

УДК 549

DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-3-5

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУМТОР (СРЕДИННЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ) МЕТОДАМИ QXRD И XRF

А.Г. Шевкунов¹, А.А. Гуда², А.А. Скорынина², С.В. Макнайт³

¹ Кыргызский институт минерального сырья, пр. Мира 66, г. Бишкек, 720001 Кыргызстан;
anatoly_shevkunov@mail.ru

² Южный Федеральный университет, ул. Сладкова 178/4, г. Ростов-на Дону, 344090 Россия

³ Научная и инженерная школа, университет Балларат, Маунт Хелен, 3353 Австралия

Статья поступила в редакцию 14.03.2022 г., принята к печати 07.07.2022 г.

STUDIES OF MINERAL COMPOSITION OF ORES OF THE KUMTOR DEPOSIT (CENTRAL TIEN SHAN) BY QXRD AND XRF METHODS

A.G. Shevkunov¹, A.A. Guda², A.A. Skorynina², S.W. McKnight³

¹ Kyrgyz Institute of Mineral Raw Materials, pr. Mira 66, Bishkek, 720001 Kyrgyzstan;
anatoly_shevkunov@mail.ru

² Southern Federal University, ul. Sladkova 178/4, Rostov-on-Don, 344090 Russia

³ School of Science & Engineering, University of Ballarat, University Drive, Mount Helen, VIC Australia 3353

Received 14.03.2022, accepted 07.07.2022

Аннотация. Методом XRF на анализаторе TORNADO M4 исследованы образцы из разных минеральных типов руд золото-(вольфрам)-сульфидного месторождения Кумтор (Срединный Тянь-Шань) путем цифровой обработки изображений поэлементных карт сканирования с целью установления возможности применения этого метода для количественной оценки минерального состава руд без использования электронной базы данных минералов AMICS. Подобраны оптимальные параметры проведения элементного анализа и сканирования образцов, позволяющие получить максимальную информацию при минимальных затратах времени и средств. Проведенные анализы позволили оценить содержание основных рудообразующих нерудных и рудных минералов на полуколичественном уровне, а также установить признаки возможного присутствия минералов, ранее неизвестных в составе руд (баритокальцит, витерит, ферринатрит и др.). Визуально и при микроскопических исследованиях выделение таких минералов проблематично, хотя их относительное содержание достигает в ряде случаев нескольких массовых процентов.

Ключевые слова: Кумтор, минералогия, QXRD, XRF анализ, TORNADO M4.

Abstract. Samples of various mineral ore types of the Kumtor gold deposit (Central Tien Shan) were studied using XRF method on a TORNADO M4 analyzer by digital processing of images of the elemental scanning maps to reveal the possibilities of this method to measure the mineral composition of ores without using the AMICS electronic mineral database. During the experimental work, the optimal parameters of elemental analysis and scanning of samples were selected, which allow maximum information with minimal time and expenses. The experimental analyses enabled us to estimate the semi-quantitative content of major ore-forming non-metallic and ore minerals and to establish the possible presence of minerals previously unknown in the composition of ores (barytocalcite, viterite, ferrinatrinite, etc.). The macro- and microscopical identification of these minerals is problematic, although their relative content locally reaches several weight percents.

Keywords: Kumtor, mineralogy, QXRD, XRF analysis, TORNADO M4.

Введение

На золото-(вольфрам)-сульфидном месторождении Кумтор (Срединный Тянь-Шань) выделен один технологический карбонат-полевошпатовый тип руд с двумя подтипами, отличающимися по величине Прег-Роббинг теста в зависимости от содержания в руде $C_{орг}$. Извлечение золота из основного типа руд по флотационно-цианидной схеме составляет 80 % и выше. На флангах рудоносной зоны Центрального участка и на других участках месторождения, вовлекаемых в процесс отработки по мере углубления и расширения карьера, средний процент извлечения золота в рудах падает вне зависимости от содержания $C_{орг}$, что свидетельствует о присутствии здесь других минеральных типов руд. Выявление причин, влияющих на понижение извлечения золота прежде всего связано с установлением вариаций минерального состава руд в объеме рудоносной зоны месторождения на основе применения современных методик, позволяющих получать количественный баланс рудообразующих минералов.

В настоящее время автоматизированные системы анализа минералов широко применяются в горнодобывающей промышленности за рубежом, меньше в России, для целей технологической минералогии, в том числе и при исследовании золотых руд (Васильев и др., 2010; Шеметова, 2022). Это системы количественного рентгеноструктурного анализа (QXRD), MLA анализ, основанный на сканировании поверхности полированного брикета пробы под электронным микроскопом в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE) с последующим разделением минералов по уровню серого на картине BSE и точечном энергодисперсионном (EDS) анализе каждой установленной минеральной фазы, система диагностики минералов и фазового анализа «Минерал С7», основанная на измерении отражательной способности минералов и позволяющая производить количественный анализ минерального состава (<https://siams.com/minerals7>).

С целью поиска оптимального вида анализа, позволяющего оперативно и достоверно оценивать минеральный баланс руд, проведены экспериментальные исследования образцов руд месторождения Кумтор рентгенофлюоресцентным (XRF) методом на анализаторе TORNADO M4. Основными задачами были выделение минералов в каждом из образцов, количественная оценка их содержания и отработка оптимальных режимов проведения XRF анализа. Метод XRF, лежащий в основе работы прибора TORNADO M4 (www.bruker.com/m4tornado), позволяет оперативно получать карты распределения разных элементов (от порообразующих до микроэлементов) в площади аншлифа, оценивать их нормализованные значения, а также получать количественные характеристики содержания элементов с атомной массой выше Na. Анализатор минералов Micro-XRFM4 TORNADO AMICS в автоматическом режиме количественно определяет минеральный состав образца и позволяет охарактеризовать гранулометрический состав всех минералов. Ниже приведены основные результаты проведенных экспериментальных исследований и рекомендации по более широкому использованию этого метода при изучении вещественного состава пород и руд.

Геологическая позиция

Золото-(вольфрам)-сульфидное месторождение Кумтор находится на территории Срединного Тянь-Шаня, вблизи «линии Николаева» – сuture Кыргызско-Казахстанского палеоконтинента. Рудные залежи локализованы в Кумторской зоне смятия длиной более 7 км и мощностью 300–400 м (рис. 1). Рудовмещающая зона смятия имеет надвиговую природу и выполнена дислоцированными породами вендского и нижнепалеозойского возраста (Богдецкий и др., 1981; Никоноров, 1993). Рудоносная структура северо-восточного простирания погружается на юго-восток под углами 25–55°. Рудные тела преи-

Для цитирования: Шевкунов А.Г., Гуда А.А., Скорынина А.А., Макнайт С.В. Исследование минерального состава руд месторождения Кумтор (Срединный Тянь-Шань) методами QXRD и XRF. Минералогия, 8(3), 79–101. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-3-5

For citation: Shevkunov A.G., Guda A.A., Skorynina A.A., McKnight S.W. Studies of mineral composition of ores of the Kumtor deposit (Central Tien Shan) by QXRD and XRF METHODS. Mineralogy, 8(3), 79–101. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-3-5.

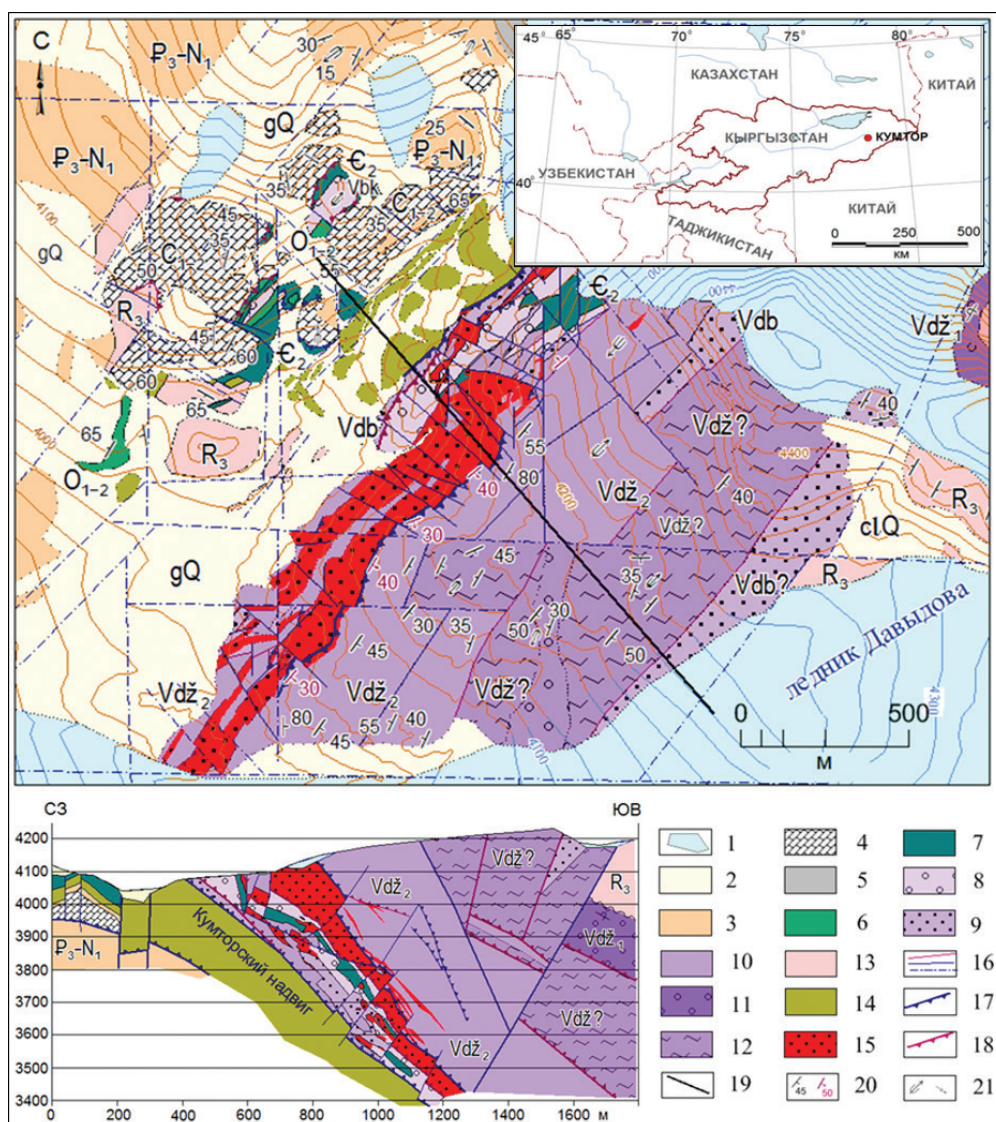


Рис. 1. Схематическая геологическая карта и разрез Центрального участка месторождения Кумтор (Шевкунов и др., 2018).

1 – ледник; 2 – морена (gQ) и коллювий (clQ); 3 – глины палеогена-неогена (P3-N1); 4 – известняки (C1–2); 5 – песчаники (C1); 6 – алевролиты (O1–2); 7 – черные кремни и известняки (Є2–O1); 8 – верхние диамиктиты (Vbk); 9 – углистые филлиты с пиритом (Vdb); 10 – филлиты, карбонатно-терригенные ритмиты (Vdz2); 11 – нижние диамиктиты (Vdz1); 12 – кристаллические сланцы (V?) с зонами пирротинизации; 13 – метариолиты (R3); 14 – зона альпийских тектонитов; 15 – рудоносная зона; 16 – разломы; 17 – альпийские надвиги; 18 – палеозойские надвиги; 19 – линия разреза; 20 – элементы залегания; 21 – шарниры складок.

Fig. 1. Schematic geological map and cross-section of the Central part of the Kumtor deposit (Shevkunov et al., 2018).

1 – glacier; 2 – moraine (gQ) and colluvium (clQ); 3 – Paleogene-Neogene sediments; 4 – Carboniferous limestones; 5 – Lower Carboniferous sandstones; 6 – Ordovician siltstones; 7 – Upper Cambrian–Lower Ordovician black cherts and limestones; 8 – Vendian upper diamictite; 9 – Vendian carbonaceous phyllites with pyrite; 10 – Vendian phyllites, carbonate-terrigenous rhythmites; 11 – Vendian lower diamictite; 12 – Vendian (?) schists with pyrrhotite; 13 – Upper Riphean metarhyolites; 14 – Alpine tectonic zone; 15 – ore-bearing zone; 16 – faults; 17 – Alpine thrust; 18 – Paleozoic thrust; 19 – cross-section line; 20 – bedding elements; 21 – fold hinges.

мощественно линзо-, пластообразные, мощностью от первых десятков метров до 100–150 м и протяженностью 600–1000 м и более, локализованы в

зонах гидротермального преобразования филлитов. Преобладающие метасоматические изменения – калишпатизация, альбитизация, карбонатизация и пи-

ритизация (Шевкунов, Башкиров, 2013). Руды представлены штокверком пирит-кварц-полевошпат-карбонатных прожилков в метасоматически измененных породах. Штокверки обычно слагают периферийные части, а метасоматиты – «ядра» рудных тел. Текстуры руд вкрапленные, прожилково-вкрапленные, полосчатые, пятнистые, брекчиевидные (Ivanov et al., 2000; Шевкунов и др., 2018).

