.44	1.13	0.52	0.01	0.90	1.32	0.22	2.53	0.07
	66.33	0.20	13.42	2.28	2.61	0.05	1.17	0.08	0.22	3.38	0.08
IV-в	81.62	0.23	5.88	2.31	1.21	0.01	0.67	0.19	0.22	1.44	0.07
	82.02	0.07	8.69	0.48	0.96	0.01	0.65	0.22	0.22	1.18	0.05
	81.10	0.18	10.26	0.67	0.49	0.01	0.48	0.29	0.22	0.58	0.16
IV-г	81.58	0.26	8.22	0.68	0.34	0.01	0.58	0.57	0.22	1.19	0.61
	84.64	0.15	7.20	0.85	0.54	0.01	0.44	1.00	0.22	0.93	0.09
	83.16	0.27	7.39	0.81	0.25	0.01	0.62	0.54	0.30	1.58	0.08
IV-д	80.76	0.32	7.05	1.08	0.34	0.01	1.04	1.46	0.99	2.02	0.22
	79.84	0.27	8.85	0.60	0.59	0.01	1.06	1.24	1.04	2.05	0.12
	82.92	0.13	2.91	6.48	0.64	0.03	0.06	0.03	0.22	0.67	0.03
VII-б	82.25	0.12	3.02	5.96	0.34	0.01	0.09	0.60	0.22	0.55	0.53
	79.38	0.14	4.11	6.81	0.85	0.01	0.07	0.05	0.22	1.12	0.05

Примечание. Анализы выполнены в Южно-Уральском центре коллективного пользования по исследованию минерального сырья, ИМин УрО РАН, г. Миасс; аналитик Ю.Ф. Мельнова.

ным материалом в виде лейкоксена. Другая часть, вероятно, могла фиксироваться органическим веществом в виде рутила. [43]. **Вариации в количестве** Al₂O₃ (2.91–18.11%), K₂O (0.55–3.38%) и MgO (0.09–1.65%) (табл. 4) отражают изменения процентного содержания слюды и хлорита в составе углеродистых алевропелитов. Изменения содержания Fe₂O₃ (0.48–6.81%) вызваны в основном вариациями в количестве сульфидов. Повышенные содержания CaO в колонках IV-б (CaO – до 1.32%) и IV-д (CaO – 1.46%) **отражают присутствие кальцита** и апатита. Высокое содержание Na₂O (1.04%) отмечено в колонке IV-д, что связано с реликтами альбита. Высокие содержания P₂O₅ (до 0.61%) (табл. 4) в некоторых образцах углеродистых алевропелитов связаны с присутствием апатита.

Петрохимические модули (гидролизатный, алюмокремневый и закисный) дают возможность более точно проводить классификацию пород, восстанавливать петрогенетический характер источников сноса, реконструировать физико-химические и геодинамические особенности обстановок осадконакопления [33, 43]. По величине гидролизатного модуля – ГМ = (Al₂O₃ + TiO₂ + Fe₂O₃ + FeO)/SiO₂ углеродсодержащие отложения Сафьяновского месторождения попадают в поле гипосилитов (глинисто-кремнистых пород, ГМ = 0.1–0.21). По значениям алюмокремневого модуля (АМ = Al₂O₃/SiO₂) – в группу гипоглиноземистых пород (АМ < 0.25). Интерпретация закисного модуля (ЗМ = FeO/Fe₂O₃) показала преобладание FeO (1.04–5.24 мас. %) над Fe₂O₃ (0.24–1.98 мас. %), что указывает на восстановительные условия формирования осадка.

Одним из фациальных индикаторов для осадочных отложений является отношение железа и марганца (Fe/Mn) [19, 47]. По значениям этого отношения (21–79) углеродсодержащие алевропелиты Сафьяновского месторождения образовались в пере-

ходной зоне между мелководными и мелководными обстановками.

Элементы-примеси

Углеродсодержащие алевропелиты рудных горизонтов Сафьяновского месторождения, в сравнении с кларками черных сланцев [44] (табл. 5), характеризуются аномально высоким содержанием рудных (Cu, Zn, As, Cd, Sb, Pb, Bi, Sn) и литогенных (Mn и Ba) элементов. В то же время, особенностью геохимии колонки IV-д, находящейся на удалении от рудного тела, является низкое содержание рудных элементов, при сохранении повышенных содержаний Ba и аномально высоких количеств U (табл. 5, рис. 2). Углеродсодержащие алевропелиты седьмого горизонта (колонки VII-б, в), характеризуются более низкими содержаниями рудных элементов при повышенном содержании Ba (табл. 5).

Полученные материалы сравнительного минералогического-геохимического анализа надрудных и рудоконтролирующих углеродсодержащих алевропелитов Сафьяновского месторождения показывают их вещественное родство по минеральному составу, элементам-примесям и их ассоциациям. Различия заключаются в количественном содержании рудных элементов и органического вещества. Так, в ряду от литологической колонки IV-в к колонкам IV-г → IV-д (по направлению от рудного тела) в углеродсодержащих отложениях наблюдается закономерное уменьшение содержаний (в г/т): Mn, Cu, Zn, As, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb, Bi и увеличение количества C_{орг} (табл. 5).

Обогащенность металлами изученных углеродсодержащих отложений обусловлена концентрацией в них ОВ и халькогенидов при седиментогенезе (ресурсная функция углеродсодержащих пород) и их вторичным накоплением на окислительно-восстановительном геохимическом барьере, соз-

Таблица 5. Средние содержания элементов-примесей (г/т) в углеродсодержащих алевропелитах Сафьяновского месторождения в сравнении с кларками черных сланцев

№ колонки	1 (4)	2 (3)	3 (11)	4 (6)	5
	IV-в	IV-г	IV-д	VII-б + VII-в	
V	122.7	73.4	246.1	148.6	400
Mn	1121.8	91.4	61.9	40.5	800
Co	7.4	5.4	1.2	4.1	30
Cu	2057.6	1090.8	42.1	131.1	150
Zn	44818.9	3881.6	344.8	293.1	300
Ga	18.1	13.4	13.1	18.2	25
As	1092.9	264.6	116.9	84.5	80
Cd	715.1	12.1	11.05	1.4	7
Sn	37.3	0.0	1.96	—	10
Sb	424.9	170.8	9.6	59.2	11
Ba	3049.9	1590.9	2225.7	1195.3	800
Pb	2530.8	1434.6	46.5	91.6	40
Bi	6.5	3.4	0.34	1.0	2.5
U	11.6	6.6	77.8	14.8	25
C _{орг}	2.7	3	3	2	—

Примечание. 5 – по данным [44]. Жирным шрифтом выделены аномальные содержания элементов-примесей. В скобках – количество анализов.

