

- батолита // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды: Матер. Всерос. научн. конф., г. Иркутск, 24–30 сент. 2007 г. – Т. 2. Геохимия магматических, метаморфических и метасоматических процессов. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. – С. 50–54.
14. Жариков В.А. Некоторые закономерности метасоматических процессов // Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании / под ред. Д.С. Коржинского. – М.: Недра, 1966. – С. 47–63.
 15. Кучеренко И.В. К методике формирования выборок для расчета статистических параметров распределения и баланса химических элементов в окорудном пространстве гидротермальных месторождений золота // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 2. – С. 23–30.
 16. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / под ред. О.А. Богатикова, О.В. Петрова. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. – 200 с.
 17. Миронов Ю.В. Соотношение титана и калия в базальтах как индикатор тектонической обстановки // Доклады АН СССР. – 1990. – Т. 314. – № 6. – С. 1484–1487.
 18. Кучеренко И.В. Пространственно-временные и петрохимические критерии связи образования золотого оруденения с глубинным магматизмом // Известия АН СССР. Сер. геол. – 1990. – № 10. – С. 78–91.
 19. Кучеренко И.В. Эмпирические свидетельства концентрационно-диффузионного механизма массопереноса в процессах околотрещинного гидротермального метасоматизма // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 9–15.

Поступила 18.11.2010 г.

УДК 549.324.31:553.41

ОТРАЖЕНИЕ ЗОНАЛЬНОСТИ СУХАРИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ В ТИПОМОРФНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПИРИТА

Е.М. Михайлова, В.Г. Ворошилов, А.Я. Пшеничкин

Томский политехнический университет
E-mail: planet@sibmail.com

Изучены пириты из руд и окорудных метасоматитов скарново-магнетитового Сухаринского рудного поля (Горная Шория) с наложенной золото-сульфидной минерализацией. Исследованы типоморфные особенности пирита: морфология кристаллов, термоэлектрические свойства, отражательная способность, химический состав. Установлено зональное изменение типоморфных свойств пирита по простиранию рудного поля.

Ключевые слова:

Пирит, типоморфизм, кристалломорфология, термоэлектрические свойства, элементы-примеси, золото, зональность.

Key words:

Pyrite, typomorphism, morphology of crystal, thermo-electromotive property, details-addition, gold, zonality.

В последние годы все большее внимание уделяется проблеме укрепления и расширения минерально-сырьевой базы действующих горнорудных предприятий, а также поискам и оценке глубокозалегающих рудных тел в известных горнорудных регионах и на новых территориях [1–4]. Поиски и оценка скрытых рудных тел, выявление новых типов месторождений и вовлечение их в промышленное освоение, переоценка известных рудопроявлений и месторождений — эти задачи не всегда могут быть решены традиционными геолого-геохимическими и геофизическими методами. Существенная роль здесь отводится минералогическим методам прогнозирования, теоретической основой которых служит учение о типоморфизме минералов и о минералах-индикаторах оруденения [4, 5].

Пирит является самым распространенным и наиболее оптимальным для исследования типоморфных свойств рудным минералом в сульфидо-держущих типах месторождений. Во многих слу-

чаях он представляет самостоятельный промышленный интерес, так как нередко содержит высокие концентрации золота, являясь основным концентратом (наряду с арсенопиритом) металла в рудных телах и окорудных метасоматитах различных месторождений.

Авторами выполнены комплексные исследования пиритов из руд, метасоматитов и вмещающих пород Сухаринского рудного поля (Горная Шория). Целью исследования являлось изучение типоморфных свойств пиритов с целью выявления зональности рудного поля и прогноза золотого оруденения.

В процессе работ решались следующие основные задачи: изучение типоморфных свойств пирита: кристалломорфологии, химического состава, термоЭДС, коэффициента отражения; выявление отличительных особенностей пирита продуктивных минеральных ассоциаций; выявление минералого-геохимической зональности рудного поля на основе типоморфных свойств пирита.

Сухаринское рудное поле расположено в западной части Тельбесского железорудного района Горной Шории. В его пределах разведаны и частично эксплуатировались скарново-магнетитовые месторождения: Северный Аргыш-Таг, Южный Аргыш-Таг, Правобережная Сухаринка, Левобережная Сухаринка, Романовско-Кедровское, Самарское.