Минеральный состав руд в большинстве случаев сложный и отражает многостадийный процесс рудообразования. Набор метасоматитов, общий для всего Центрального участка, отличается в разных частях рудоносной зоны полнотой и объемом проявления, набором различных комбинаций минералов и, в ряде случаев, структурной позицией. На флангах рудоносной зоны Центрального участка и других участках месторождения по простиранию и падению рудоносной структуры появляются минеральные типы руд, отличные от «стандартных» руд Центрального участка. Это связано с иным составом рудовмещающих пород, структурными особенностями, вероятным изменением параметров рудоотложения и состава рудоносных флюидов.

Материалы и методы исследования

Для минералогического изучения руд месторождения Кумтор использованы традиционные визуально-оптические методы исследования с диагностикой минералов в шлифах, аншлифах и полированных шлифах на микроскопе Nikon eclipse «LV 100 POL», оснащенный цифровой камерой DS-Fi1. Изучено более 600 препаратов из образцов разных рудоносных зон месторождения.

Количественный минералогический анализ метасоматитов и руд (пульпы и хвостов усредненных керновых проб) методом дифракции рентгеновских лучей (QXRD) выполнен в лаборатории McKnight Mineralogy (университет Балларат, Австралия) на дифрактометре Siemens D500 и D501 с использованием $\text{CoK}\alpha$ -излучения с Fe-фильтром при напряжении 36 кВ и силе тока 30 мА, шаге сканирования $0.02\theta/2\theta$ со скоростью съемки $1^\circ 2\theta/\text{мин}$. Минеральные фазы идентифицированы с помощью компьютерного поиска (Panalytical X'Expert HighScore Plus™ и Bruker Diffraction Plus EVA™) с использованием БД ICDD PDF4 Minerals 2007. Количественная оценка минерального состава проведена с использованием программы SiroQuant™, использованы наиболее подходящие стандарты из внутренней

БД пакета программного обеспечения. В итоговых результатах количественного анализа учитывались минеральные фазы с содержаниями >0.3 мас. %. Изучение проб сопровождалось петрографическим исследованием образцов из этих же интервалов, а также приготовленных на смоле полированных препаратов ($n = 7$) из дробленного материала некоторых проб с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL 6300, оснащенного аналитической системой Oxford Instruments EDS.

Исследования методом XRF проведены в лаборатории Международного исследовательского института интеллектуальных материалов Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону). Работы проведены на лабораторном спектрометре XRFM4 TORNADO (Bruker Nano GmbH), оснащенный оптической камерой с увеличением $100\times$ и поликапиллярной линзой с возможностью фокусировки до 25 мкм, и полупроводниковым двойным детектором XFlash® 30 мм². Рентгеновское излучение генерировалось на родиевом аноде, рассчитанном на выделение тепловой мощности до 50 Вт. Для оптимального режима детектирования (мертвое время менее 10 %) использовано напряжение на трубке 50 кВ с током не более 300 мкА. Область фокусировки была порядка 25 мкм. Перед исследованиями камера прибора вакуумировалась до давления 20 мбар. Достигнутое разрешение детектора 150 эВ, пространственное разрешение при картировании составляло десятки микрометров и зависело от глубины проникновения возбуждающего рентгеновского излучения в образец.

Программное обеспечение позволило проводить измерение элементного состава в точках поверхности образца, расположенных по регулярной прямоугольной сетке в области до 1.5×1.5 см². Картирование осуществлялось с шагом 15 мкм и для обеспечения статистически значимой выборки проводилось на нескольких участках среза поверхности. Количество измеренных спектров флуоресценции на каждую карту составляло порядка 39500, что занимало ~3 часов сбора данных и 1 часа ее обработки для определения концентрации исследуемых элементов с учетом фона и эффектов самопоглощения методом фундаментальных параметров (Beckhoff et al., 2006).

Для проведения XRF анализа использованы полированные образцы руд (аншлифы) размером 2×3 см (рис. 2, 3). Сканирование проводилось на

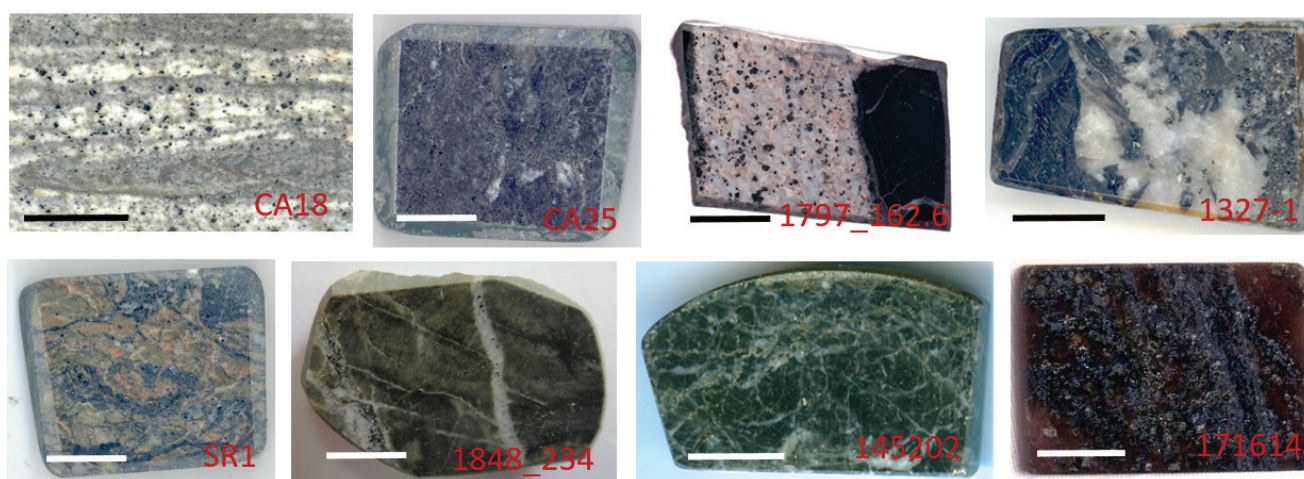


Рис. 2. Полированные образцы из основных минеральных типов руд месторождения Кумтор, изученные методом XRF.

Руды: CA18 – полосчатые пирит-карбонатные; CA25 – пирит-карбонат-кварц-альбитовые; 1797_162.6 – пирит-барит-кварц-анкеритовые; 1327-1 – пирит-полевошпат-кварцевые; SR1 – пирит-гематит-кварц-полевошпат-серицитолитовые; 1848_234 – пирит-полевошпат-карбонат-серицитолитовые; 145202 – пирит-карбонат-полевошпатовые; 171614 – пирит-гематит-карбонатные руды загипсованные. Масштаб – 10 мм.

Fig. 2. Polished sections of main ore types of the Kumtor deposit studied by XRF method.

Ores: CA18 – banded pyrite-carbonate; CA25 – pyrite-carbonate-quartz-albite; 1797_162.6 – pyrite-barite-quartz-ankerite; 1327-1 – pyrite-feldspar-quartz; SR1 – pyrite-hematite-quartz-feldspar-sericite; 1848_234 – pyrite-feldspar-carbonate-sericite; 145202 – pyrite-carbonate-feldspar; 171614 – pyrite-hematite-carbonate-gypsum. Scale bar is 10 mm.

площади аншлифа примерно 10×14 мм (рис. 4). На первом шаге проводилось измерение содержания элементов в 100 точках в пределах изучаемой площади аншлифа с получением в каждой точке спектра по всем элементам. По результатам автоматизированной обработки этих спектров устанавливался усредненный элементный состав образца (табл. 1), а также набор 12 основных элементов для последующего картирования. Обычно список включал Si, Al, K, Na, Ca, Mg, Fe, S, Ba, Sr, W и Mn.

Вторым шагом было картирование распределения выбранных 12 элементов на площади 10×14 мм с шагом 15 мкм и выдержкой 50 мс. В результате были получены карты распределения каждого элемента, нормированного на максимальные их концентрации. Для большинства образцов также проведено сканирование содержаний всего комплекса элементов по двум профилям (рис. 4) с шагом 20 мкм между точками и получением результатов в 600–700 точках по каждому из профилей.

Встроенное программное обеспечение прибора TORNADO M4, как показали экспериментальные работы, не всегда корректно разделяет породообразующие минеральные фазы в исследуемом об-

разце, особенно в случае сложного состава. Из-за отсутствия анализатора минералов Micro-XRFM4 TORNADO, снабженного программным пакетом AMICS с БД минералов, позволяющего в автоматическом режиме определять минеральный состав образца, для их выделения мы использовали возможности графического редактора Adobe Photoshop, позволяющие производить подсчет количества пикселей, приходящихся на площади с дифференцированными цветовыми характеристиками на генерированных поэлементных и комбинированных XRF-картах (рис. 5).

Основы цифровой обработки изображений изложены в работе (Гонсалес, Вудс, 2012) и в руководстве для пользователей Adobe Photoshop (<https://helpx.adobe.com/ru/photoshop/using/layer-basics.html>). Хотя это и создает неудобства из-за дополнительной подготовки растров сканирования для цифровой обработки, но позволяет оценить на полуколичественном уровне, а часто и на количественном, распределение основных минералов в образце при отсутствии дорогостоящего программного пакета AMICS.

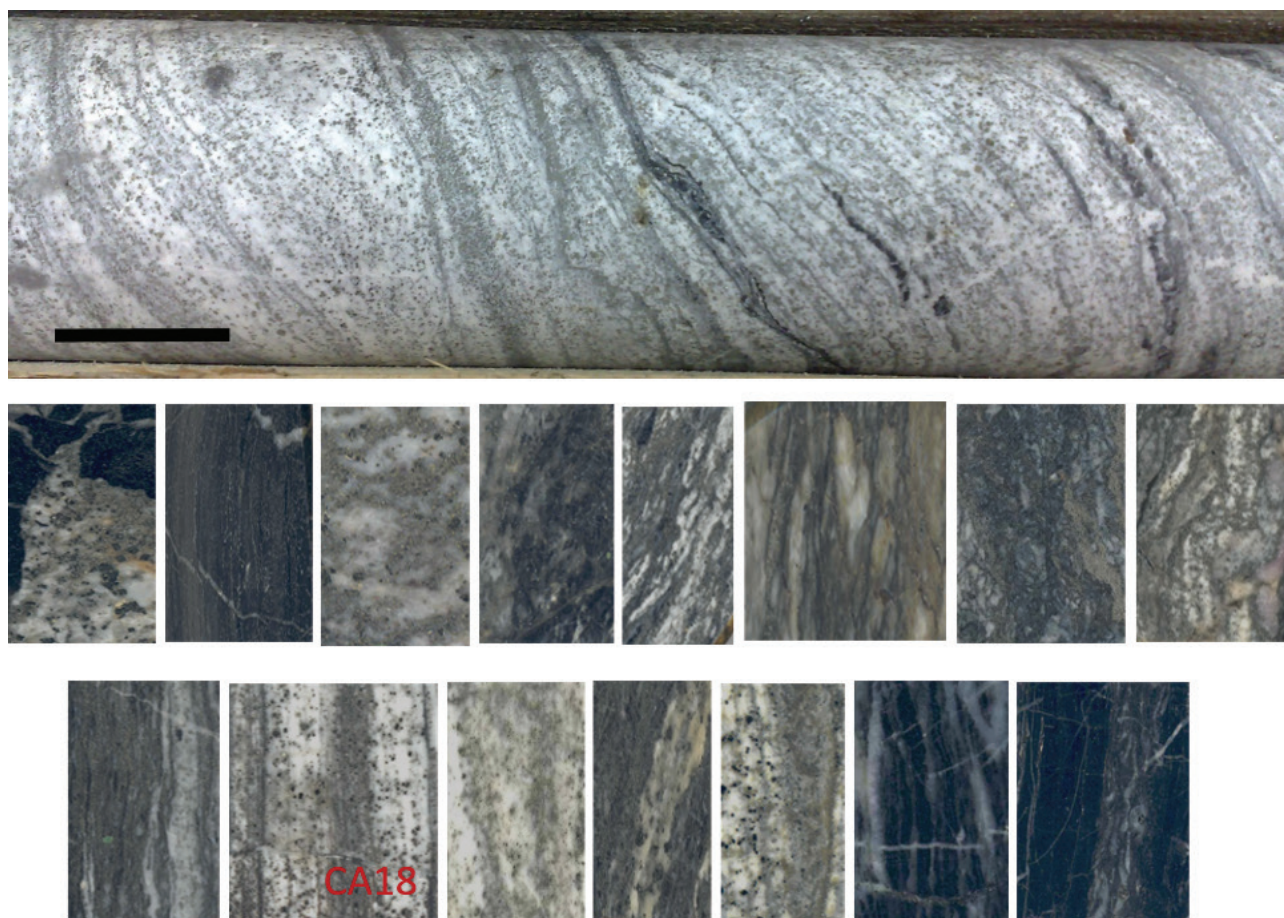


Рис. 3. Фрагмент керна скважины D1281C, сложенного полосчатой пирит-кальцитовой рудой и аншлифы из интервала 249–285 м.

Масштаб – 30 мм.

Fig. 3. A fragment of drill core of borehole D1281C composed of banded pyrite-calcite ore and polished sections of an interval of 249–285 m.

Scale bar is 30 mm.