даваемом углеродистым веществом на путях фильтрации металлоносных растворов [44]. В рудоконтролирующих горизонтах основным источником металлов является примесь рудокластического материала [31].

На бинарных диаграммах (рис. 6), показывающих аномальные содержания рудных элементов, Mn и Ba (табл. 5), видно, что содержания элементов-примесей (Cd–Zn, Bi–Pb, As–Sb, Ba–Pb) характеризуются прямой зависимостью. На диаграмме Cd–Zn (рис. 6а) углеродсодержащие алевропелиты Сафьяновского (литологическая колонка (л.к.) IV-д), Блявинского и Учалинского месторождений обособлены в единую область, а отложения л.к. IV-в, -г Сафьяновского месторождения характеризуются более высокими содержаниями Zn и Cd. Диаграмма Ba–Pb (рис. 6б) показывает, что изученные углеродсодержащие породы образуют два поля: 1 – с высокими содержаниями Pb и Ba (Сафьяновское месторождение, л.к. IV-в, IV-г и часть образцов л.к. IV-д); 2 – с пониженными содержаниями (фоновые углеродсодержащие породы надрудных толщ из районов месторождений Блявинское и Учалинское). На диаграмме Bi–Pb (рис. 6в) углеродсодержащие

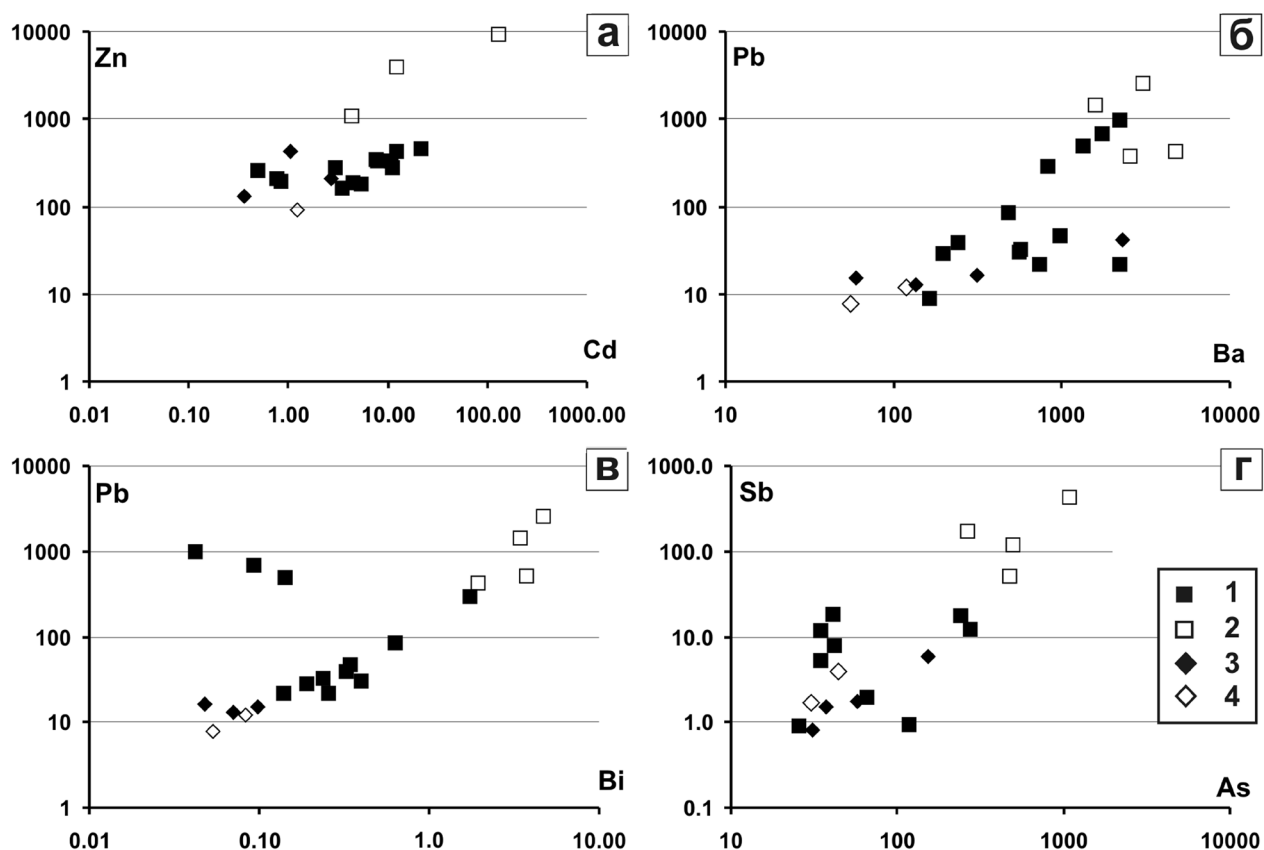


Рис. 6. Диаграммы Cd–Zn, Ba–Pb, Bi–Pb и As–Sb для углеродсодержащих алевропелитов колчеданных месторождений.

1–2 – рудовмещающая толща, Сафьяновское м-ние, литологические колонки: 1 – IV-д; 2 – IV-б, в; 3–4 – надрудная толща, месторождения: 3 – Блявинское, 4 – Учалинское.

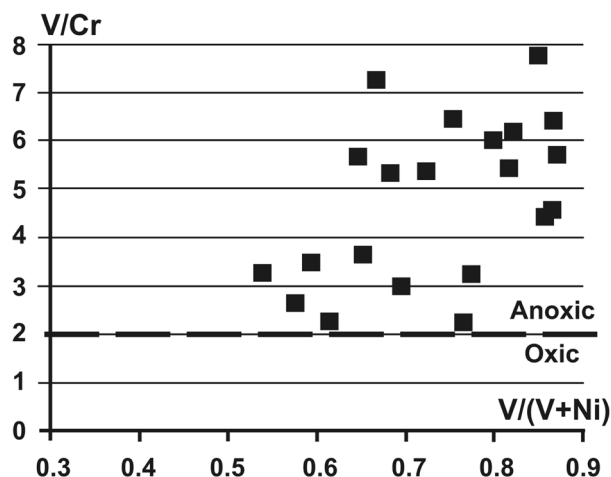


Рис. 7. Реконструкция окислительно-восстановительных обстановок по [54] для углеродсодержащих пород Сафьяновского месторождения.