В рудном поле выявлено 14 скарново-магнетитовых залежей с прожилково-вкрапленной золото-сульфидной минерализацией. Рудные участки приурочены к сухаринской свите нижнего кембрия. Рудные тела находятся в зоне контактов карбонатных пород нижней кремнисто-вулканогенно-карбонатной толщи. Они имеют линзовидную (реже пластообразную) форму и залегают субсогласно со складчатостью. Оруденение прослежено до глубины 500 м. Выделяются ранние карбонатно-магнетитовые руды вулканогенно-осадочного происхождения и скарново-магнетитовые разности пироксен-магнетитового, гранат-магнетитового, амфибол-магнетитового составов, возникшие в контактовом ореоле диоритов Тельбесского интрузива. Все скарново-магнетитовые залежи несут в разном количестве сопутствующие продуктивные минеральные комплексы золото-сульфидного, или наложенного кварцево-золото-полисульфидного типов. Золотое оруденение парагенетически связано со становлением интрузивных фаз Тельбесского массива. Их последовательное внедрение сопровождалось неоднократной активизацией гидротермальных процессов, перераспределением золота и концентрированием его на геохимических барьерах в пределах долгоживущих зон повышенной проницаемости [6].

В качестве исходного материала использованы пробы-протоочки весом 2...3 кг, отобранные нами из керна скважин и отвалов карьеров рудного поля. Для исследования типоморфных свойств пирита из протоочек выделены его мономинеральные фракции.

Кристалломорфологическое изучение проводилось под бинокулярным микроскопом МБС-10 из фракции 0,5...0,2 мм, так как эта фракция наиболее полно характеризует морфологические особенности минерала [2, 3]. Для количественной оценки распространенности выделяемых морфологических типов кристаллов (МТК) производился подсчет кристаллов методом дорожки. В каждой пробе набиралось до 100 кристаллов, производился подсчет встречаемости граней в комбинациях и определялся габитус кристаллов. Всего было изучено 37 проб пирита с отвалов карьеров и 73 пробы из керна скважин.

Измерения термоЭДС проводились на установке, разработанной в Научно-образовательном центре «Золото-платина» ТПУ, смонтированной на бинокулярном микроскопе МБС-10, приспособленной для измерения термоЭДС минералов с размером зерен 0,1...1,0 мм [7]. Electroды использовались латунные, измерение осуществлялось при постоянной разности температур между холодным

и горячим электродами в 150 °С. Калибровка прибора проводилась по галениту, который имеет только электронный тип проводимости. Время одного замера 15...20 с. В каждой пробе замерялась термоЭДС 20–30 зерен и кристаллов пирита, результаты заносились в журнал, подсчитывались средние значения термоЭДС и доли электронной и дырочной проводимостей. Всего выполнено 1758 замеров.

Взаимоотношения сульфидных минералов изучались с помощью поляризационного микроскопа ПОЛАМ Р-312 в полированных шлифах.

Химический состав пирита изучался атомно-абсорбционным (Au, Cr, Ni, Co) и рентгено-флуоресцентным (Cu, Zn, Ag, As, Pb, Sb, Bi, Se, Sr) методами. Результаты анализов были сгруппированы в выборки, характеризующие пириты исходных пород, пропицитов, скарнов и сульфидных руд.

Изучение пирита в отраженном свете позволяет выделить три генерации кристаллического пирита и модификацию марказита. Их взаимоотношения и формы выделения показаны на рис. 1.

Пирит-I морфологически характеризуется идиоморфными кристаллами размером 0,5...2,0 мм (лишь в северо-восточной части рудного поля его размеры достигают 1 см). Кристаллы представлены квадратными, прямоугольными, ромбическими и шестиугольными сечениями. Отмечается хорошая полировка. Цвет пирита соломенный. Линии ограничения четкие, ровные. Тесно связан с агрегатами пирротина, халькопирита и сфалерита.

Пирит-II отмечается на локальных участках в виде ксеноморфных проявлений губчато-дырчатого типа, реже отмечаются гипидиоморфнозернистые формы. Контуры неровные, местами нечеткие. Размеры колеблются в пределах 0,1...0,5 мм. Пирит-II в основном приурочен к кварц-карбонатным и пирротиновым прожилкам, нередко цементирует кристаллы пирита-I.

Пирит III отмечается в виде периферийных идиоморфных агрегатов по колломорфным образованиям марказита и в виде просечек в нем. Размеры отдельных индивидов не превышают 0,01 мм. Сами кристаллы без видимых признаков изменений и дробления.

Марказит характеризуется лучистыми, почковидными агрегатами, концентрическими гелевыми структурами, диаметром от 0,1 до 4,0 мм. Цвет минерала от светло-желтого пиритового до густо-желтого и густо-коричневого. Наблюдаются просечки халькопирита и новообразованного пирита III.