Таблица 1

Средний элементный состав образца CA18

Table 1

Average elemental composition of sample CA18

Элемент	Серия	Состав		Ошибка (1σ), мас. %
		мас. %	ат. %	
Na	K-series	0.78	1.34	0.00
Mg		0.86	1.39	0.00
Al		1.66	2.41	0.00
Si		10.64	14.82	0.05
K		2.02	2.02	0.00
Ca		63.71	62.20	0.24
Mn		1.46	1.04	0.00
Fe		10.20	7.15	0.01
Sr		1.14	0.51	0.00
Ba	L-series	2.17	0.62	0.00
W		0.02	0.00	0.00
S	K-series	5.33	6.50	0.01
Всего		100.00	100.00	

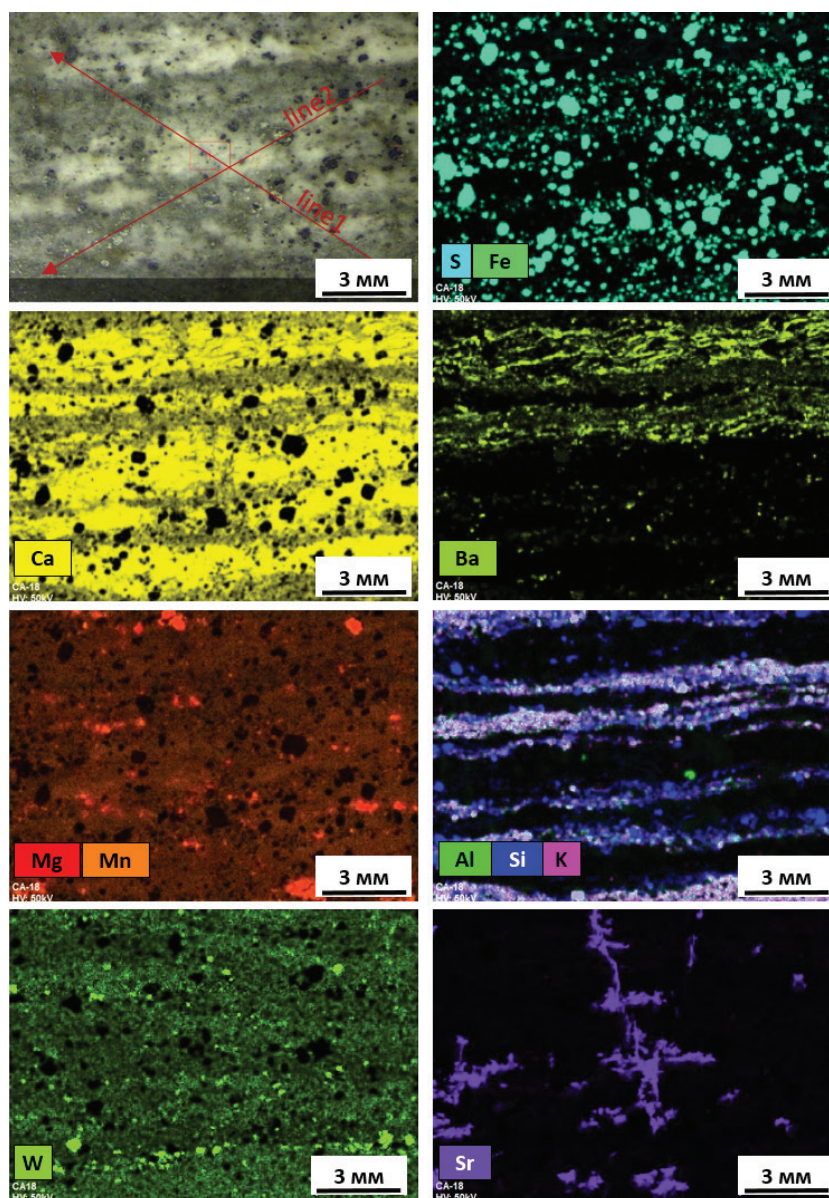


Рис. 4. Изученная область образца CA18 полосчатой пирит-карбонатной руды с расположением линий дополнительных профилей XRF зондирования и карты распределения нормированных содержаний элементов, указывающие на возможное присутствие большей части Ba в виде баритокальцита и витерита (BaCO_3) (карты Ba, Ca и Fe-S), Mn-анкерита в основной массе кальцита (карта Mg-Mn), сложный состав прослоев, сложенных мелкими зернами кварца, чешуйками серицита и минералом группы скаполита (карта Al-Si-K), распределение мелких зерен шеелита субсогласно полосчатости породы (карта W) и микропрожилки стронцианита (SrCO_3), незаметные на общем фоне образца руды (карта Sr).

Здесь и на остальных рисунках – месторождение Кумтор, размер исследованной области образцов – 10×14 мм.
Рудное тело Штокверк, скв. D1281C, глубина 283 м.

Fig. 4. Studied area of sample CA18 of banded pyrite-carbonate ore with lines of additional XRF profiles and distribution maps of the normalized contents of elements, which indicates the possible presence of most part of Ba in form of barytocalcite and viterite (BaCO_3) (Ba, Ca and Fe-S maps), Mn-ankerite in calcite (Mg-Mn map), complex interlayers with small quartz grains, sericite flakes and a mineral of the scapolite group (Al-Si-K map), distribution small grains of scheelite concordant to banding (W map) and microveinlets of strontianite (SrCO_3) invisible in macroscopic image of rock (Sr map).

Hereinafter – Kumtor deposit; the size of the studied area of sample – 10×14 mm.
Ore body Stockverk (Stockwork), borehole D1281C, depth of 283 m.

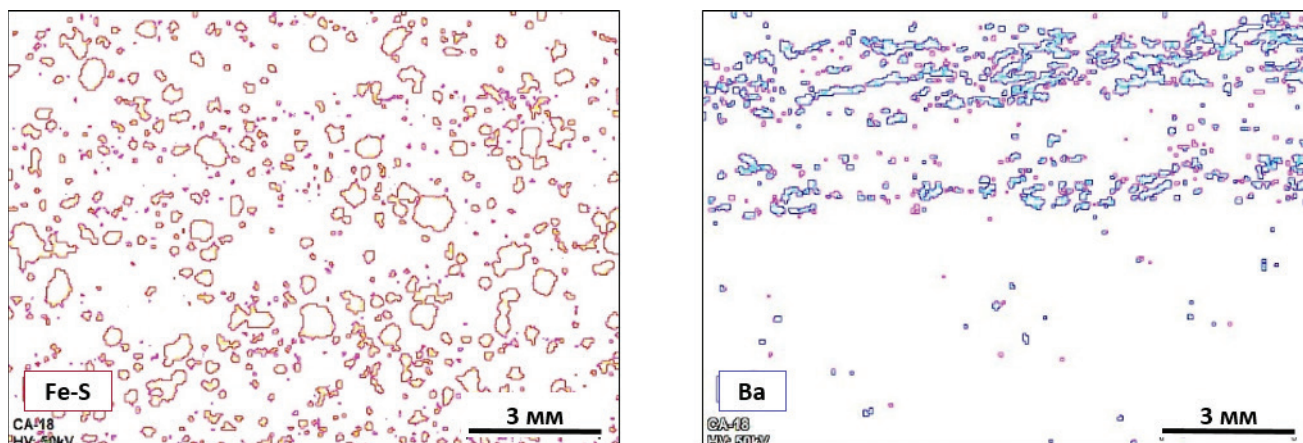


Рис. 5. Пример обработки в программе Adobe Photoshop растров поэлементных и комбинированных XRF карт по дифференцированным цветовым характеристикам, позволяющей автоматически подсчитывать количество пикселей каждой минеральной фазы.

Образец CA18.

Fig. 5. Example of Adobe Photoshop processing of rasters of elemental and combined XRF maps by differentiated color characteristics, which allows automatic counting of the number of pixels of each mineral phase.

Sample CA18.

Результаты исследований

Метод QXRD. Представления о минеральном составе рудовмещающих пород и руд месторождения Кумтор, а также о его вариациях по разрезу рудоносной структуры были получены по результатам QXRD анализа проб и петрографического изучения шлифов по сечению рудоносной зоны одной из разведочных скважин (табл. 2). Как видно из таблицы, неизменные породы всяческого бока представлены филлитами альбит-доломит-хлорит-кварц-серицитового состава с разными соотношениями основных минералов. Содержание калиевого полевого шпата (КПШ) в неизменных филлитах не превышает 1 %. По содержанию альбита неизменные филлиты практически не отличаются от пород рудоносной зоны. Нужно отметить, что при петрографических исследованиях первичных пород альбит чаще всего пропускается из-за мелких размеров, но идентифицируется на рентгенограммах, в то время как в метасоматитах он хорошо отличается в шлифах и используется как один из индикаторов метасоматической проработки. Ближе к рудной зоне среди филлитов всяческого бока появляются интервалы пиритизации (386.5–421.2 м) с убогими содержаниями Au, далее – интервалы карбонатизации (анкерит + сидерит) с пиритом (465.0–466.9 м) и содержаниями золота более 1 г/т и альбит-пиритовые обособления в виде маломощных линз метасоматитов и скоплений прожилков (485.0–486.6 м).

Начало основной рудной зоны характеризуется резким увеличением содержания КПШ (микроклина), появлением на фоне альбита, железистого доломита/анкерита и пирита заметных количеств кальцита и барита (505.0–552.3 м). Внутри рудной зоны (517.0–517.3 м) и ближе к подошве (600.7 м) встречаются маломощные интервалы пирит-карбонат-альбитовых метасоматитов с преобладанием в их составе альбита. На таких участках КПШ практически отсутствует. Ближе к подошве в рудоносных породах уменьшается содержание кальцита, возрастает содержание сидерита (575.3–640.9 м). В подошве рудоносной структуры (640.9–656.2 м) отмечается резкое увеличение содержания кварца. Заканчивается разрез карбонатизированной кварц-полевошпатовой породой с порфириобластами альбита и калишпата (681.4 м). Полевые шпаты здесь, в отличие от рудоносной зоны, сильно серицитизированы, а альбит калишпатизирован.

СЭМ исследования. Наблюдения в сканирующем электронном микроскопе и полученные поэлементные рентгеновские карты касались в основном микроструктурных взаимоотношений разных рудообразующих минералов. Установлено, что калиевый полевой шпат и альбит при совместном нахождении обычно образуют агрегаты размером от 10 до 200 мкм и более. Альбит наблюдается в ассоциации с КПШ в виде включений и на границах зерен. Изученные изображения BSE и поэлементные карты зерен карбонатов указывают на их пере-

Таблица 2

Результаты QXRD анализа минерального состава (мас. %) образцов из керн скважины D1127A
месторождения Кумтор

Table 2

Results of QXRD analysis of mineral composition (wt. %) of samples from drill core D1127A of the Kumtor deposit

Разрез	Интервал (м)	Типы пород	Au (г/т)	Серицит	Хлориты	Кварц	Альбит	Микроклин	Анкерит	Кальцит	Сидерит	Барит	Пирит	Шеелит	Апатит
Висячий бок структуры	261.00	Филлит	0.00	33.90	17.0	32.9	12.20	0.9	2.90	0.00	0.0	0.0	0.3	0.0	0.00
	349.20		0.00	31.10	20.8	26.8	12.60	1.0	7.10	0.10	0.0	0.0	0.1	0.2	0.10
	371.30		0.040	32.30	20.9	29.2	10.80	0.8	5.60	0.00	0.0	0.0	0.3	0.0	0.00
	386.50		0.20	20.40	0.2	36.4	22.00	0.0	9.20	0.00	0.0	0.0	11.1	0.1	0.60
Рудоносная зона	391.00	Брекчия по филлитам	0.05	58.40	3.60	2.30	16.30	0.20	11.30	0.00	4.50	0.00	2.10	0.00	0.80
	421.20	Пиритизированный филлит	0.0	10.6	0.40	58.00	1.10	0.70	12.80	0.20	0.10	0.00	15.70	0.10	0.20
	464.40	Филлит	0.15	54.90	0.60	3.80	26.20	1.20	12.50	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00
	465.00	Брекчия по филлитам	2.97	0.90	0.00	0.20	18.00	0.00	66.10	1.40	6.40	0.00	6.20	0.10	0.80
	466.90	Линза метасоматита в филлитах	4.12	0.00	0.00	0.00	11.00	0.00	67.70	1.20	3.00	0.00	16.40	0.00	0.70
	485.00	метасоматита в филлитах	0.19	0.10	0.00	0.80	27.20	0.00	8.10	0.00	0.60	0.00	62.30	0.10	0.70
	486.60		3.02	1.30	0.00	0.00	34.30	0.00	2.60	0.50	0.00	0.00	60.00	0.00	1.30
	505.00	Брекчия по филлитам	5.47	11.90	0.00	24.70	4.20	14.00	20.70	0.00	0.00	0.00	22.30	0.40	2.00
	506.00	Серицитолит с прожилками	4.28	28.70	2.10	7.90	16.10	5.40	19.40	12.20	0.00	2.40	5.80	0.10	0.00
	506.00	Метасоматит	4.28	0.60	0.00	1.20	7.50	1.30	39.50	29.00	0.50	3.50	15.80	0.90	0.20
	517.00		29.10	0.70	0.30	0.00	57.30	0.00	2.10	14.90	0.00	0.00	23.80	0.80	0.40
	517.30	Серицитолит с гнездами метасоматитов	34.20	31.20	0.30	0.50	35.00	0.40	23.70	0.90	0.00	0.80	7.10	0.00	0.00
	524.60	Метасоматит	32.30	0.00	0.20	1.30	1.30	2.50	2.60	78.40	4.00	0.20	9.20	0.00	0.30
	530.60	Брекчия по метасоматиту	23.00	5.90	0.20	2.20	5.30	14.00	15.30	39.10	0.00	0.50	17.30	0.00	0.30
	544.30	Метасоматит	8.43	1.00	0.00	1.00	11.10	16.10	13.40	34.10	0.00	1.50	21.20	0.40	0.20
	552.30	Серицитолит с гнездами метасоматитов	3.33	25.60	0.00	0.00	24.00	25.80	15.10	6.00	0.00	0.80	2.20	0.00	0.60
	575.30	Метасоматит	15.60	0.00	0.00	9.00	0.70	0.80	36.30	1.90	4.30	10.80	36.00	0.20	0.00
Лежащий бок	600.70	Брекчия по метасоматиту	2.94	2.30	0.00	0.00	48.60	0.40	27.50	15.20	2.00	0.20	3.40	0.10	0.30
	640.90	Метасоматит	15.50	0.00	0.00	36.10	1.10	0.00	18.70	0.90	2.70	0.00	39.00	1.10	0.40
	649.30	Зона окварцевания по филлитам	0.33	24.80	0.40	49.30	4.70	0.00	7.90	1.20	0.00	0.00	11.50	0.20	0.10
	656.20	Брекчия по кварцевому метасоматиту	0.30	0.00	0.10	86.80	3.40	0.70	6.00	0.40	0.00	0.00	2.00	0.00	0.60
	681.40	Аркозовые метапесчаники	0.00	7.20	0.40	31.50	40.60	5.80	11.70	0.90	0.00	0.00	1.50	0.00	0.30