Граница между кислородсодержащей и бескислородной сред по (Jones and Manning, 1994), показана пунктиром.

алевропелиты обособляются в три поля: 1 – с высокими содержаниями Pb, но низкими содержаниями Bi (Сафьяновское месторождение, л.к. IV-д); 2 – с высокими содержаниями Pb и Bi (Сафьяновское месторождение, л.к. IV-в и -г); 3 – с пониженными содержаниями Pb и Bi (фоновые углеродсодержащие породы надрудных толщ из районов месторождений Блявинское и Учалинское). На диаграмме As-Sb (рис. 6г) углеродсодержащие породы Сафьяновского (л.к. IV-в и -г) месторождения характеризуются высоким содержанием As и Sb, тогда как другие углеродсодержащие отложения – более низкими.

Геохимические данные (фациальные индикаторы), как и литохимические, позволяют во многих случаях провести более точную реконструкцию фациальных и тектонических особенностей накопления осадков. По их интерпретации могут быть получены сведения о фациальных обстановках накопления осадков (глубина области осадконакопления, солёность, окислительно-восстановительные особенности придонного слоя воды и др.) [19, 47, 54, 57 и др.]. Реконструкция окислительно-восстановительных обстановок по соотношению молибдена и марганца (Mo/Mn – коэффициент стагнации = $0.0n-0.n$) показывает, что изученные алевропелиты формировались в бескислородной среде, что подтверждается диаграммой $\text{V/Cr}-\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ [54] (рис. 7).

Изученные углеродсодержащие алевропелиты рудного горизонта (сумма РЗЭ = 283.6 г/т), в сравнении с вмещающими их риодацитами (сумма РЗЭ = 46.1 г/т), характеризуются обогащением редкоземельными элементами (рис. 8). Это можно связать с присутствием в минеральном составе алюмофос-

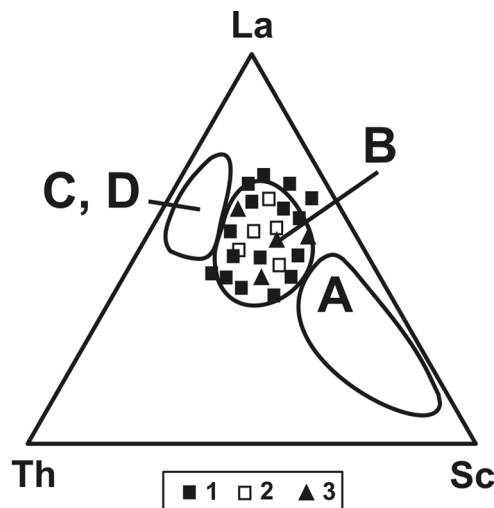


Рис. 9. Диаграмма Th–La–Sc [48].

Поля: А – юных (океанических) островных дуг; В – зрелых (приконтинентальных) островных дуг; С – активных континентальных окраин; D – пассивных окраин. Месторождения: 1 – Сафьяновское; 2–3 – Рудный Алтай: 2 – Артемьевское, 3 – Николаевское.

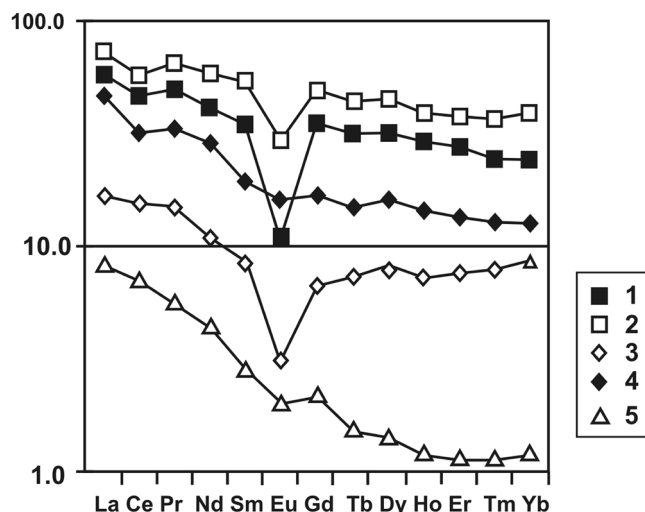


Рис. 8. Распределение РЗЭ, нормированных на хондрит по [53].

1–3 – Сафьяновское месторождение: 1–2 углеродсодержащие алевропелиты, литологические колонки IV-д (1) и IV-г (2), 3 – вмещающие риодациты; 4–5 – углеродсодержащие алевропелиты Блявинского (4) и Учалинского (5) месторождений.

фата стронция $\text{Sr}_{1.5}\text{Al}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})$ и ксенотима YPO_4 , которые не встречаются в других углеродсодержащих отложениях колчеданных месторождений. В целом, наблюдается обогащение легкими РЗЭ, отрицательная аномалия Се и отчетливая отрицательная аномалия Eu, как и в вулканитах рудовмещающей толщи данного месторождения.

На диаграмме Th–La–Sc (рис. 9), построенной для реконструкции тектонических обстановок на-

копления по малым и редкоземельным элементам, углеродсодержащие алевропелиты Сафьяновского месторождения образуют компактную группу, указывающую на источник из зрелой островной дуги.

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО (ОВ)

В результате исследований образцов углеродсодержащих алевропелитов методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) (лаборатория физики минералов Казанского госуниверситета и лаборатории физико-химических методов исследования ИГГ УрО РАН, аналитик Ю.В. Щапова) на спектрах ЭПР после отжига до 350°C появлялся сигнал в области углеродных радикалов (Rc-org) с широкой линией спектра. Это может свидетельствовать о наличии остатков ОВ, метаморфизованного в низкотемпературных условиях (<300°C). При съемке образца, нагретого до 600°C, появлялся слабый сигнал Rc-org с узкой линией спектра. Сигналы с такими параметрами свойственны остаткам ископаемого ОВ животного происхождения. На электронно-микроскопических снимках прожилков углеродистого вещества в углеродистой породе, выполненных в КГУ на растровом электронном микроскопе РЭММА-202М (аналитик Е.В. Нуждин), наблюдается структурно-однородная черная поверхность с раковистым изломом, что характерно для витринита. Возможно, углистый материал находился на низкой (буроугольной) стадии метаморфизма, и сейчас представлен фюзенизированными (инертинитовыми) и витринизированными (гелифицированными) растительными остатками и растворимыми соединениями, изначально входившими в состав липоидных микрокомпонентов смол [36].