По мере удаления от Тельбесской интрузии в западном направлении в рудных телах увеличивается количество марказита; его слабо почковидные удлиненные агрегаты сменяются почковидными округлыми, а с глубиной — концентрически зональными, сферическими агрегатами. Размер агрегатов с глубиной изменяется от 0,2 до 3,4 мм. Марказит — относительно низкотемпературный гидротермальный минерал, поэтому вышеописанные

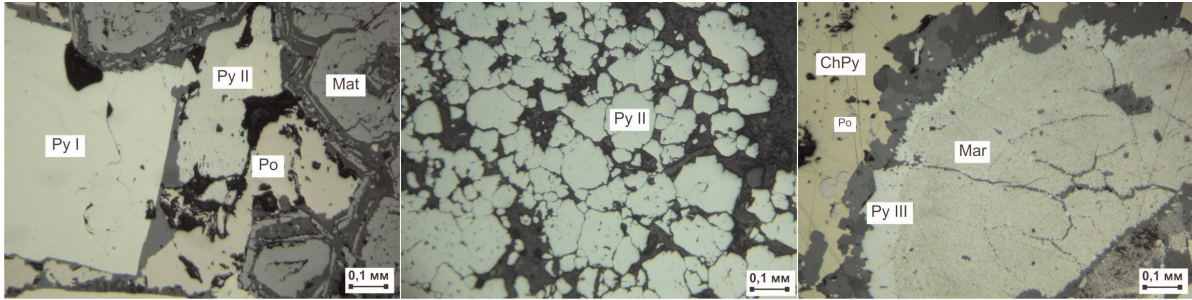


Рис. 1. Фотографии полированных образцов различных генераций пирита и марказита: Py I, II, III – соответствующие генерации пирита, Mgt – магнетит, Po – пирротин, ChPy – халькопирит, Mar – марказит

наблюдения можно интерпретировать как снижение температуры рудообразования с востока на запад, по мере удаления от интрузии.

Зональность типоморфных свойств описана ниже для пирита I, как наиболее представительно и оптимального для этих целей минерала.

При изучении кристалломорфологии пирита установлено, что на кристаллах пирита из рудных тел и окolorудных метасоматитов присутствует три формы: куб $a\{100\}$, пентагондодекаэдр $e\{210\}$ и октаэдр $o\{111\}$. Кристаллы встречаются в виде простых форм и их комбинаций (рис. 2). Они не всегда имеют идеальные формы, часто уплощены или вытянуты в одном направлении, грани их неравномерно развиты, нередко присутствуют не все комбинации.

Грань (100) присутствует во всех комбинациях, является габитусной, ее встречаемость снижается только в пирит-пирроотиновых рудах. Грань (210) в комбинациях кристаллов развита умеренно, чаще всего встречаемость ее в комбинациях от 50 до 100 %, нередко она хорошо развита и становится габитусной, увеличиваясь по направлению к рудному телу в окolorудных метасоматитах и в рудных зонах. Более 60 % кристаллов составляют комбинации $\{100\} + \{210\}$. Встречаемость грани (111) в комбинациях кристаллов пирита составляет 4...9 %, она слабо развита и присутствует в основном у кристаллов пирита пирит-пирроотиновых руд. Часто в комбинации кристаллов присутствуют не все грани. Лишь у кристаллов пиритов участков Романовско-Кедровский и Самарский грань (111) становится габитусной. Грани пентагондодекаэдра и октаэдра у кристаллов пиритов из окolorудных метасоматитов встречаются чаще, чем у пиритов сульфидных руд, однако комбинационные их типы

встречаются только на участке Романовско-Кедровский.

В зависимости от количества простых форм, входящих в комбинации, и развитости граней для Сухаринского рудного поля выделено 15 морфологических типов кристаллов (МТК) пирита, изображенных на рис. 2. Максимальное их количество приурочено к продуктивным минеральным ассоциациям. Увеличение ассортимента кристаллов происходит за счет появления в комбинациях слабо (а местами и преимущественно) развитых граней (210) и (111) в пиритах руд.

Частота встречаемости отдельных типов кристаллов колеблется от долей до 35 %. Как видно из табл. 1 и рис. 3, наибольшую морфологическую устойчивость имеют МТК № 1 и 5 с частотой встречаемости кристаллов до 30...35 %, второстепенную роль играет 2-ой МТК с частотой встречаемости до 4 %. Доля остальных МТК пиритов редко превышает 2 %, зато количество их достигает 12.

В зависимости от преобладающего развития граней в комбинациях выделено 6 габитусов: кубический (МТК № 1, 2, 6, 7), куб-пентагондодекаэдрический (№ 8, 9), пентагондодекаэдрический (№ 10, 11, 13, 14), куб-октаэдрический (№ 3, 7), пентагон-октаэдрический (№ 12, 15), октаэдрический (№ 8).