Таблица 3

Фазовый минеральный состав полосчатой пирит-карбонатной руды (обр. СА18)

Table 3

Phase mineral composition of banded pyrite-carbonate ore (sample CA18)

Фаза	Минерал	S (пикс.)	S (%)	мас. % (норм.)										
				Na	Mg	K	Ca	Sr	Ba	Mn	Fe	Al	Si	S
P1	Мп кальцит	58608	22.90	0.00	0.00	0.00	95.4	0.30	0.10	2.40	1.04	0.13	0.20	0.00
P2	Мп барито- -кальцит	73785	28.80	0.60	0.50	0.00	90.2	0.30	3.80	2.30	0.86	0.12	0.90	0.00
P3	Витерит			0.00	0.90	0.00	73.6	0.40	15.90	1.70	0.58	0.03	4.20	1.70
P3a	Барит + витерит	13071	5.10	0.00	0.30	0.60	78.0	0.40	13.70	2.00	0.63	0.09	0.40	2.70
P4	Стронцианит	13063	5.00	0.00	0.00	3.00	69.9	24.60	0.00	1.10	0.87	0.00	0.10	0.10
P5	Мп анкерит	13305	5.20	0.00	4.10	1.30	86.5	0.40	0.40	2.50	4.61	0.00	0.00	0.00
P6	Кварц	6807	2.70	0.00	0.00	0.00	12.7	0.10	0.10	0.30	0.35	0.81	81.00	3.80
P7	Кварц + ПШ + серицит			0.00	0.50	12.6	27.2	0.10	0.40	0.80	5.56	9.08	30.00	12.90
P7a	Кварц + скаполит	30021	11.70	0.00	0.10	0.00	57.80	0.30	5.60	1.30	0.68	7.26	26.20	0.00
P9	Пирит	46540	18.20	0.60	0.00	0.00	6.10	0.00	0.00	0.10	27.51	0.06	1.80	63.50
P10	Ферринатрит	1000	0.40	7.90	0.30	0.00	0.07	0.00	0.00	0.10	21.92	0.09	0.00	69.60
	Всего	256200	100.00											

менный состав, в частности по соотношению Mg/Fe в зонах роста зерен доломита. На полученных изображениях также наблюдаются микропрорастания карбонатов и альбита, доломита и кальцита. Внутри рудного пирита установлены микровключения самородного золота и теллуридов Ag (1–5 мкм), рассеянная «пыль» Au и Ag во всем сечении изученного зерна пирита, а также относительно крупное микровключение ангидрита (70 мкм).

Метод XRF. Этим методом исследовано несколько образцов разных типов руд.

Полосчатые пирит-карбонатные руды на месторождении являются одним из главных источников золота и были изучены на примере образца СА18. XRF анализ показал сложное строение образца полосчатой пирит-карбонатной руды (табл. 3). Основная масса образца сложена кальцитом (>50 %) и пиритом (18.2 %). Зерна пирита размером от долей до 1 мм образуют равномерно вкрапленную текстуру (рис. 4, 5) и не связаны с полосчатостью породы. Кальцит и другие карбонаты образца СА18 характеризуются устойчивой примесью Мп (в среднем, 1.5 мас. %) (табл. 3).

Распределение Ва, в отличие от распределения S, соответствует полосчатому распределению кальцита (рис. 4, 5). Этот факт и отсутствие корреляционной связи Ва и S позволяют предполагать присут-

ствие Ва здесь не в форме барита, как было принято считать до настоящего времени, а в форме карбоната. В природных кальцитах примесь бария может достигать 1–2 мас. % (Годовиков, 1975). Более существенная примесь Ва (до 10 %) может содержаться в арагоните. Описан минерал баритокальцит $\text{CaBa}(\text{CO}_3)_2$ (<https://www.mindat.org/min-466.html>), который ранее рассматривался как член группы арагонита (Годовиков, 1975). Известен собственный карбонатный минерал Ва витерит (BaCO_3). По уровням содержания Ва – в образце СА18 мы предполагаем присутствие баритокальцита (28 %) и витерита (около 5 %) (табл. 3). Баритокальцит, помимо вкрапленности, также часто образует тонкие оторочки вокруг метакристаллов пирита.

Стронций присутствует в виде стронцианита SrCO_3 , который образует тонкие секущие прожилки и мелкие гнезда, занимая порядка 5 % площади образца. Анкерит слагает обломочные зерна размером до 1–2 мм, ориентированные согласно полосчатости (~5 %). Темные полосы на фоне белого кальцита сложены силикатными минералами (14.4 %), которые представлены кварцем, серицитом и полевыми шпатами. Наиболее распространены зерна кварца (0.5 мм и менее), сконцентрированные как по полосчатости, так и разбросанные по всей массе (рис. 4) в виде полуокатанных и остроугольных

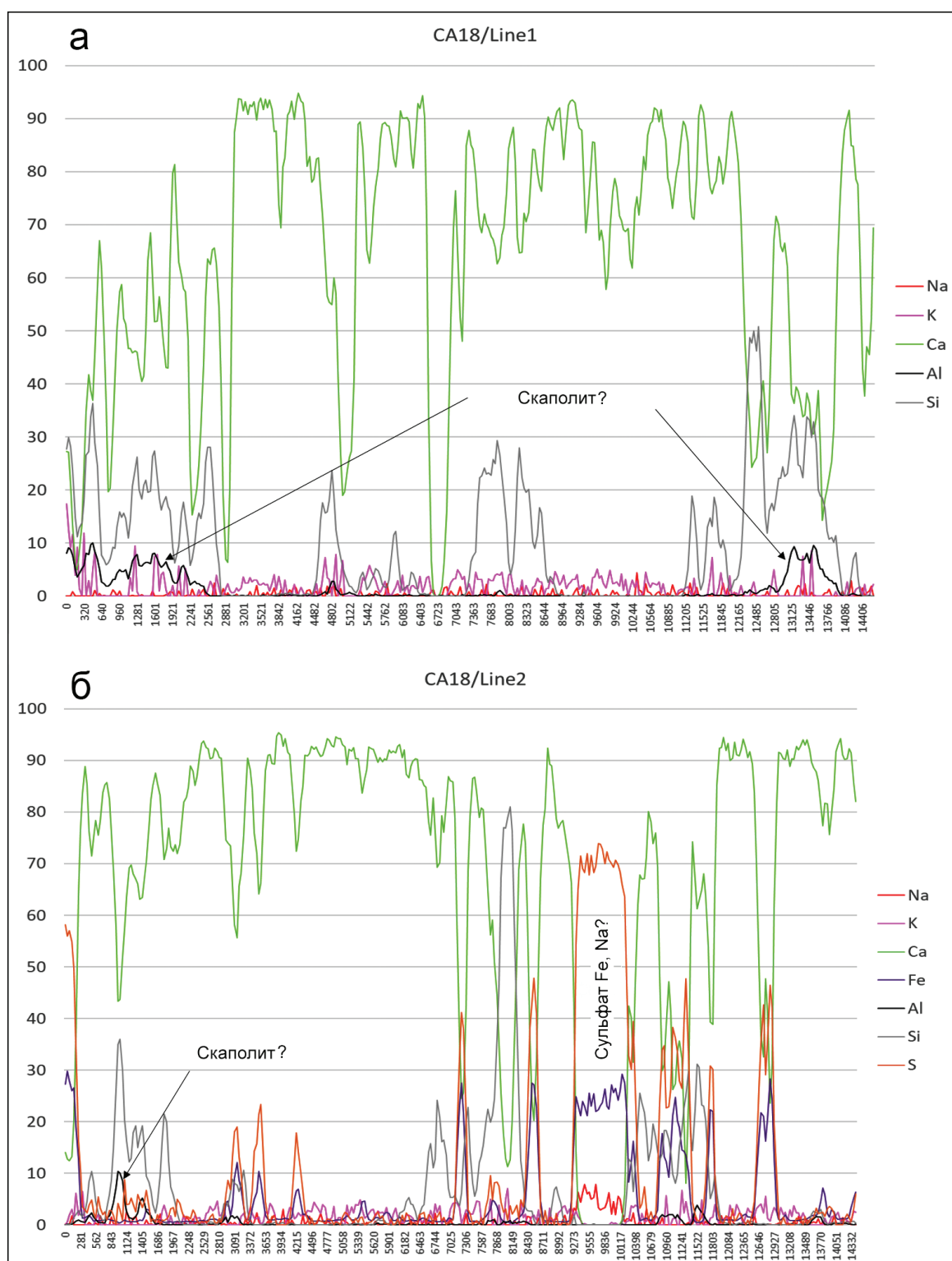


Рис. 6. Графики нормированных содержаний некоторых элементов, полученных в результате линейного профилирования на участке образца CA18, указывающих на возможное присутствие мейонита в ассоциации с кварцем и серицитом (а) и ферринагритом (б).

Fig. 6. Normalized contents of some elements as a result of linear profiling of sample CA18 indicating the possible presence of meionite in assemblage with quartz and sericite (a) and ferrinatrite (б).

частиц. Таким же образом, субсогласно полосчатости породы, распределены мелкие зерна шеелита (карта W, рис. 4). Кроме кварца по результатам XRF профилирования выделяются мелкие частицы, в составе которых присутствуют Ca, Al и Si, сходные по соотношению элементов с минералами группы скаполита (мейониту?) (рис. 6а).

При линейном профилировании образца пирит-карбонатного метасоматита установлена положительная корреляция между Na, Fe и S (рис. 6б). Одним из объяснений этой связи является возможное присутствие в образце вторичного минерала ферри-натрита $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, содержание которого может составлять 0.4 % (табл. 3). Подобные взаимоотношения между Na и S отмечались и ранее для выборки из минерализованных зон и руд Центрального участка, что говорит в пользу распространения вторичных водорастворимых сульфатов Na в рудах.

Пирит-карбонат-кварц-альбитовые руды изучены в образце СА25 (рис. 2). Усредненный элементный состав образца (мас. %, здесь и далее по данным XRF анализа): Na 7.94, Al 9.90, Si 32.22, S 17.90, K 1.04, Ti 0.51, Mn 0.35, Fe 17.29, P 0.30, Mg 1.46, Ca 10.93, As 0.01, Sr 0.03, Sb 0.01, Te 0.05, Ba 0.01, W 0.02, Au 0.01, Pb 0.01, Bi 0.01. Основная масса представлена мелкозернистым агрегатом кварца и альбита, совокупная площадь которых оценивается в 34.5 %.

В основной массе развиты струйчатые пирит-карбонатные агрегаты (рис. 7). Карбонаты (32 %) представлены большей частью анкеритом с повышенным содержанием Mn. Доля пирита составляет 19.7 %. Он образует мелкую вкрапленность, мелкозернистые гнезда и извилистые прожилковые скопления мощностью до 2–3 мм.

Сеть тонких извилистых секущих прожилков, содержащих пирит, имеет переменчивый состав и выделяется по совокупности распределения K, Ti, Fe, S, Al и Si. В составе прожилков доминирует КППШ (4.5 %), присутствует рутил (1.5 %), а также предполагается присутствие водорастворимых сульфатов K и Fe. По совпадению полей на картах Ca и P предполагается присутствие апатита (4.6 %) в тесном срастании с альбитом и анкеритом.

Пирит-барит-кварц-анкеритовые руды изучены в образце 1797_162.6. Такие руды образуют жилы, прожилки, брекчии, местами кавернозной и пористой текстуры. Половина изученного образца (44.7 %) сложена филлитом, состоящим из кварца и серицита с небольшим количеством КППШ на контакте с жилой (рис. 2, 8). Вторая половина пред-

ставлена пирит-барит-кварц-карбонатной жилой (рис. 8). Усредненный элементный состав образца (мас. %): Na 0.73, Al 7.82, Si 40.76, S 8.31, K 2.24, Ti 0.45, Mn 0.45, Fe 14.56, P 0.31, Mg 1.70, Ca 19.85, Zn 0.01, As 0.01, Sr 0.13, Sb 0.02, Te 0.04, Ba 1.95, W 0.57, Au 0.04, Pb 0.02, Bi 0.01.