По результатам термического анализа (ИМин УрО РАН, аналитик П.В. Хворов), содержание $C_{орг}$ в изученных алевропелитах достигает 3.5% (табл. 1). ОВ представлено агрегатами бурого и черного цвета округлой формы. Основные молекулярные характеристики ОВ приведены в табл. 6. Анализ данных показывает, что, несмотря на достаточно высокое содержание $C_{орг}$ и хлороформенного битумоида (ХБА), ОВ находится на высокой стадии преобразования (ООВ > 99%). На это указывает и отсутствие гуминовых кислот. Показатель β ($A_{хл}/C_{орг} \times 100$) (коэффициент битуминозности) – основной при выявлении генетического типа битумоида, его сингенетичности или эпигенетичности по отношению к вмещающим породам. В случае сингенетичной битуминозности его величина не превышает 5–10. В изученных породах значения β не превышает 1, а преобладание спиртобензольного битумоида (Асп-б) на хлороформным (Ахл) свидетельствуют о значительной окисленности ОВ. Содержание углеводов (УВ) в породе и ОВ близки к кларковым, а их групповой состав, с практически равным соот-

ношением алифатических и ароматических соединений, может быть обусловлен высокой степенью ароматизации исходного органического материала.

Характеристика углеводородных молекулярных маркеров (изучение молекулярного состава метано-нафтенной и ароматической фракций битумоидов) проводилась для выявления особенностей генезиса и уровня преобразования РОВ (рассеянное ОВ).

Нормальные алканы и изопреноиды. На основе молекулярного состава н-алканов и изопреноидов в породах (рис. 10) можно предположить преимущественно сапропелевый генезис исходного ОВ, на что указывает мономодальный характер распределения с подавляющим доминированием низкомолекулярных соединений (C_{15-19}). Значения коэффициентов нечетности (OEP_{17} и OEP_{27}), близкие к 1, свидетельствуют о высокой степени преобразованности н-алканов и ОВ в целом. Соотношение изопреноидов (Пр/Фт < 2), характерно для морских условий осадконакопления.

Терпаны и стераны. Распределение циклановых углеводородов в изученных образцах пород также показывает преимущественно сапропелевый генезис исходного ОВ. Отсутствие в составе терпанов биогепанов ($\beta\beta$ -изомеров) сви-

Таблица 6. Компонентный состав ОВ углеродсодержащих алевропелитов Сафьяновского месторождения

		Л.к. IV-е	Л.к. IV-г
Содержание в породе, %	Н.О.	90.95	98.68
	CaCO ₃	9.05	1.32
	C _{карб}	1.09	0.16
	C _{орг} в н.о.	2.60	2.22
	C _{орг} /порода	2.86	2.25
	ОВ	3.72	2.92
	Ахл	0.006	0.003
	Асп-б	0.010	0.011
	ГК	0.00	0.00
Групповой состав ОВ, %	Ахл	0.17	0.09
	Асп-б	0.27	0.38
	ГК	0.00	0.00
	ООВ	99.6	99.5
β		0.22	0.12
Состав Ахл, %	масла	31.6	32.1
	смолы	64.9	67.9
	асфальтены	3.5	0.0
УВ, %	в породе	0.002	0.001
	в ОВ	0.05	0.03
Состав УВ, %	Me-Nf	58.8	55.6
	Ar	41.2	44.4
Me-Nf, %	в породе	0.0013	0.0005
	в породе	0.0008	0.0004

Примечание. Навеска осадка 100 г; л.к. – литологическая колонка; н.о. – нерастворимый остаток; Ахл – хлороформный битумоид; Асп-б – спиртобензольный битумоид; ГК – гуминовые кислоты; β – коэффициент битуминозности; УВ – углеводороды; Me-Nf – метано-нафтенная фракция углеводородов; Ar – ароматическая фракция углеводородов.

детельствует о значительной (постдиагенетической) степени преобразования ОВ. Это подтверждают и значения гопановых коэффициентов зрелости РОВ (Ts/Tm , $22S/22S + 22R C_{31}$). Соотношения трициклических терпанов к $C_{30}\alpha\beta$ -гопану может служить показателями состава исходного органического материала [60]. Эти коэффициенты увеличиваются с увеличением роли ОВ морского генезиса. Полученные данные, свидетельствуют о существенной роли “морского” гидробионтного ОВ в исходном органическом материале.

Данные по распределению стеранов дополняют геохимическую картину и дают дополнительную информацию о типе РОВ и степени его зрелости. В гомологическом ряду стеранов (C_{27} – C_{30}) изученных образцов преобладают холестераны (C_{27}), отражающие вклад гидробионтов в состав исходного ОВ. На определение генетического типа исходного РОВ нацелены и соотношения регулярных и перегруппированных изомеров в гомологическом ряду стеранов. Эти данные хорошо согласуются с приведенными выше для алканов и терпанов.

Полиароматические углеводороды (ПАУ). Следует отметить, что уникальной особенностью изученных образцов является не только аномально высокое содержание полиароматических соединений (ПАУ), но и то, что в составе фракции ароматических УВ они составляют более 90%. Причем, в отличие от обычных метаморфизованных углеродистых отложений, в изученных образцах преобладают незамещенные (голаядерные) конденсированные полиароматические соединения с 4–6 кольцами.

Такой тип распределения ПАУ позволяет говорить о том, что исходное ОВ претерпело специфическую трансформацию (ароматизацию) под воздействием повышенных температур. По стерановым коэффициентам зрелости можно предположить, что для изученных образцов степень трансформации ОВ соответствует мезокатагенезу.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные текстурные и минералогическо-геохимические данные показывают, что углеродистые алевропелиты несут ценную информацию об источниках вещества и процессах, происходивших в бассейне колчеданообразования, в том числе об обстановках седиментогенеза, условиях диагенеза, катагенеза и метаморфизма. В составе углеродистых отложений участвуют гиалокластогенные, рудокластические, биогенные компоненты и аутигенные продукты их преобразования.