Пириты окolorудных метасоматитов отличаются от пиритов руд более правильными кристаллами, преобладающим кубическим габитусом и меньшим в 2 раза набором МТК. По направлению к рудному телу в метасоматитах увеличивается количество кристаллов куб-пентагондодекаэдрического и пентагондодекаэдрического габитусов. В рудных интервалах появляются кристаллы пентагон-октаэдрического и октаэдрического габитусов.

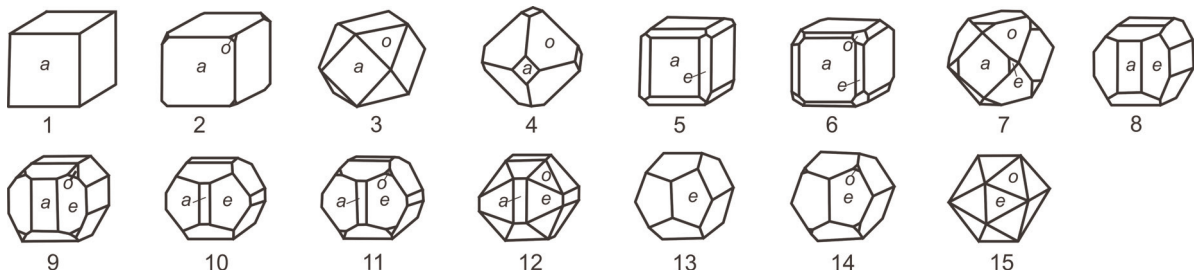


Рис. 2. Морфологические типы кристаллов пиритов Сухаринского рудного поля: a – куб $\{100\}$, e – пентагондодекаэдр $\{210\}$, o – октаэдр $\{111\}$

Таблица 1. Частота встречаемости (в %) морфологических типов кристаллов, граней в комбинациях и габитусов пиритов в рудах и породах Сухаринского рудного поля

Параметры	Вмещающие породы	Околорудные метасоматиты	Сульфидные руды	
МТК	1	34,8	11,1	33,0
	2	3,4	0,3	3,5
	5	22,8	18,1	30,7
	6	0	0,5	0,6
	8	0,5	1,4	0
	10	1,6	2,6	1,7
	13	0,3	0,3	2,3
	МТК 3 – 0,1	МТК 7 – 4,7	МТК 4 – 0,3; МТК 9, 15 по 0,2; МТК 11 – 0,5; МТК 12 – 0,1; МТК 14 – 1,6	
Грани	(100)	99,9	99,7	91,6
	(210)	43,1	64,5	51,9
	(111)	4,1	8,9	8,5
Габитусы	{100}	96,2	92,9	88,9
	{210}	3,3	5,7	6,3
	{100}+{210}	0,5	1,4	0
	{111} – a {210}+{111} – b	–	–	a – 0,3 b – 0,2

С глубиной рудных тел и с востока на запад от участка Аргыш-Таг к участку Самарский на кристаллах пиритов намечается закономерное увели-

чение частоты встречаемости граней октаэдра в комбинациях и смене кубического габитуса на пентагондодекаэдрический и октаэдрический. Роль кристаллов пирита кубического габитуса в этом направлении уменьшается. Наибольшее количество МТК пирита встречается на Романовско-Кедровском участке (11 типов).

В каждом полированном шлифе производилось по 8–10 измерений отражательной способности пирита при длинах волн: 460, 500, 540, 600 и 660 нм. В целом, пирит из руд характеризуется более высокой отражательной способностью, чем пирит из вмещающих пород. Но, как видно из рис. 4, в юго-западном направлении, по мере удаления от интрузии, средняя отражательная способность рудного пирита уменьшается от 52,0 до 49,5 %, что коррелируется с увеличением содержания в нем Au, Co, Pb, Zn, As. Отмечается также прямая корреляционная зависимость между величиной отражательной способности пирита и долей пиритов с электронным типом проводимости в пробе.

Ранее нами было установлено [7], что термо-ЭДС закономерно изменяется от пиритов с дырочной проводимостью из низкотемпературных минеральных ассоциаций и верхней части рудных тел к пиритам с электронно-дырочной проводимостью из среднетемпературных ассоциаций и средних частей рудных тел и к пиритам с электронной проводимостью из высокотемпературных минеральных ассоциаций и прикорневых частей рудных тел.