По совокупности элементов среди карбонатов в составе прожилка выделены две основные разновидности: Mn анкерит (29.4 %) и кальцит (7.1 %); местами в пределах поля анкерита предполагается присутствие сидерита по увеличению интенсивности Fe и отсутствию S на фоне развития карбонатов, отсутствию в образце оксидов Fe (гематита, магнетита), и, соответственно, по элементному набору в точках анализа. Кальцит наблюдается только в составе основного прожилка, где он сростается с анкеритом, кварцем и пиритом. Анкерит также выполняет отдельные тонкие микропрожилки во вмещающей породе в ассоциации с пиритом (рис. 8). Зернистые агрегаты кварца распространены в основном, по контакту жилы и в центральной ее части (6.1 %).

Основная часть пирита (5.8 %) сосредоточена в жиле в виде вкрапленности гипидиоморфных кристаллов размером от 0.1 до 1 мм, а также в виде прослая (0.5–0.7 мм) на контакте жилы и реже в виде мелкой вкрапленности во вмещающей породе. Подобным образом распределен и барит, образующий таблитчатые кристаллы и их сростки размером до 1–2 мм в пределах пирит-кварц-карбонатной жилы. Ряд точечных анализов в контурах жилы показывает присутствие заметных количеств Ba при отсутствии либо при пониженном содержании S, что свидетельствует в пользу присутствия карбоната Ba. Отдельные анализы также указывают на присутствие в образце шеелита (до 0.3 %).

Пирит-полевошпат-кварцевые руды (1327-1) представлены образцом гидротермальной брекчии с кварцевым цементом, остроугольными обломками филлитов и небольшим количеством полевых шпатов и сульфидов (рис. 2, рис. 9). Альбит и КППШ развиваются в виде реакционных каемок вокруг обломков филлитов. В кварце наблюдаются гнезда пирита и других рудных минералов, в обломках – их более мелкая вкрапленность. Усредненный элементный состав изученного образца (мас. %): Na 1.32, Al 9.01, Si 69.6, S 5.25, K 3.81, Ti 0.65, Mn 0.11, Fe 4.88, P 0.41, Mg 0.63, Ca 2.64, Cu 0.89, Zn 0.14, As 0.07, Sr 0.03, Ag 0.01, Sb 0.35, Te 0.02, Ba 0.06, W 0.05, Au 0.04, Pb 0.01, Bi 0.02.

По результатам XRF анализа основу образца составляет кварц (62 %) (рис. 9). Обломки филли-

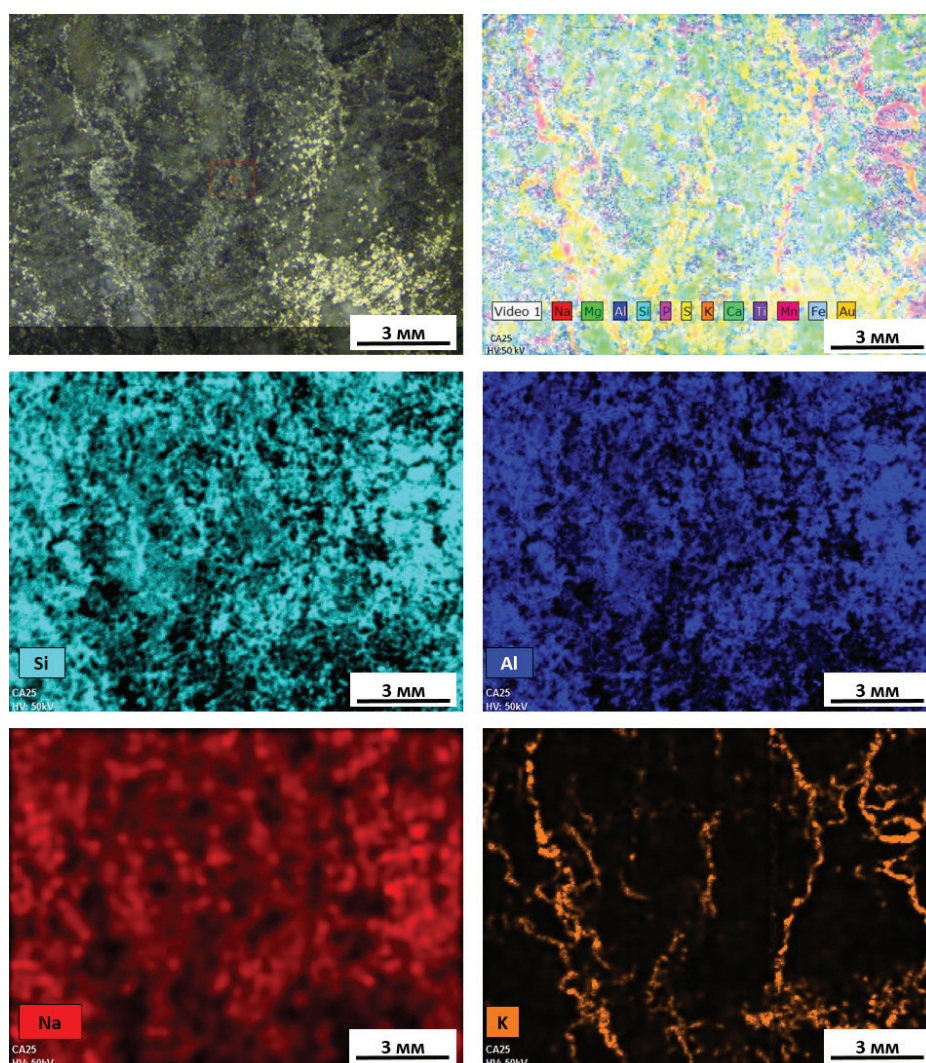


Рис. 7. Изученная область образца CA25 пирит-карбонат-кварц-альбитовой руды, сводная полиэлементная карта (Q-Map) и карты распределения нормированных содержаний Si, Al, Na и K, указывающие на преобладание альбита и присутствие сети редких прожилков калийсодержащих минералов.

Северное рудное тело, скв. D1320, глубина 435.7 м.

Fig. 7. Studied area of sample CA25 of pyrite-quartz-albite ore, summarized multielemental map (Q-Map) and distribution maps of normalized Si, Al, Na and K contents indicating the predominance of albite and the presence of rare veinlets of K-bearing minerals.

Northern ore body, borehole D1320, depth of 435.7 m.

тов сложены преимущественно серицитом (~14 %). По краям и микротрещинам обломки замещаются альбитом (4 %) и микроклином (4.2 %). Преимущественно в кварце наблюдаются (рис. 10) ксеноморфные зерна и агрегаты пирита (7.8 %), в сростках с которым присутствуют ксеноморфные выделения тетраэдрита (4.7 %) размером до 1–2 мм и более. Коррелирующие содержания P и Ca указывают выделения апатита (1.5 %) (рис. 9), с которым связан практически весь Ca. В небольших количествах (0.38 %) по картам и на базе точечных XRF анали-

зов выделены также халькопирит, самородное золото и теллуриды Au.

Пирит-гематит-кварц-полевошпат-серицитолитовые руды (SR1) слагают мощные интервалы в одной из рудоносных зон участка Сарытор (рис. 2, рис. 11). Усредненный элементный состав изученного образца (мас. %): Al 24.04, Si 49.60, P 0.11, S 2.21, K 9.48, Mg 0.84, Ca 4.85, Ti 1.25, Fe 7.62, Ba 0.01.

По соотношению элементов видно, что основой образца является агрегат светлых слюд (серицитолит) (Al–Si–K), составляющий (51.6 %). В об-

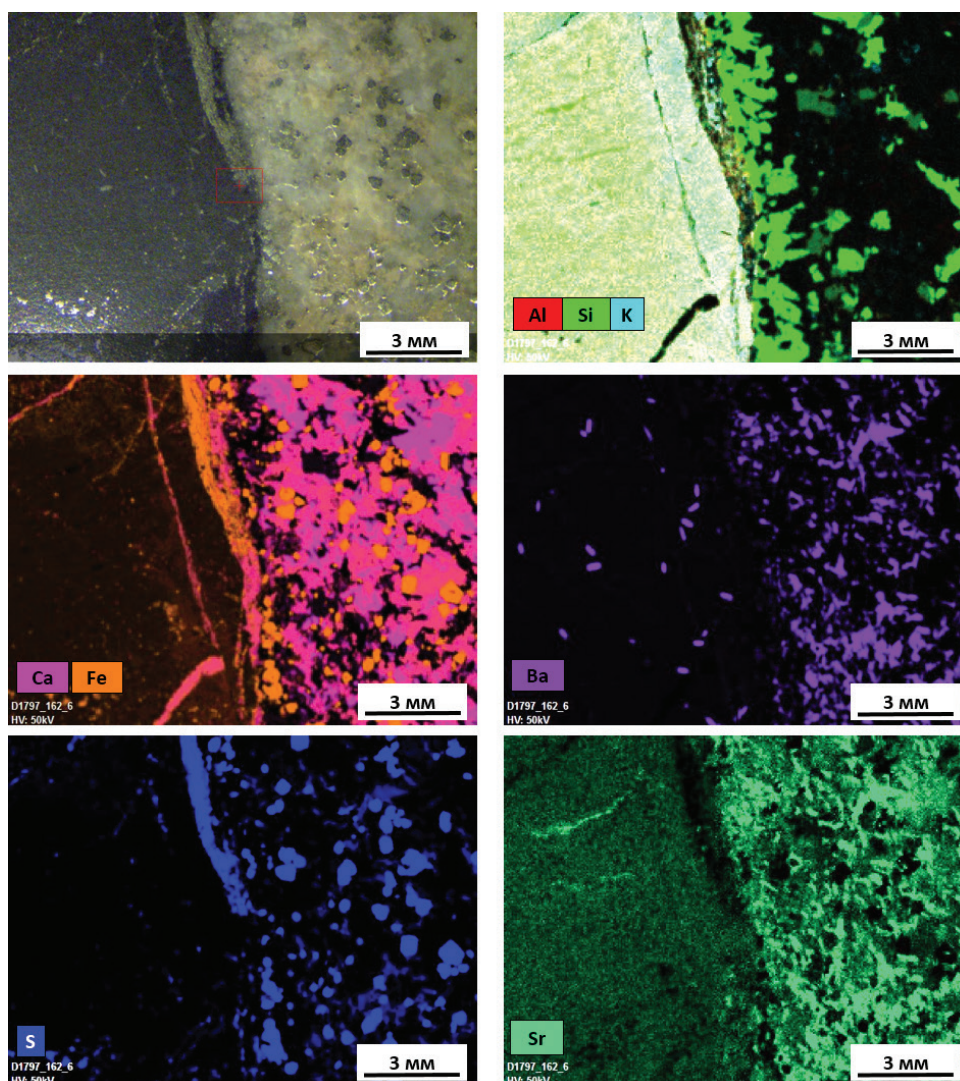


Рис. 8. Изученная область образца 1797_162.6 пирит-барит-кварц-анкеритовой руды и карты распределения нормированных содержаний элементов, указывающие на поля распространения ассоциации серицита+кварца+микроклина и кварца (карты Al, Si и K), пирита, кальцита и анкерита в составе кварц-карбонатной жилы (карты Ca-Fe и S) и присутствие барита (BaSO_4) и витерита (BaCO_3)? (карты Ba и S).

Рудоносная зона Хоккейная Ключка, скв. D1797, глубина 162.6 м.

Fig. 8. The studied area of sample 1797_162.6 of pyrite-barite-quartz-ankerite ore and distribution maps of normalized contents of elements indicating the presence of sericite + quartz + microcline assemblage with quartz (Al, Si and K map), pyrite, calcite and ankerite in quartz-carbonate vein (Ca-Fe and S maps) and barite (BaSO_4) and viterite (BaCO_3)? (Ba and S maps).

Ore-bearing zone Khokkeinaya klyushka (Hockey Stick), borehole D1797, depth of 162.6 m.

разце также присутствуют гнезда и линзообразные прожилки кварца (10.4 %) и альбит (11.4 %), который определен косвенно по тонам распределения Si на карте нормированных содержаний Si (рис. 11). По картам распределения элементов видно, что среди рудных минералов преобладает гематит (12 %). Он образует полосы, ориентированные по расщеплению породы мощностью от 1 до 3 мм (рис. 12). Пирит выявляется по картам распределения нормированных содержаний S и Fe и составляет 3.7 %

изученной площади. Пирит представлен агрегатом зерен размером 3–4 мм, а также вкрапленностью гипидиоморфных кристаллов и изометричных зерен размером <1 мм. Серицитолит содержит значительное количество рутила (7.6 %) в виде рассеянной вкрапленности мелких и скоплений более крупных зерен (до 0.1–0.3 мм). По картам Ca, P и Fe примерно в одинаковых количествах установлено присутствие анкерита (1.7 %) и апатита (1.7 %) (рис. 12).