Судя по минеральному составу, основным источником “фонового” вещества углеродистых алевропелитов являются гиалокластитовые тефroidы кислого состава. Это подтверждается относи-

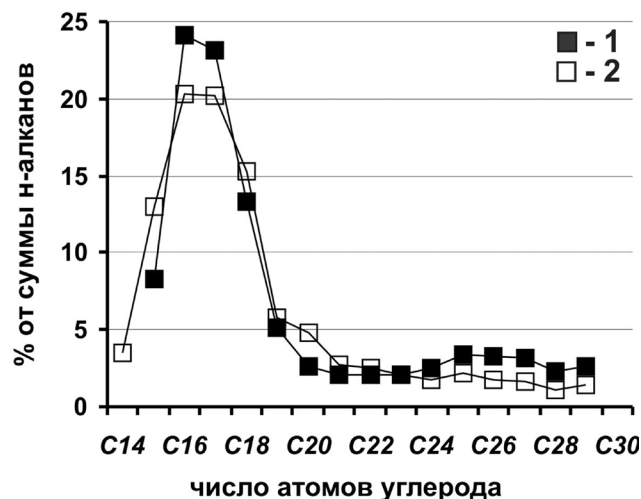


Рис. 10. Распределение н-алканов в углеродсодержащих алевропелитах Сафьяновского месторождения.

ЛитоLOGические колонки: 1 – IV-д; 2 – IV-в.

тельным обогащением углеродистых алевропелитов легкими РЗЭ, свидетельствующими о весомом вкладе кислого вулканокластического материала. Аналогичные тренды РЗЭ имеют углеродсодержащие отложения других колчеданных месторождений Урала, ассоциирующие с кислыми вулканитами. Псаммитовые и пелитоморфные тефротурбидиты поставляли обломки фенокристаллов кварца и плагиоклаза, аутигенные продукты разложения и преобразования вулканических стекол – хлорит, гидрослюда, каолинит, калиевые полевые шпаты, тонкодисперсный гематит, сидерит и криптозернистый кварц. Гиалокластиты кислого состава служили источником акцессорных минералов, таких как циркон, апатит, ксенотим, сфен, а также продуктов их преобразования, к которым относятся рутиловый лейкоксен и алюмофосфат стронция, близкий по составу к гоудкенину. По ассоциации с гиалокластическими тефroidами кислого состава, углеродистые алевропелиты близки к черносланцевым углеродистым отложениям колчеданополиметаллических месторождений Рудного Алтая (Казахстан), Иберийского пояса (Испания) и колчеданосной провинции Батурст (Канада), которые формировались в эпиконтинентальных морях или задуговых бассейнах энсиалических островных дуг [2, 16, 27, 49, 51, 59]. От шельфовых кварцевых и кварц-полевошпатовых песчаников золоторудных месторождений черносланцевой ассоциации они отличаются обилием хлорита и гидрослюда, характеризующих преобразованный в морской воде вулканогенный источник вещества. В углеродистых алевропелитах и ассоциирующих с ними вулканомиктовых отложениях отсутствуют терригенные обломки метаморфиче-

ских и других пород, которые могли бы свидетельствовать о размыве суши.

Среди обломочных пород встречаются гравититы – тефротурбидиты и сульфидные турбидиты, характеризующиеся отчетливыми знаками нагрузки на нижележащие слои не литифицированных углеродистых алевропелитов. Хорошая сохранность градиционной горизонтальной слоистости, отсутствие знаков ряби и косоволнистой слойчатости свидетельствуют не в пользу мелководных условий осадконакопления, которые предполагаются в ряде работ [41]. Признаки слабой литификации указывают на высокие скорости осадконакопления в условиях расчлененного рельефа или высокой сейсмичности. Лишь в некоторых случаях знаки нагрузки напоминают штормовые знаки, что может подразумевать умеренные глубины осадконакопления. Минимальная глубина формирования черных курильщиков, сульфидные трубы которых часто встречаются в рудах Сафьяновского месторождения [18], должна была составлять не менее 900 м [50]. Вероятно, глубина осадкообразования составляла около 1 км, что соответствует средней глубине кислородного минимума, характерной для современных океанов [24, 39]. Эта глубина, очевидно, была меньше глубин формирования черных курильщиков Южно-Уральского региона, ассоциирующих с яшмами.

По геохимическим реконструкциям обстановок осадконакопления, значения индикатора Fe/Mn уменьшаются с увеличением глубины и с переходом от шельфовых фаций к пелагическим, т.е. возрастание величины отношения Fe/Mn указывает на обмеление и опреснение бассейна [19, 47]. Исходя из значений отношения Fe/Mn, осадочные породы могут быть разделены на следующие группы: глубоководные ($\text{Fe/Mn} < 40$); мелководные ($40 < \text{Fe/Mn} < 80$); прибрежно-морские с доминированием терригенного материала ($\text{Fe/Mn} > 80 \dots \sim 160$). По значениям Fe/Mn (21–79) углеродистые алевропелиты Сафьяновского месторождения могли формироваться в переходной зоне, на границе мелководных и глубоководных условий. Эти глубины осадконакопления являются более реальными для изученных пород. На диаграмме Th–La–Sc (рис. 9) фигуративные точки углеродистых алевропелитов Сафьяновского месторождения попадают в поле углеродистых отложений колчеданно-полиметаллических месторождений алтайского типа, сформированных в эпиконтинентальных или задуговых морях энсиалической островной дуги.

Вместе с тем, следует заметить, что химический состав изученных алевропелитов не в полной мере отражает состав рудовмещающих вулканитов. Например, углеродистые алевропелиты Сафьяновского месторождения отличаются аномально высокими содержаниями РЗЭ по сравнению с рудовмещающими эффузивами. Не исключено, что обогащение РЗЭ связано с процессами накопления остаточных и аутигенных фосфатов на стадии раннего ди-

агенеза углеродистых пелитоморфных осадков. Вероятно, направление этого процесса в органических илах было противоположным по сравнению с процессами формирования яшм, сопровождавшимися выносом РЗЭ [17]. Вопрос требует дальнейших исследований.