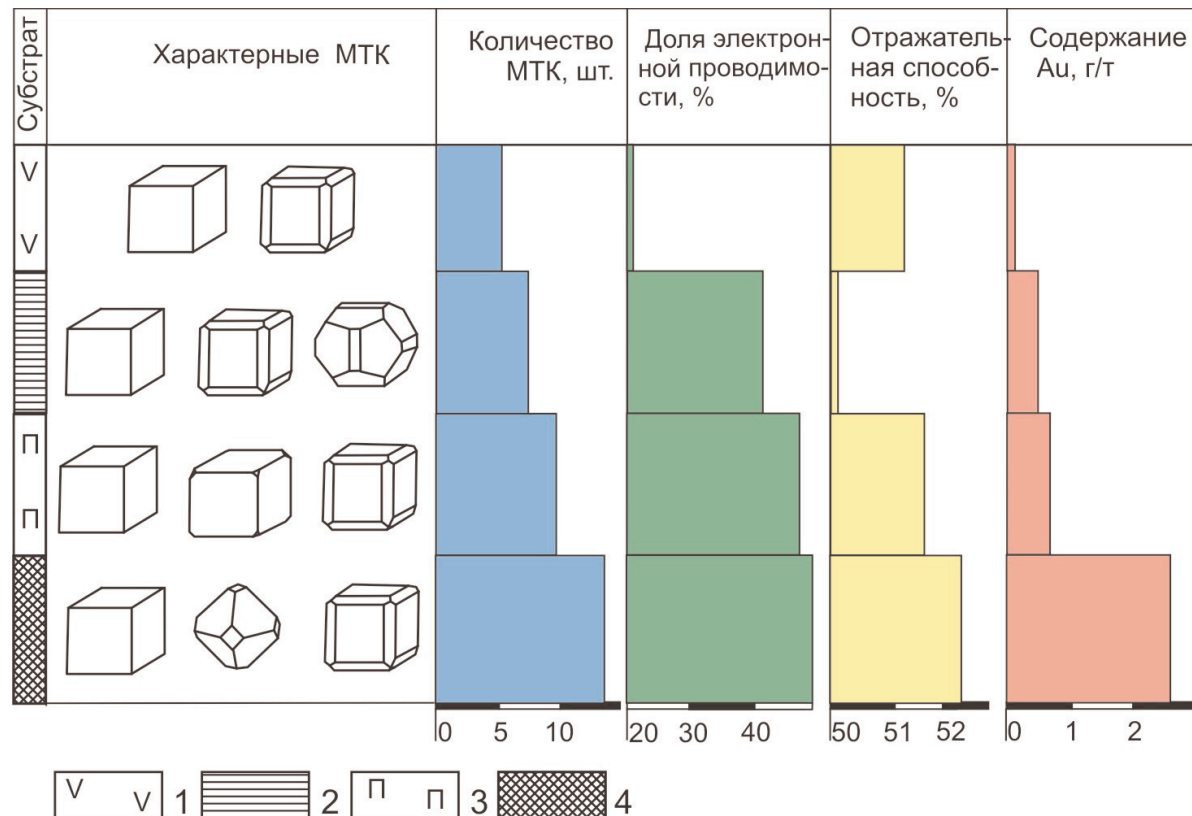


Рис. 3. Типоморфные особенности пирита из вмещающих пород, метасоматитов и руд: 1) карбонатно-вулканогенная толща; 2) скарны; 3) пропилиты; 4) золото-сульфидные руды