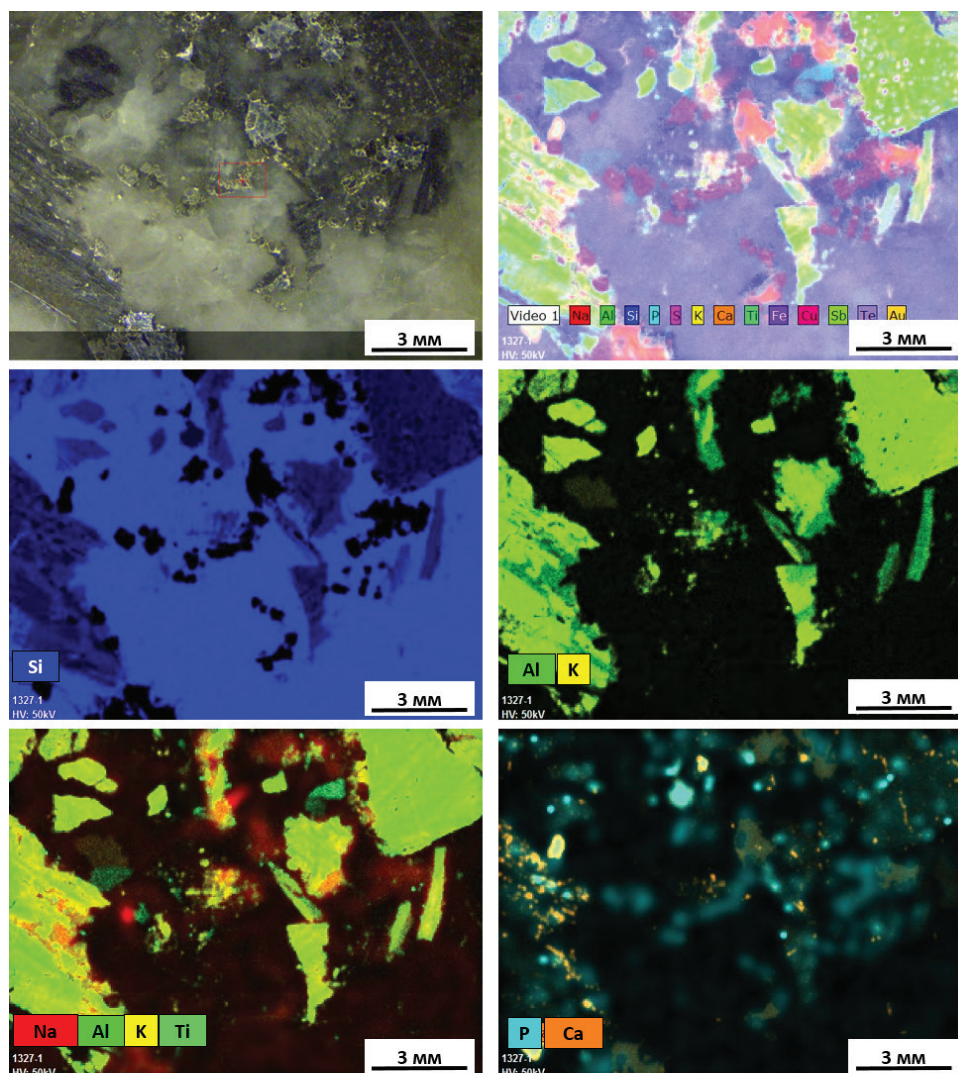


Рис. 9. Изученная область образца 1327-1 пирит-полевошпат-кварцевые руды, сводная полиэлементная карта (Q-Map) и карты распределения нормированных содержаний Si, Al, Na, K и Ti, указывающие на преобладание в основной массе брекчии кварца, а в обломках – серицита (Al, K, Si, Ti).

Здесь и на рис. 10, рудоносная зона Южный Раздув, скв. D1327, глубина 160 м.

Fig. 9. Studied area of sample 1327-1 of pyrite-feldspar-quartz ore, summarized polyelemental map (Q-Map) and distribution maps of normalized Si, Al, Na, K and Ti contents indicating the presence of dominant quartz in breccia matrix and sericite (Al, K, Si, Ti) in the clasts.

Here and in Fig. 10, ore-bearing zone Yuzhny Razduv (South Blob), borehole D1327, depth of 160 m.

Пирит-кварц-альбит-карбонат-серицитолитовые руды из новой рудоносной зоны Хоккейная Ключка (*Hockey Stick*) представлены образцом пиритизированного серицитолита с сетью пирит-карбонатных прожилков и микропрожилков (рис. 2, рис. 13). Усредненный состав изученного образца (мас. %): Al 28.29, Si 46.37, K 10.91, S 1.25, Mg 0.96, Ca 4.14, Ti 0.26, Fe 5.15, Na 2.52, Ba 0.01, Mn 0.06, Cr 0.04.

В образце преобладают слюды (81 %), с которыми тесно связан альбит (6.7 %), образующий мелкие зерна и микропрожилки, замещающие се-

рицитолит (рис. 13). Кварц, в основном, составляет центральную часть секущего прожилка мощностью 1.5–2 мм. На картах нормированных содержаний Ca, Mg, Fe и S (рис. 13) хорошо выявляются поля развития Mn-анкерита (5.8 %) и пирита (2.4 %). Эти две фазы образуют микропрожилки в серицитолите. Значительная часть анкерита образует оторочку по краям основного карбонат-кварцевого прожилка. Пирит развит в виде вкрапленности зерен размером не более 0.5 мм как в серицитолите, так и в карбонат-кварцевом прожилке.

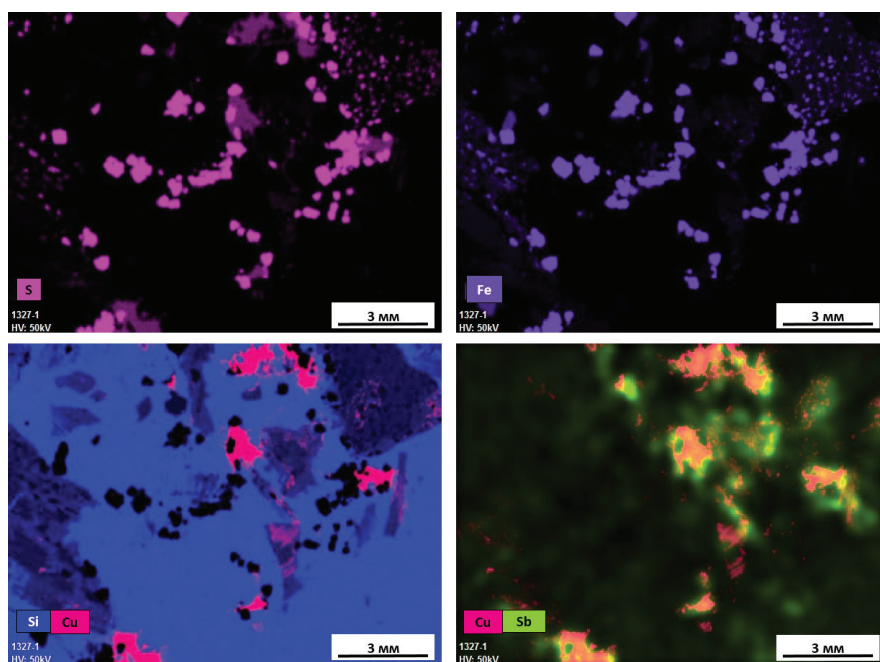


Рис. 10. Карты распределения нормированных содержаний S, Fe, Cu, Si и Sb, показывающие границы ксеноморфных агрегатов пирита (Fe, S) и тетраэдрита (Sb, Cu, S) преимущественно в кварце и реже в измененных обломках филлитов.

Fig. 10. Distribution maps of normalized contents of S, Fe, Cu, Si and Sb shown the boundaries of anhedral aggregates of pyrite (Fe, S) and tetrahedrite (Sb, Cu, S) mostly in quartz and rarely in altered fragments of phyllites.

Пирит-карбонат-калишпатовые руды (145202) представлены разновидностью богатой руды, первоначально описанной по шлифам как существенно кварц-полевошпат-карбонатный метасоматит с преобладанием микрозернистого кварца в основной массе (рис. 2, рис. 14). Нами предварительно предполагалось что это серицитолит. Усредненный элементный состав образца, по данным XRF (мас. %): Si 48.49, Al 13.74, K 15.59, Na 0.21, Ca 7.30, Fe 6.29, S 5.22, Mg 1.00, Ti 0.91, P 0.43, Cr 0.12, Mn 0.52, Ba 0.14, Zn 0.01, As 0.01, Sr 0.06, Te 0.03, Au 0.02, Pb 0.01, Bi 0.01.

По результатам XRF анализа изученный образец содержит около 77 % полевых шпатов. Соотношение Si, Al и K 3.0:1.0:1.4 указывает на преобладание в составе основной массы микроклина. Как показал анализ выборок, в образце практически отсутствует чистый кварц. Содержания Si при отсутствии K сопровождаются относительно высокими содержаниями Al, что может указывать на возможное замещение КПШ каолинитом. На полевошпатовую основную массу наложена ортогональная сеть прожилков мощностью 0.1–0.3 мм, сложенных Mn-анкеритом (13.8 %), что видно на картах распределения Ca и Fe (рис. 14). Зерна пирита составляют 4.3 % площади образца. Он образует агрегаты зерен

и вкрапленность, ориентированные в виде извилистых полос.

Загипсованные пирит-гематит-карбонатные руды (171614) представляют собой пирит-карбонатные метасоматиты, замещенные гипсом (рис. 2, рис. 15). Образец загипсованных руд отобран на большой глубине и характеризует нижнюю часть рудоносной системы в зоне Южный Раздув. Широкое распространение сходных загипсованных руд наблюдается в приповерхностной части системы (в зоне Хоккейная Ключка). Усредненный элементный состав образца (мас. %): Na 0.41, Ca 36.43, Al 0.10, S 33.30, Mg 0.79, K 3.09, Si 0.18, Fe 17.42, Mn 1.87, Cu 0.56, Sr 4.31, Ba 1.11, P 0.02, Ti 0.15, Cu 0.59, Zn 0.01, As 0.01, Sb 0.04, Te 0.08, W 0.02, Au 0.02, Pb 0.03, Bi 0.01.

В результате XRF анализа в образце установлено преобладание гипса (55 %) по совмещенным картам распределения Ca-S и Fe-S (рис. 15). Марганец тесно связан с Mg, маркируя распределение Mn-содержащего анкерита. «Реликтовый» Mn-анкерит, по которому первоначально развивался гипс, составляет порядка 7 %. Из рудных минералов наиболее широко распространен гематит (17.4 %).

Пирит (5 %) образует гипидиоморфные и ксеноморфные зерна размером от мельчайших до

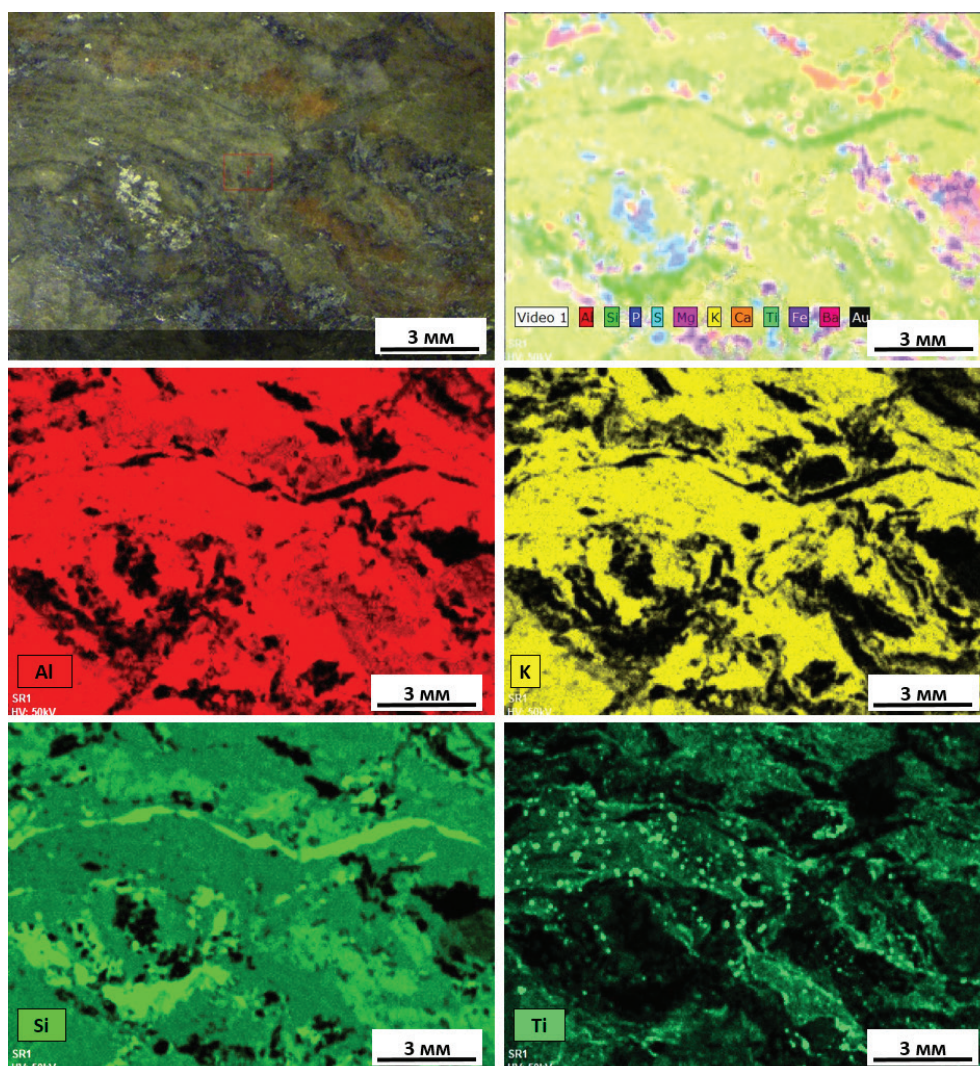


Рис. 11. Изученная область образца SR1 пирит-гематит-кварц-полевошпат-серицитолитовой руды, сводная полиэлементная карта (Q-Map) и карты распределения нормированных содержаний K, Si и Al, иллюстрирующие присутствие кварца (ярко-зеленые агрегаты и прожилки), серицита-мусковита в основной массе (совпадение полей K, Al и Si), альбита (зеленые поля средней интенсивности на карте Si с Al, но без K) и рутила в сериците (карта Ti).