Вторым по значимости источником вещества являются примесные сульфиды и барит, поступавшие, очевидно, из сульфидных турбидитов и сульфидно-баритовых взвесей. Кроме обломков сульфидов и барита в углеродистых алевропелитах широко представлены аутигенные выделения пирита, марказита, халькопирита, сфалерита, галенита, теннантита, электрума, фрейбергита, акантита, пирротина и арсенопирита. В надрудных и подрудных горизонтах и с удалением от рудных залежей эти минералы, за исключением диагенетических разновидностей пирита, исчезают. Вместе с тем, эти разновидности пирита преобладают в рудоконтролирующих вулканогенно-осадочных горизонтах данного геологического разреза.

Важная роль колчеданной составляющей доказывается геохимическими данными. Примеси рудного вещества фиксируются повышенными содержаниями и положительными корреляциями Zn–Cd, Pb–Bi, Sb–As и Pb–Ba (рис. 6), характерными для колчеданных руд. При приближении к рудным залежам в углеродистых алевропелитах наблюдается увеличение содержаний Mn, Cu, Zn, As, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb и Bi. Несмотря на то, что фоновые углеродсодержащие осадки нередко характеризуются мощными геохимическими аномалиями P, U, Mo, V, Re, Se, Zn, Cu, Hg и многих других элементов, связанных с органическим веществом, углеродистые алевропелиты Сафьяновского месторождения отличаются еще более высокими содержаниями элементов-примесей колчеданной ассоциации, по сравнению с кларками черных сланцев [44] (табл. 5).

Биогенные компоненты представлены кварцевыми скелетами радиолярий, псевдоморфозами апатита по раковинам фораминифер и слабо преобразованным в стадию мезокатагенеза органическим веществом сапропелевого ряда, иногда содержащим эвгедральный графит. Присутствие графита в минеральном составе алевропелитов Сафьяновского месторождения не обязательно является индикатором высоких ступеней метаморфизма, т.к. его образование может осуществляться на стадии мезокатагенеза при температурах ниже 200–300°C [28]. Отсутствие метаморфизма также доказывается составом ОВ. Характерной особенностью ОВ является, с одной стороны, значительная окисленность, полимеризованность и ароматичность, что типично для ОВ стадии позднего мезокатагенеза, с другой – особенности молекулярного состава, не позволяющие говорить о созревании ОВ в ходе естественного регионального метаморфизма. Еще один из признаков отсутствия метаморфизма – наличие структурной неупорядоченности в слоистых алюмосилика-

тах [4, 56]. Большой частью слюдястый компонент представлен иллитом, реже каолинитом, также низкой степени упорядоченности.

Выяснение компонентного (молекулярного) состава и генезиса органического вещества углеродсодержащих пород Сафьяновского месторождения показало, что ОБ изученных образцов генетически однотипное, преимущественно сапропелевое и его накопление связано с морскими условиями. Отсутствие гумуса свидетельствует об удаленности бассейна от суши. Вероятно, основное количество органического вещества поставлялось планктоном. По значениям индексов химического выветривания (CIA и CIW) [52, 58], **углеродсодержащие алевропелиты** Сафьяновского месторождения формировались в теплых условиях, благоприятных для активного развития водорослей и бактерий, которые стали источником органического вещества, необходимого для образования углеродистых осадков. Однако нельзя исключить дополнительный вклад бактериальной составляющей, связанной с пригидротермальным бактериальным хемосинтезом. О возможности участия последнего свидетельствует сходство изученного ОБ с ОБ колчеданных руд Сибайского, Комсомольского и Яман-Касинского месторождений [9, 14, 38], а также присутствие пригидротермальной фауны [16].

Значения Mo/Mn показывают, что углеродсодержащие алевропелиты Сафьяновского месторождения могли формироваться в анокисческой обстановке, в бассейне с сероводородным заражением [19]. Это предположение также, казалось бы, подтверждается позицией на диаграмме $V/C - V/(V + Ni)$ [54] (рис. 7). Отрицательная аномалия Ce и отчетливо отрицательная аномалия Eu **могут отражать восстановительные обстановки формирования Pb-Zn и Cu черносланцевых формаций** [44]. Преобладание FeO (1.23–6.35 мас. %) над Fe_2O_3 (0.26–2.68 мас. %) объясняется восстановлением железа в осадке за счет окисления органического вещества. Однако, присутствие пригидротермальной фауны, требующей кислорода, признаки сульфатной стадии гальмиролиза колчеданных руд, включающие формирование рудокластиков и барититов, гематитизация эффузивов [16], свидетельствуют, скорее всего, в пользу субокисческих, чем анокисческих или эвксинных условий колчеданообразования.

ВЫВОДЫ

В рудовмещающей толще Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения выделяется, как минимум, семь вулканогенно-осадочных горизонтов, разделенных лавовыми потоками риодацитового состава. Наибольшим разнообразием характеризуются рудоконтролирующие вулканогенно-осадочные горизонты, в которых кроме углеродистых алевропелитов, присут-

ствуют слои гиалокластогенных тефротурбидитов, сульфидных турбидитов и их диагенитов, а также брекчий смешанного состава. Присутствие полулитифицированных обломков черных сланцев и колчеданных руд, наряду с обломками вулканитов, свидетельствует о вулканогенно-эдафогенной природе этих брекчий, связанной с высокой сейсмической активностью района.

Рассматриваемые углеродистые алевропелиты состоят из гиалокластогенных, колчеданных и биогенных компонентов, а также продуктов их аутигенного преобразования. Они обогащены элементами-примесями колчеданной ассоциации и Ba, что связано с присутствием примесных и аутигенных сульфидов Fe и Cu и барита. Примесь рудной составляющей фиксируется положительными корреляциями Zn–Cd, Pb–Bi, Sb–As и Pb–Ba. Высокие содержания P3Э в углеродистых отложениях Сафьяновского месторождения объясняются наличием ксенотима и аутигенного алюмофосфата стронция. Судя по вулканогенно-осадочным ассоциациям и минералогическим особенностям углеродистых алевропелитов (Th–La–Sc, V/Cr, Mo/Mn, Fe/Mn, FeO/Fe_2O_3), а также по сапропелевому составу слабо преобразованного ОБ, Сафьяновское месторождение формировалось в умеренно-глубоководном анокисческом или субокисческом морском бассейне энсиалической островной дуги.