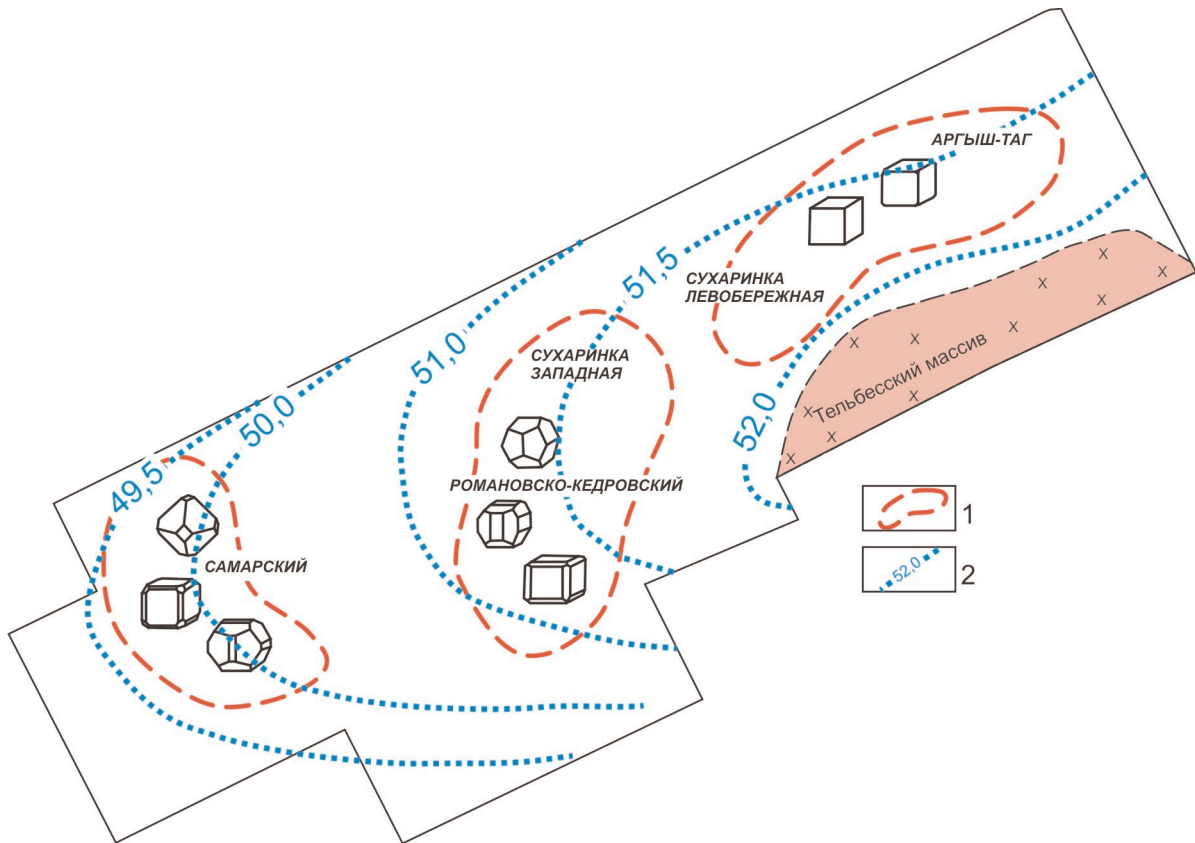


Рис. 4. Зональность типоморфных свойств пирита Сухаринского рудного поля: 1) ареалы преимущественного развития морфологических типов кристаллов; 2) изолинии средней величины отражательной способности кристаллов пирита в %

При обработке измерений термоЭДС было выделено три типа проводимости пиритов: с преобладающей электронной проводимостью (*n*), с близким соотношением электронной и дырочной проводимостей (*n-p*), с преобладающей дырочной проводимостью (*p*). Из табл. 2 видно, что для пиритов из вмещающих пород свойственны 2-й и 3-й типы, для пиритов из метасоматитов – все три типа, а для пиритов из руд – 1-й и 2-й типы проводимости.

Таблица 2. Изменение средних значений термоЭДС и типов проводимости пиритов из разных минеральных ассоциаций

Породы	Средние значения термоЭДС, мВ		Доля проводимости, %		Типы проводимости
	<i>p</i> -тип	<i>n</i> -тип	<i>p</i> -тип	<i>n</i> -тип	
Вмещающие андезиты и известняки	41	19	80	20	<i>n, n-p</i>
Метасоматиты	26	17	51	49	<i>n, n-p, p</i>
Руды	21	16	44	56	<i>n-p, p</i>

Пириты рудных тел и метасоматитов характеризуются значительным разбросом значений разности потенциалов (10...70 мВ), близкими в большинстве случаев средними положительными (33...41 мВ) и отрицательными (–17...–29 мВ) значениями термоЭДС. Наблюдается тенденция уменьшения средних значений термоЭДС пиритов (как *p*-, так и *n*-типов) от пирита, рассеянного

во вмещающих породах, к пиритам из окolorудно-измененных пород и к рудным пиритам. Доля электронной проводимости в пиритах из метасоматитов по направлению к рудным телам увеличивается в 2,5...3 раза, а доля дырочной проводимости – сокращается. Но внутри рудных тел отмечается корреляция содержания золота с долей пиритов с дырочной проводимостью.

С глубиной средние значения термоЭДС и доля *n*-пиритов на участках рудного поля изменяются волнообразно с максимумами на горизонтах, обогащенных продуктивной минерализацией, подобно кристалломорфологическим особенностям пиритов.

Пириты существенно обогащены, в сравнении с вмещающими породами, золотом и элементами-спутниками: Ag, As, Cu, Pb, Bi, Co, Zn. Факторный анализ показывает, что Au в пиритах тесно коррелируется с Co, Zn, Pb, As, Cu, Bi, Ag (рис. 5).