Участок Сарытор, скв. SR-09-190, глубина 235.0 м.

Fig. 11. Studied area of sample SR1 of pyrite-hematite-quartz-feldspar-sericitolite ore, summarized polyelement map (Q-Map) and distribution maps of normalized contents of K, Si and Al indicating the presence of quartz (brightly green aggregates and veins), sericite-muscovite of matrix (coincided areas of K, Al and Si), albite (green areas on Si map with Al and without K) and rutile in sericite (Ti map).

Sarytor area, borehole SR-09-190, depth of 235.0 m.

0.5–2 мм (рис. 15). Халькопирит (5 %) образует ксеноморфные выделения и агрегаты размером до 1–2 мм. Чаще всего он находится в сростках либо с пиритом, либо с гематитом. Широко распространен Sr, поля которого чаще всего совпадают с Ba. Присутствие в образованном ими соединении серы позволяет утверждать, что весь Sr и Ba здесь связаны в барийсодержащем целестине, количество которого оценивается в 7.3 %. По результатам профилирова-

ния образца выделения барийсодержащего целестина часто характеризуются высокими содержаниями K (0.0–9.7 мас. %) и, реже, Na (0.0–7.5 мас. %), на фоне высоких содержаний S. Это говорит о большой вероятности присутствия в образце также сульфатов K и Na. Карта распределения K на фоне карты S показывает присутствие в образце сульфатов K в количестве до ~3 %.

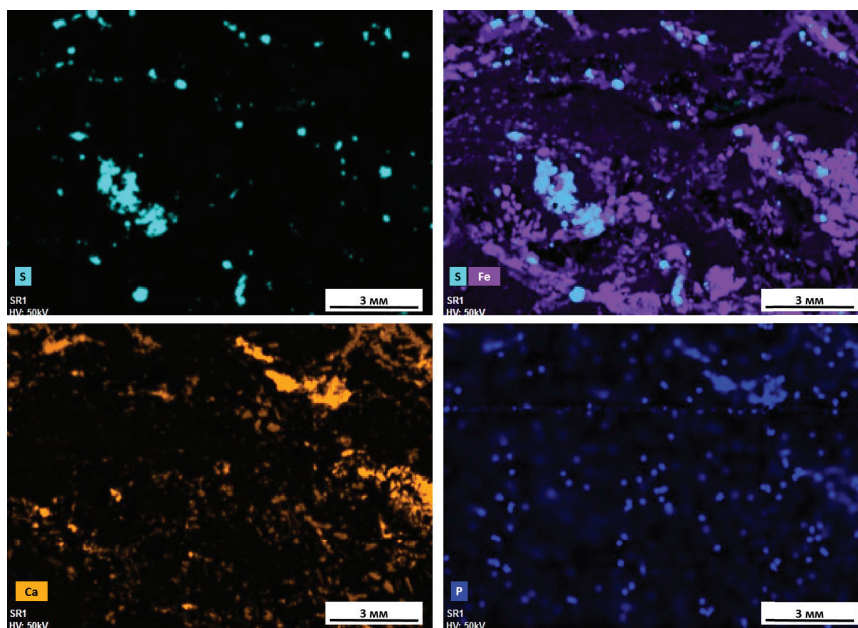


Рис. 12. Карты распределения нормированных содержаний S и Fe в образце SR1, указывающие на присутствие пирита (совпадающие поля Fe и S) и гематита (поля Fe без S), а также Ca и P, указывающие на присутствие анкерита с повышенным содержанием P, апатита (зерна с P и меньшими содержаниями Ca) и, возможно, вивианита (совпадение полей P и Fe).

Участок Сарытор, скв. SR-09-190, глубина 235.0 м.

Fig. 12. Distribution maps of normalized S and Fe contents in sample SR1 indicating the presence of pyrite (coincided areas of Fe and S), hematite (Fe areas without S), as well as maps of Ca and P showing the presence of P-bearing ankerite, apatite (grains with P and lower Ca content), and possibly vivianite (coincided areas of P and Fe).

Sarytor area, borehole SR-09-190, depth of 235.0 m.

Закключение

Изучение минерального состава пород и руд месторождения Кумтор проводилось массово традиционными визуально-оптическими методами; в ограниченном количестве руды были проанализированы методом QXRD с определением количественных соотношений минералов в рудах. В результате этих исследований были получены общие представления о составе и взаимоотношениях основных минералов, составляющих руды месторождения, представленные кварцем, алюмосиликатными минералами, карбонатами, сульфатами, пиритом, шеелитом и гематитом. В то же время установлены широкие вариации в количественных взаимоотношениях основных минералов в разрезе рудоносной зоны и в рудоносных зонах разных участков, зависящие от типа рудовмещающих пород и интенсивности развития многоэтапного метасоматоза.

При таком разнообразии минералов и тонкозернистой структуре руд изучение минерального состава с помощью оптического микроскопа не всегда дает однозначные ответы о составе пород и

руд и количественных содержаниях разных минералов. Особенно это касается микроскопических сростков полевых шпатов с кварцем, взаимопрорастаний калиевых полевых шпатов и альбита, альбита и доломита, доломита и кальцита, и разделения минералов группы карбонатов, образующих широкие ряды изоморфных смесей с Ca, Mg, Mn и Fe.

В данном случае идеальным оказалось применение QXRD анализа при изучении пульпы и хвостов усредненных керновых проб. Однако, этот вид анализа требует специальной аппаратуры, соответствующей компьютерной базы данных, специального программного обеспечения и исполнителей высокой квалификации, которые не всегда доступны.

В связи с этим возникла необходимость выбора дополнительного метода исследований минерального состава руд, позволяющего оперативно получать корректное соотношение минеральных фаз в образцах при относительно низких затратах. Метод XRF, лежащий в основе работы прибора TORNADO M4, позволяет проводить анализ керна буровых скважин, полированных секций и тонких

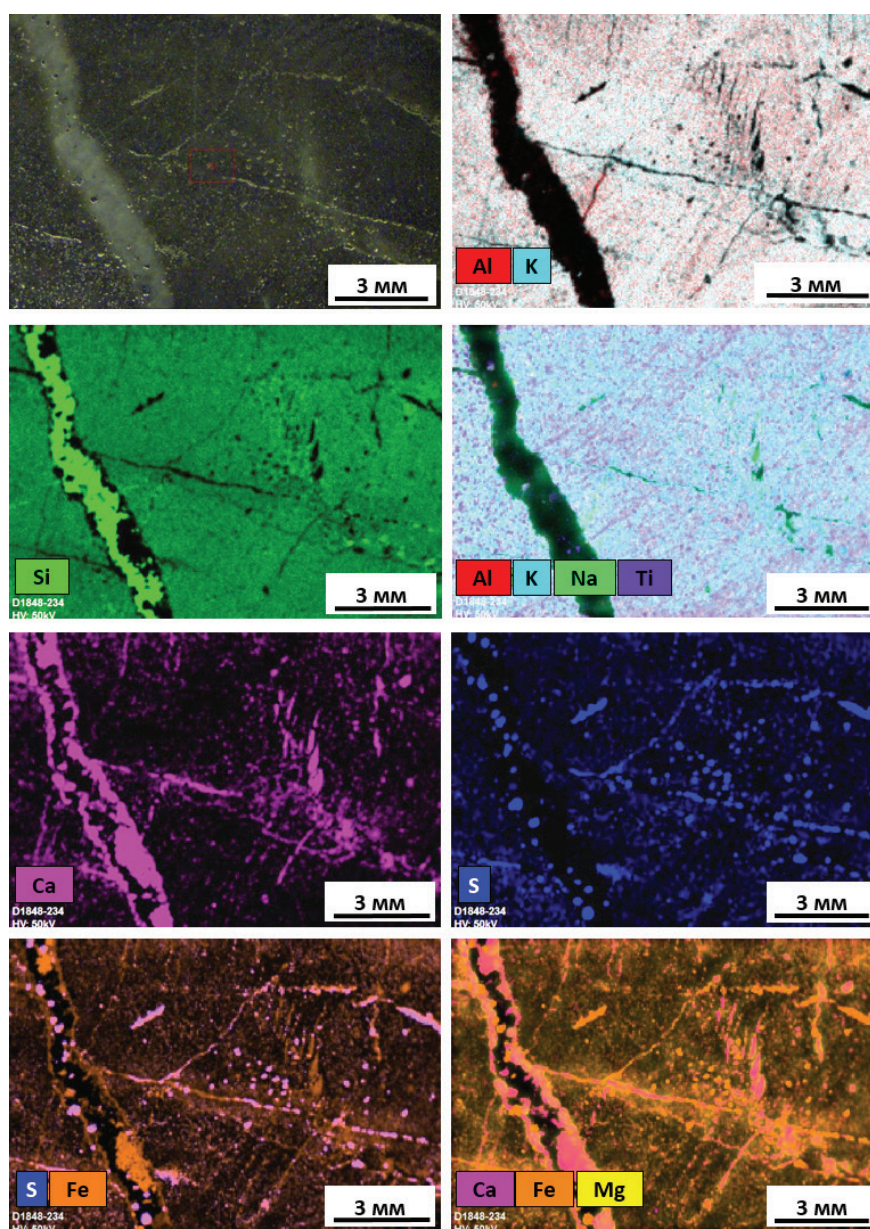


Рис. 13. Изученная область образца 1848_234 пирит-кварц-альбит-карбонат-серицитолитовой руды и карты распределения нормированных содержаний Si, Al, K, Na, Ti, Ca, Mg и Fe, демонстрирующие присутствие кварца (ярко-зеленый прожилок и отдельные включения), серицита-мусковита в основной массе (совпадение полей K, Al и Si), альбита (зеленое и микропрожилки на карте Al, K, Na, Ti) в основной массе и прожилках в сростках с анкеритом (совпадение полей Ca, Mg и Fe) и включенников пирита (совпадение полей S и Fe).

Рудоносная зона Хоккейная Ключка, скв. D1848, глубина 234.0 м.

Fig. 13. Studied area of sample 1848_234 and distribution maps of normalized Si, Al, K, Na, Ti, Ca, Mg and Fe contents showing the presence of quartz (brightly green veins and individual inclusions), sericite-muscovite in matrix (coincided areas of K, Al and Si), albite (green and microveins on Al, K, Na, Ti map) in matrix and in aggregates with ankerite (coincided areas of Ca, Mg and Fe) and pyrite inclusions (coincided areas of Fe and S).

Ore-bearing zone Khokkeinaya klyushka (Hockey Stick), borehole D1848, depth of 234.0 m.

срезов, окаменелостей или геологически интересных образцов без какой-либо или минимальной предварительной подготовки, при относительно

низкой стоимости. Он имеет ряд преимуществ по сравнению с изучением минерального состава с помощью оптического микроскопа и рентгеновской

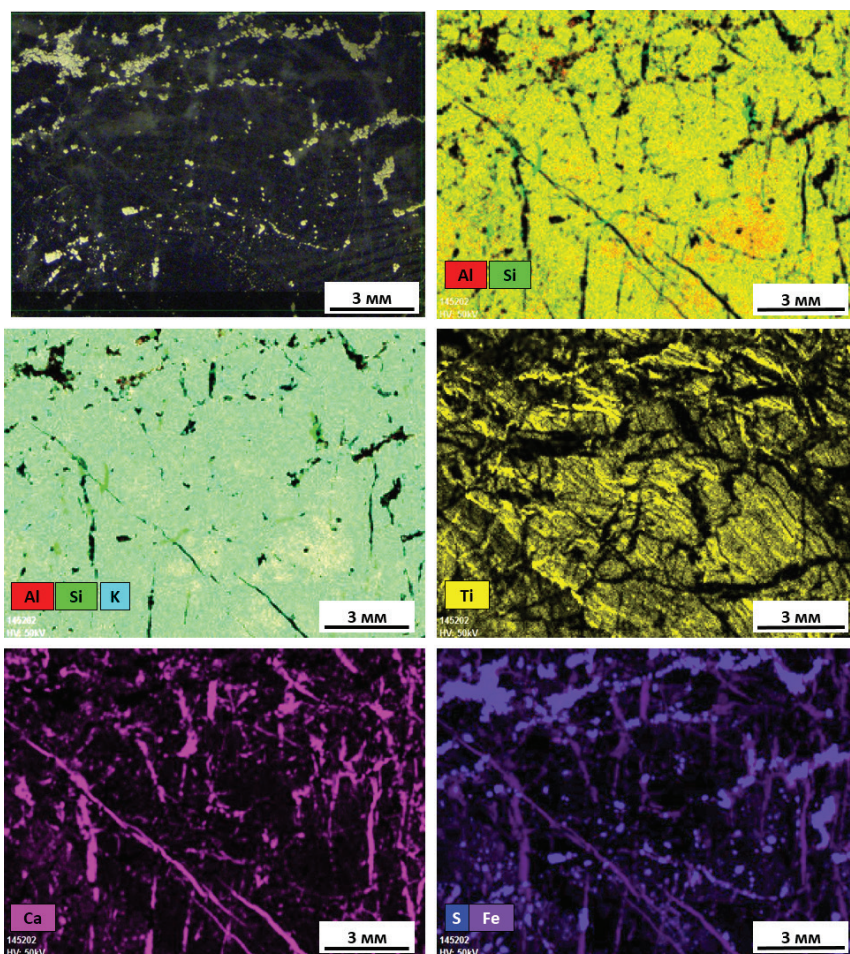


Рис. 14. Изученная область образца 145202 пирит-карбонат-полевошпатовой руды и карты распределения нормированных содержаний Si, Al, K и Ti, демонстрирующие присутствие кварца (ярко-зеленые микро-прожилки и отдельные вкрапления), микроклина (совпадение полей K, Al и Si), первичную полосчатость породы (Ti), а также ортогональную систему карбонатных прожилков (Ca и Fe) и извилистые субгоризонтальные прожилки – агрегатные скопления ксеноморфных зерен пирита (Fe-S).