Авторы выражают благодарность доктору геол.-мин. наук Е.В. Белогуб за ценные консультации в ходе исследований, канд. техн. наук В.А. Котлярову, канд. геол.-мин. наук П.В. Хворову и В.И. Петровой за помощь в выполнении анализов, доктору геол.-мин. наук Г.А. Мизенсу за конструктивные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта УрО–СО РАН при финансовой поддержке УрО, ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” в 2009–2013 г (проект НК-544 П/14, ГК П237).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аюпова Н.Р., Масленников В.В. Гальмиролититы Узельгинского колчеданосного поля (Южный Урал). Миасс: УрО РАН, 2005. 199 с.
2. Беспяев Х.А., Полянский Н.В., Ганжченко Г.Д. и др. Геология и металлогения Юго-Западного Алтая. Алматы: Гылым, 1997. 288 с.
3. Грабежеев А.И., Молошаг В.П., Сотников В.И. и др. Метасоматический ореол Сафьяновского Zn–Cu месторождения, Средний Урал // Петрология, 2001. Т. 9, № 3. С. 294–312.
4. Грим Р.Е. Минералогия глин. М.: Иностранная литература, 1959. 452 с.
5. Зайков В.В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин. М.: Наука, 1991. 206 с.

6. *Зайков В.В.* Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин (на примере колчеданосных зон Урала и Сибири). М.: Наука, 2006. 428 с.
7. *Зайкова Е.В.* Кремнистые породы офиолитовых ассоциаций (на примере Мугоджар). М.: Наука, 1991. 134 с.
8. *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.
9. *Иванов С.Н., Курицына Г.А., Ходалевиц Н.А.* Новые данные о генезисе колчеданных месторождений Урала // Генетические проблемы руд: докл. сов. геологов на XXI сессии МГК. М.: Геолтехиздат, 1960. С. 100–105.
10. *Коровко А.В., Грабежеев А.И., Двоеглазов Д.А.* Метасоматический ореол Сафьяновского цинково-медного месторождения (Средний Урал) // Докл. АН СССР, 1988. Т. 303, № 3. С. 692–695.
11. *Коровко А.В., Постоялко М.В., Степанова Т.И. и др.* Стратиграфия и фауна образований девона и карбона Сафьяновского рудного поля (Средний Урал) // Проблемы стратиграфии и палеонтологии Урала. Екатеринбург: Минприроды РФ, УГСЭ, 1999. С. 136–141.
12. *Коротеев В.А., Язева Р.Г., Бочкарев В.В. и др.* Геологическое положение и состав сульфидных руд Сафьяновского месторождения (Средний Урал). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1997. 49 с.
13. *Краснова Н.И., Петров Т.Г.* Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб.: СПбГУ, 1997. 228 с.
14. *Леин А.Ю., Глущенко Н.Н., Осипов Г.А. и др.* Биомаркеры сульфидных руд современных и древних “черных курильщиков” // Докл. АН. 1998. Т. 359, № 4. С. 525–528.
15. *Масленников В.В.* Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс: Геотур, 1999. 348 с.
16. *Масленников В.В.* Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 348 с.
17. *Масленников В.В., Аюпова Н.Р.* Кремнисто-железистые породы Узельгинского колчеданосного поля (Южный Урал) // Литосфера, 2007. № 2. С. 106–129.
18. *Масленникова С.П., Масленников В.В.* Сульфидные трубы палеозойских “черных курильщиков”. Екатеринбург–Миасс, 2007. 342 с.
19. *Маслов А.В.* Осадочные породы: методы изучения и интерпретация полученных данных. Екатеринбург: УГГУ, 2005. 289 с.
20. *Маслов В.А.* Девон восточного склона Южного Урала. М.: Наука, 1980. 223 с.
21. *Мизенс Г.А.* Колебания уровня мирового океана и осадконакопление в девонских глубоководных бассейнах юга Урала // Литосфера. 2003. № 4. С. 43–44.
22. *Молошаг В.П., Грабежеев А.И., Викентьев И.В., Гуляева Т.Я.* Фации рудообразования колчеданных месторождений и сульфидных руд медно-золото-порфировых месторождений Урала // Литосфера. 2004. № 2. С. 30–51.
23. *Молошаг В.П., Грабежеев А.И., Гуляева Т.Я.* Условия образования теллуридов в рудах колчеданных и медно-золото-порфировых месторождений Урала // Записки ВМО. 2002. Ч. СXXXI, № 5. С. 40–54.
24. *Мурдмаа И.О.* Фации океанов. М.: Наука, 1987. 303 с.
25. Новые минералы и первые находки в СССР // Записки ВМО. 1978. Вып. 3. С. 333–334.
26. *Прокин В.А., Буслаев Ф.П., Молошаг В.П., Малюгин А.А.* Геология Сафьяновского медноколчеданного месторождения (по результатам картирования карьера) // Ежегодник-2001. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2002. С. 276–281.
27. *Прокин В.А., Нечехин В.М., Сопко П.Ф. и др.* Медноколчеданные месторождения Урала: Геологические условия размещения. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. 288 с.
28. *Прошляков Б.К., Кузнецов В.Г.* Литология. Москва: Недра, 1991. 444 с.
29. *Пумпянский А.М.* Геохимия франского накопления Урала // Геохимия осадочных формаций Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. С. 49–59.
30. *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.
31. *Сафина Н.П., Масленников В.В.* Состав и продукты преобразования обломочных сульфидных отложений Сафьяновского и Яман-Касинского месторождений Урала // Литосфера. 2007. № 2. С. 130–140.
32. *Сафина Н.П., Масленников В.В.* Рудокластиты колчеданных месторождений Яман-Касы и Сафьяновское (Урал). Миасс: УрО РАН, 2009. 260 с.
33. *Склярёв Е.В., Гладкохуб Д.П., Донская Т.В. и др.* Интерпретация геохимических данных. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. С. 102–134.
34. *Сорока Е.И., Молошаг В.П., Леонова Л.В.* Метасоматиты приконтактной зоны рудных тел Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал) // Вестник Московского отделения РМО. Москва, 2008. С. 199–201.
35. *Сорока Е.И., Молошаг В.П., Леонова Л.В., Галеев А.А.* Исследования минерального состава и субстрата измененных пород Сафьяновского колчеданного месторождения // Годичное собрание РМО. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2008. С. 189–191.
36. *Сорока Е.И., Молошаг В.П., Леонова Л.В. и др.* Кремнисто-углеродистые отложения рудовмещающей толщи Сафьяновского медноколчеданного месторождения // Ежегодник-2009. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 157. 2010. С. 250–254.
37. *Теленков О.С., Масленников В.В.* Автоматизированная экспертная система типизации кремнисто-железистых отложений палеогидротермальных полей Южного Урала. Миасс: ИМин УрО РАН, 1995. 200 с.
38. *Флоровская В.Н., Зарайский Г.П., Зезин Р.Б.* Кериты и другие соединения углерода Комсомольского месторождения колчеданных руд на Южном Урале // Докл. АН СССР. 1964. Т. 157, № 5. С. 1131–1134.
39. *Хворова И. В.* Океанский тип седиментогенеза и его специфика (сравнительный анализ седиментогенеза на океанских и континентальных плитах). Сообщение 2. Особенности седиментогенеза // Литология и полез. ископаемые 1995. № 1. С. 3–15.
40. *Хворова И.В., Залмазон Э.С.* Особенности состава фтанитов и яшм Южного Урала // Литология и по-