Накопление Cr, Ni и Sr в пиритах не отмечается. Как видно из табл. 3, от вмещающих пород к рудам в пиритах последовательно возрастают концентрации Au, Zn, Co, As, Cu. При этом концентрация Cu, As, Pb в пирите пропилитов значительно ниже, чем в пиритах из вмещающих пород. Вероятно, это обусловлено очищением от примесей раннего рассеянного пирита в процессе функционирования конвективной термофлюидной рудообразующей системы.

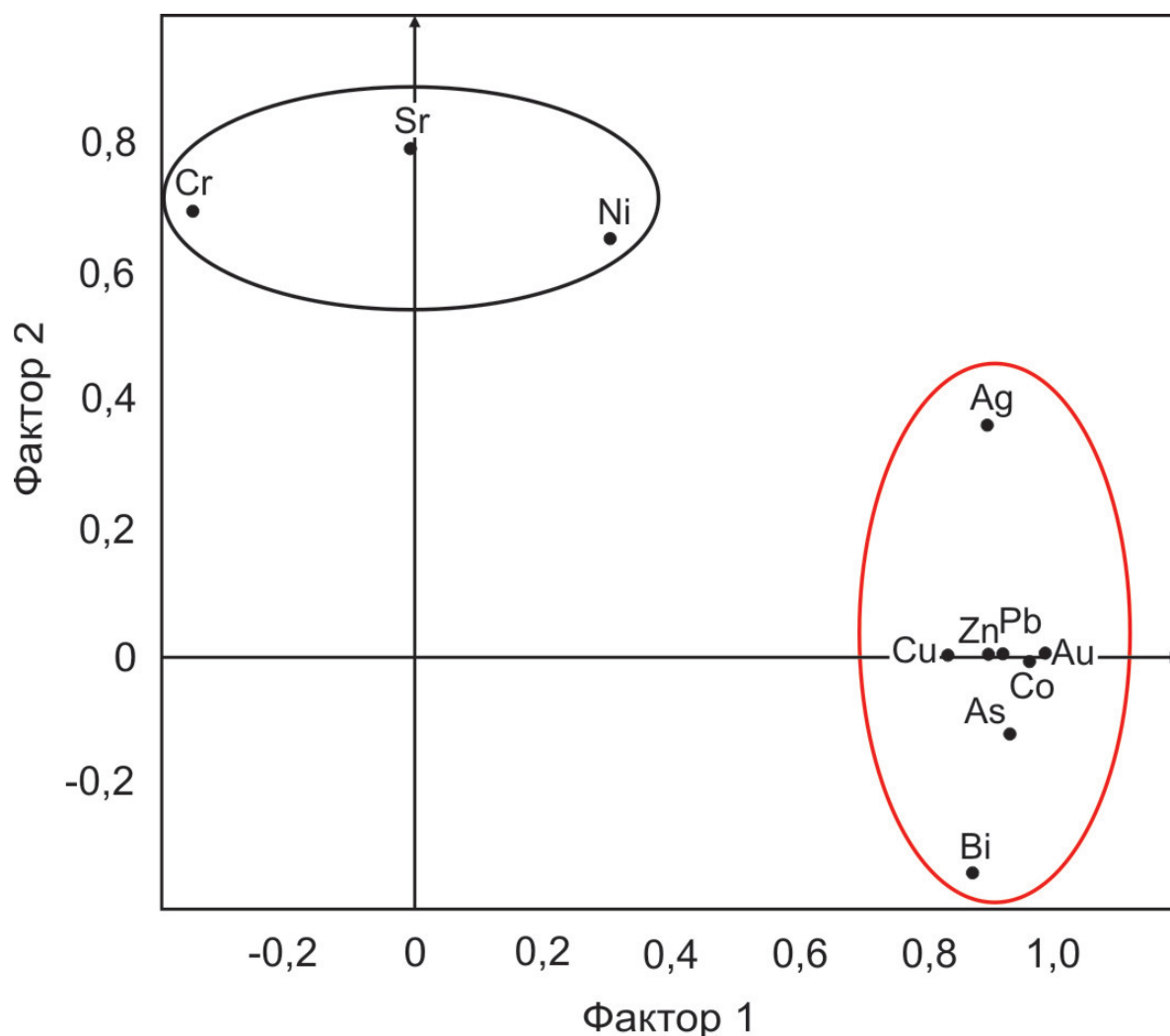


Рис. 5. Ассоциации элементов-примесей в пиритах по результатам факторного анализа

Таблица 3. Средние содержания элементов-примесей в исходных породах и монофракциях пиритов, г/т

Анализируемый субстрат	Au		Ag	As	Cr	Ni	Co	Cu	Pb	Zn	Bi	Sr
	Сред.	K_n										
Вмещающие породы	0,005	1	0,5	3	14	10	12	50	10	98	0,5	53
Пирит:												
из вмещающих пород	0,046	9,2	16	2568	14	66	93	486	196	92	37	4
из скарнов	0,459	91,8	17	3041	12	72	136	467	147	853	40	7
из пропилитов	0,651	130,2	14	1977	12	61	118	63	128	116	54	4
из сульфидных руд	2,542	508,4	22	3820	11	72	238	699	228	2374	41	8

* K_n – коэффициент накопления золота в пирите относительно исходных пород (известняков, андезитов).