Рудоносная зона Южный Раздув, скв. D1452, глубина 172.2 м.

Fig. 14. Studied area of sample 145202 of pyrite-carbonate-feldspar ores and distribution maps of normalized Si, Al, K and Ti contents showing the presence of quartz (brightly green veins and individual inclusions), microcline (coincided areas of K, Al and Si), primary banding of rock (Ti map), as well as the orthogonal system of carbonate veins (Ca-Fe) and sinuous subhorizontal veins (aggregates of anhedral pyrite grains, Fe-S).

Ore-bearing zone Yuzhny Razduv (South Blob), borehole D1452, depth of 172.2 m.

дифрактометрии, в частности, это информация об элементном составе изучаемого выделения и текстурно-структурных взаимоотношениях различных минеральных ассоциаций в пределах образца, возможность обнаружения минералов при их низком содержании.

Проведенные экспериментальные исследования разных минеральных типов руд месторождения Кумтор методом XRF на анализаторе TORNADO M4 показали перспективность использования рентгенофлуоресцентного анализа при изучении состава разных природных сортов руд месторождения.

Установлено соотношение минералов в разных типах руд, уточнен их химический состав в дополнение к результатам ранее проведенных минералого-петрографических исследований, определены формы и размеры выделений основных рудных и нерудных минералов, их сростков, намечен ряд неизвестных ранее на месторождении возможных новых минералов, в частности, водорастворимых сульфатов.

Наш первый практический опыт применения этого метода показал возможность проводить исследования и без наличия автоматизированной базы

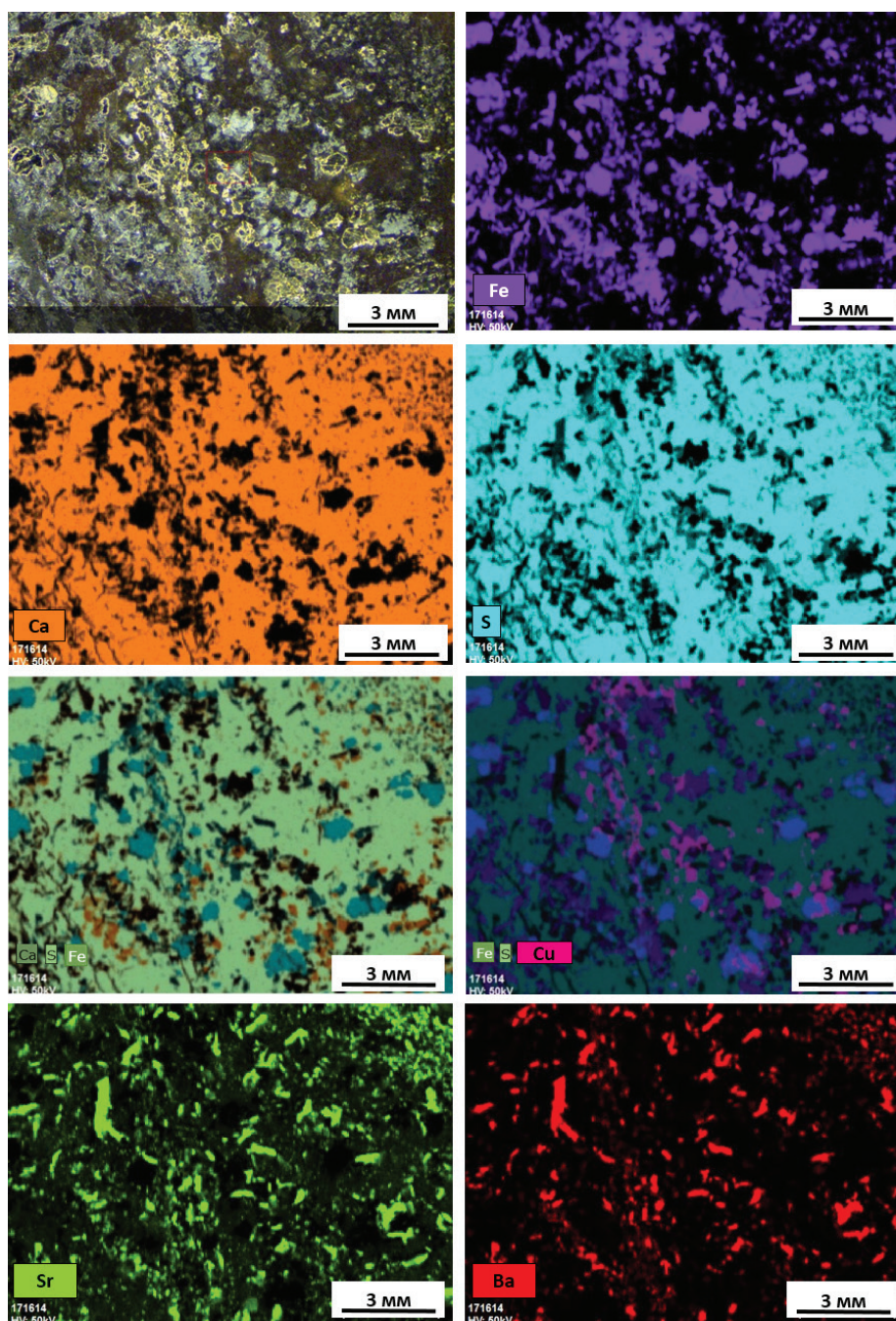


Рис. 15. Изученная область образца 171614 загипсованной пирит-гематит-карбонатной руды и карты распределения нормированных содержаний S, Ca, Fe, показывающие преобладание в основной части образца гипса (голубовато-зеленое), а также распределение анкерита (коричневое), пирита (голубое), гематита (фиолетовое) и халькопирита (розовое) (совмещенные карты Ca-S-Fe и Fe-S-Cu) и барит-содержащего целестина (карты Sr и Ba).

Рудоносная зона Южный Раздув, скв. D1716, глубина 702.8 м.

Fig. 15. Studied area of sample 171614 of pyrite-hematite-carbonate-gypsum ore and distribution maps of the normalized contents of S, Ca, Fe showing the predominance of gypsum (bluish-green) and the distribution of ankerite (brown), pyrite (blue), hematite (purple) and chalcopyrite (pink) (combined Ca-S-Fe and Fe-S-Cu maps) and barite-bearing celestine (Sr and Ba maps).

Ore-bearing zone Yuzhny Razduv (South Blob), borehole D1716, depth of 702.8 m.

данных минералов AMICS. Получаемая информация об элементном составе образца и карты поэлементного сканирования в первом приближении до-

статочны для установления на полуколичественном уровне соотношения основных минеральных фаз в образцах с помощью обычных методов цифровой

обработки изображений. После проведения исследования образец сохраняется полностью для проведения других видов исследований. Систематическое исследование образцов руд из разных частей рудоносной зоны месторождения этим методом позволяет оперативно провести сравнение минерального состава разных типов руд при относительно низких затратах средств и времени.

Литература

Автоматизированный анализатор оптико-минералогических исследований горных пород, руды и рудных концентратов «Минерал С7» (2018) <https://siams.com/minerals7>.

Аникин С.И. (1992) Геология и минералого-геохимические особенности золото-теллур-редкометалльного оруденения в углеродистых толщах венда Кумторского рудного поля (Срединный Тянь-Шань). *Автореферат дис. к.г.-м.н.* Бишкек, БПИ. 20 с.

Богдецкий В.Н., Матвеев В.Г., Туманов Б.М. (1981) Геологическая позиция золото-вольфрамового оруденения в углеродистых сланцах на примере одного месторождения Тянь-Шаня / Стратиформные месторождения цветных и редких металлов в черносланцевых формациях. Фрунзе, ФПИ, 101–105.

Васильев П.В., Гу И., Фандрич Р. (2010) Применение автоматического анализатора раскрытия минералов MLA для оценки качества минерального сырья. www.eco-oos.ru.

Годовиков А.А. (1975) Минералогия. М., Недра, 520 с.

Гонсалес Р., Вудс Р. (2012) Цифровая обработка изображений. М., Техносфера, 1104 с.

Никоноров В.В. (1993) Новый тип золотого оруденения в Кыргызстане. *Геология рудных месторождений*, 35(5), 450–454.

Руководство для пользователей графического редактора Adobe Photoshop (2022) <https://helpx.adobe.com/ru/photoshop/using/layer-basics.html>.

Шевкунов А.Г., Башкиров А.П. (2013) Условия зарождения минералообразующей системы и динамика ее развития на примере месторождения Кумтор. Материалы всероссийской конференции «Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений». М., ИГЕМ РАН, 173–174.

Шевкунов А.Г., Масленников В.В., Ларж Р.Р., Масленникова С.П., Данюшевский Л.В. (2018) Геохимические особенности разновидностей пирита золото-рудного месторождения Кумтор, Кыргызстан. *Минералогия*, 4(4), 22–40.

Шеметова А.А. (2022) Опыт использования автоматизированной системы анализа минералов (MLA) для

золотых руд. <https://geowebinar.com/seminar-mineralogy-vims-2022>.

Beckhoff B., Kanngießer B., Langhoff N., et al. (2006) Handbook of practical X-ray fluorescence analysis. Berlin, Heidelberg, Springer, 876 p.

Ivanov S.M., Ansdell K.M., Melrose D.L. (2000) Ore texture and stable isotope constraints on ore deposition mechanisms at the Kumtor lode gold deposit. *Gold in 2000. Littleton, Society of Economic Geologists, Poster Session Extended Abstracts Volume*, 47–52.

M4 TORNADO AMICS. Automated mineral analyzer for mining and geosciences (2022) www.bruker.com/m4tornado.

References

[Automated analyzer of optical-mineralogical studies of rocks, ore and ore concentrates «Mineral C7»] (2018). <https://siams.com/minerals7>. (in Russian).

[A guide for users of the Adobe Photoshop software] (2022). <https://helpx.adobe.com/ru/photoshop/using/layer-basics.html>. (in Russian).

Anikin S.I. (1992) [Geology and mineralogical and geochemical features of gold-tellurium-rare-metal mineralization in the carbonaceous strata of the Vendian Kumtor ore field (Central Tien Shan)]. *Avtoreferat dissertatsii kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk [Abstract of Dissertation of the Candidate of Geological-Mineralogical Sciences]*. Bishkek, BPI. (in Russian). 20 c.

Beckhoff B., Kanngießer B., Langhoff N. et al. (2006) Handbook of practical X-ray fluorescence analysis. Berlin, Heidelberg, Springer. 876 p.

Bogdetsky V.N., Matveenko V.G., Tumanov B.M. (1981) [Geological position of gold-tungsten mineralization in carbonaceous shales on example of one Tien Shan deposit]. In: *Stratiformnye mestorozhdeniya tsvetnykh i redkikh metallov v chernoslantsevykh formatsiyah [Stratiform deposits of non-ferrous and rare metals in black shale complexes]*. Frunze, FPI, 101–105. (in Russian).

Godovikov A.A. (1975) [Mineralogy]. Moscow, Nedra. 520 p. (in Russian).

Gonzalez R., Woods R. (2012) [Digital image processing]. Moscow, Technosphere. 1104 p. (in Russian).

Ivanov S.M., Ansdell K.M., Melrose D.L. (2000) Ore texture and stable isotope constraints on ore deposition mechanisms at the Kumtor lode gold deposit. *Gold in 2000. Littleton, Society of Economic Geologists, Poster Session Extended Abstracts Volume*, 47–52.

Nikonorov V.V. (1993) [A new type of gold mineralization in Kyrgyzstan]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, 35(5), 450–454. (in Russian).

Shemetova A.A. (2022) [Experience of using an automated mineral analysis system (MLA) for gold ores]. <https://geowebinar.com/seminar-mineralogy-vims-2022>. (in Russian).

Shevkunov A.G., Bashkirov A.P. (2013) [Conditions of the origin of the mineral-forming system and the dynamics of its evolution on example of the Kumtor deposit]. *Materialy vserossiyskoy konferentsii «Rudoobrazuyushchie processy: ot geneticheskikh kontseptsii k prognozu i otkrytiyu novykh rudnykh provintsiy i mestorozhdeniy» [Materials of the All-Russian Conference «Ore-Forming Processes: from Genetic Concepts to the Forecast and Discovery of New Ore Provinces and Deposits»]*. Moscow, IGEM RAN, pp. 173–174. (in Russian).

Shevkunov A.G., Maslennikov V.V., Large R.R., Maslennikova S.P., Danyushevsky L.V. (2018) [Geochemical features of pyrite types of the Kumtor gold deposit, Kyrgyzstan]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **4**(4), 22–40. (in Russian).

Vasiliev P.V., Gu I., Fandrich R. (2010) [Application of a MLA automatic mineral disclosure analyzer for assessing the quality of mineral raw materials]. www.eco-oos.ru. (in Russian).

M4 TORNADO AMICS. Automated Mineral Analyzer for Mining and Geosciences (2022) www.bruker.com/m4tornado.