- лез. ископаемые. 1963. № 1. С. 73–87.
41. Чувашиов Б.И., Анфимов А.Л., Сорока Е.И., Ярославцева Н.С. Новые данные о возрасте рудовмещающей толщи Сафьяновского месторождения на основе фораминифер // Докл. АН. 2011. Т. 439, № 5. С. 648–650.
 42. Шереметьев Ю.С. Лецев Н.В. Сафьяновское медноколчеданное месторождение на Среднем Урале. Екатеринбург: Комитет по природным ресурсам РФ, 2000. 14 с.
 43. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 271 с.
 44. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: УИФ “Наука”, 1994. 304 с.
 45. Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарев В.В. Геология и рудные парагенезисы Сафьяновского колчеданного месторождения в среднеуральском шарьяже // Геология рудных месторождений, 1991. Т. 33, № 4. С. 47–58.
 46. Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарев В.В. Геология Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 1992. 72 с.
 47. Яночкина З.А. Статистические методы изучения пестроцветов. М: Недра, 1966. 142 с.
 48. Bhatia M.R., Crook K.A.W. Trace element characteristics of grauwackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins // Contrib. Mineral. Petrol. 1986. V. 92. P. 181–193.
 49. Goodfellow W.D., McCatcheon S.R. Geologic and genetic attributes of volcanic-sediment-hosted massive sulfide deposits of the Baturst Mining Camp, Northern New Brunswick – a synthesis // Econ. Geol. Monograph, 2003. V. 11. P. 497–512.
 50. Halbach P.E., Fouquet Y., Herzig P. Mineralization and compositional patterns in deep-sea hydrothermal systems // Energy and Mass Transfer in Marine Hydrothermal. Berlin: Dahlem university press, 2003. P. 85–122.
 51. Hannington M.D., Scott S.D. Hydrothermal fluids and petroleum in surface sediments of Guaymas Basin, Galt of California: a case study // Canad. Mineral. 1999. V. 26, Pt. 3. P. 429–888.
 52. Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering // Sed. Geol. 1988. V. 55, № 3-4. P. 319–322.
 53. Haskin L.A., Frey F.A., Schmitt R.A., Smith R.H. Meteoritic, solar and terrestrial rare-earth distribution // Physics and chemistry of the Earth. Pergamon Press, 1966. P. 167–321.
 54. Hoffman D.L., Algeo T.J., Maynard J.B. et al. Regional and stratigraphic variation in bottom water anoxia on offshore core shales of Upper Pennsylvanian cyclothem from the Eastern Midcontinent Shelf (Kansas), USA // Shales and mudstones. I / J. Schieber, W. Zimmerle, P. Sethi (eds) E. Schweizerbart’sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1988. P. 243–269.
 55. 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. // Amer. Mineral. 1975. V. 60. P. 957–964.
 56. Murray H.H. Kaolin minerals: Their genesis and occurrences // Reviews in mineralogy. 1988. V. 19. P. 67–88.
 57. Murrey R.W., Buchholtz ten Brink M.R., Jones D.L. et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environment in chert and shale // Geology. 1990. V. 18. P. 268–271.
 58. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. V. 299. P. 715–717.
 59. 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. Monograph, 2003. V. 11. P. 361–390.
 60. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The Biomarker Guide, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History. Vol. 1 & 2. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2004. 589 p.

Рецензент Г.А. Мизенс

Black shales of the Saf'yanovka massive sulfide deposit, Middle Urals

N. S. Yaroslavtseva*, V. V. Maslennikov*, N. P. Safina* N. V. Leshchev**, E. I. Soroka***

**Institute of Mineralogy, Urals Branch of RAS*

***“Saf'yanovskaya med” PLC “Uralelectromed”*,

****Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS*

Several ore-bearing volcano-sedimentary horizons have been found in rhyolite-dacitic unit of the Saf'yanovskoye copper-zink massive sulfide deposit. In the horizons black shales are intercalated with volcanoclastic turbidites, clastic sulfides, their diagenites and mixed talus breccias. The black shales comprise hyaloclastic, ore and biogene components and their products of authigenic transformation. Hyaloclastic constituent consists of numerous fragments of quartz, plagioclase, as well as pseudomorphs of chlorite, quartz, hydromica, potassium feldspar and kaolinite after volcanic glass, enclosing accessory zircon, apatite, xenotime, titanite, rutile, fine-dispersed hematite, siderite, and also Sr-aluminophosphate close in composition to goudkenite. Ore mineralization contains ore clasts, authigenic nodular and euhedral pyrite, marcasite, chalcopyrite, sphalerite, galena, tennantite, freibergite (high-Ag tetrahedrite), akantite, barite, pyrrhotite and arsenopyrite. The biogenic components are quartz-rich radiolarians, pseudomorphs of apatite after foraminifers and poorly altered (during mesokatagenesis) sapropelic organic matter occasionally with euhedral graphite. The positive correlations between Zn–Cd, Pb–Bi, Sb–As and Pb–Ba indicate presence of ore components. The increased REE content compared to those from ryodacites are caused by abundant xenotime, apatite and Sr-aluminophosphate. The anomalous high V/Cr ratio (2–8) indicates the anoxic or suboxic conditions of black shale formation. Based on La–Th–Sc ratio, the carbonaceous sediments precipitated in a marine basin of mature near-continental or ensialic island arc.

Key words: *black shales, Saf'yanovka massive sulfide deposit, Middle Ural, volcanosedimentary horizon, organic matter, petrogenetic modules, facial indicators.*