Между содержанием Cr и Ni в пирите и морфологическими типами кристаллов прослеживается отчетливая корреляционная связь. Cr и Ni положительно коррелируются с МТК № 5, 6 и отрицательно – с № 9, 11, 13–15. Иначе говоря, чем более развита грань (210), тем в большей степени кристаллы пирита очищаются от Cr и Ni.

Отмечается также устойчивая корреляция между долей пиритов с электронным (n) типом проводимости и концентрацией в пирите Cr и Ni. Соот-

ветственно, очищение пиритов от этих примесей сопровождается возрастанием доли пиритов с дырочным (p) типом проводимости.

Пириты изучаемого рудного поля характеризуются значительным разбросом содержаний золота. Для пиритов, рассеянных во вмещающих известняках и вулканитах, характерны небольшие пределы колебаний в содержаниях металла (коэффициент вариации $V=33...45\%$) со слабо выраженной левой асимметрией ($A=-0,93$). Для пиритов около-

рудных метасоматитов и золото-полисульфидных руд характерна крайняя неоднородность распределения золота ($V > 130\%$). Такой характер распределения золота обусловлен наличием его минеральных включений в пиритах, наряду с молекулярным и атомарно-рассеянным состояниями.

Минимальные количества золота выявлены в пирите, рассеянном во вмещающих породах. Наиболее золотоносны пириты сульфидно-магнетитовых и золото-полисульфидных ассоциаций. В пиритах скарнов и окolorудных метасоматитов содержание золота в 2...10 раз ниже по сравнению с таковыми рудных тел.

Выводы

Сухаринское рудное поле (Горная Шория) имеет набор морфологических типов кристаллов, характерный для пиритов золоторудных месторождений. С глубиной рудных тел и с востока на запад, от участка Аргыш-Таг к участку Самарский, на кристаллах пиритов намечается закономерное увеличение частоты встречаемости граней октаэдра в комбинациях и смене куб-октаэдрического габитуса на пентагондодекаэдрический и октаэдриче-

ский. Роль кристаллов пирита кубического габитуса в этом направлении уменьшается.

Типоморфным признаком является набор специфического комплекса примесных элементов — Co, Pb, Zn, As, Ag, Cu, Bi, концентрация которых в пирите прямо пропорциональна его золотоносности. Концентрация золота в пирите руд обратно пропорциональна величине его отражательной способности и доле кристаллов с электронным типом проводимости.

По результатам исследований типоморфных свойств пирита можно констатировать, что рудные участки поля имеют небольшой эрозионный срез, увеличивающийся в юго-западном направлении, и перспективны на глубину. Это заключение основано на том, что пириты руд и метасоматитов имеют электронно-дырочную проводимость, преобладающий кубический габитус кристаллов (95%), повышенную концентрацию элементов, характерных для верхних-средних частей рудных тел — свинца, меди, мышьяка, цинка, висмута (100...4000 г/т) и золота (до 9 г/т).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (грант № 2.1.1/904).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Б.С. Пирит золоторудных месторождений. — М.: Наука, 1992. — 143 с.
2. Пшеничкин А.Я. Использование кристалломорфологии пирита при минералогическом картировании золоторудных месторождений Алтае-Саянской складчатой области // Минералогическое картирование рудоносных территорий / под ред. В.И. Поповой, В.А. Попова. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. — С. 60–70.
3. Пшеничкин А.Я. Кристалломорфология пирита и ее использование в практике поисково-разведочных работ // Геология и геофизика. — 1982. — № 11. — С. 65–75.
4. Юшкин Н.П. Топоминералогия. — М.: Недра, 1982. — 288 с.
5. Типоморфизм минералов: Справочник / под ред. Л.В. Чернышевой — М.: Недра, 1989. — 560 с.
6. Коробейников А.Ф., Зотов И.А. Закономерности формирования месторождений золото-скарновой формации. — Томск: ТПУ, 2006. — 235 с.
7. Коробейников А.Ф., Нарсеев В.А., Пшеничкин А.Я., Ревякин П.С., Арифлулов Ч.Х. Пириты золоторудных месторождений. — М.: ЦНИГРИ, 1993. — 213 с.

Поступила 02.06.2010 г.