

**МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
МЕТОДИКА ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ГЕОЛОГИИ**

**ПОИСКИ И ЛОКАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ТИПОМОРФНЫХ СВОЙСТВ ПИРИТА**

А.Я. Пшеничкин, зав. лабораторией, Ю.С. Ананьев, доцент

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В настоящее время эффективное проведение поисково-оценочных работ невозможно без разработки и внедрения в практику минералогических и геохимических методов прогнозирования, поисков и оценки месторождений полезных ископаемых.

Проведенные комплексные исследования пирита золоторудных месторождений различных генетических типов показали [1–4], что пирит является одним из самых распространенных и информативных минералов месторождений, свойства которого (кристалломорфология, элементы-примеси, термо-эдс и др.) закономерно изменяются в зависимости от условий формирования месторождений. Информация, закодированная в минерале, дает возможность не только расшифровать условия кристаллизации пирита, установить его типоморфные свойства, но и расшифровать генезис месторождения в целом. На основе этих типоморфных признаков пирита обосновывается минералогический критерий поисков и оценки золоторудной минерализации.

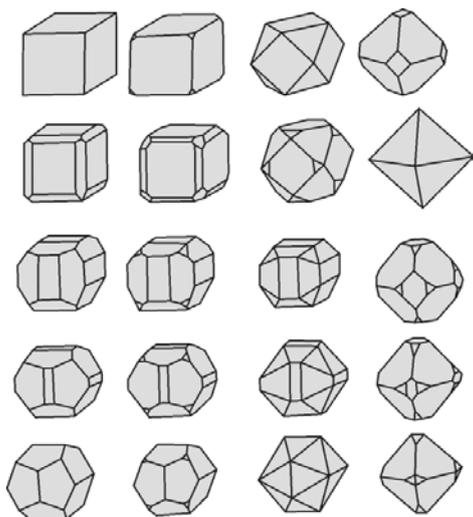


Рис. 1. Основные морфологические типы кристаллов пирита золоторудных месторождений

характеризуются октаэдрическим габитусом кристаллов (Калиостровское, Тарданское). По падению и простиранию рудных тел (в стороны их выклинивания) происходит закономерное изменение морфологии пирита, выражающееся в смене пирита пентагон-додекаэдрического габитуса на кубический (Саралинское рудное поле, рис. 2) или кубического на куб-пентагондодекаэдрический (Балахчинское, Лысогорское, Медвежье, Константиновское). Наибольшая морфологическая изменчивость и наименьшая комбинационная устойчивость кристаллов пирита наблюдается в рудных столбах, где преобладает пентагондодекаэдрический габитус (рис. 3, табл.).

На Саралинском рудном поле детально изучены (как эталон) пириты Каскадного и Андреевского месторождений, отрабатанные на 22 горизонтах (более 0,9 км по падению и около 3 км по простиранию). Для них установлена пространственная зональность изменения морфологии кристаллов, выражающаяся в закономерной смене по падению, простиранию (в направлении выклинивания рудных тел) и в крест простирания (в стороны от рудных тел) кристаллов пирита пентагондодекаэдрического габитуса на кубический (рис. 2) Установлено, что в наиболее богатых рудных столбах обычно преобладают пириты пентагондодекаэдрический габитус (рис. 3) и наибольшее разнообразие морфологических типов кристаллов, а в местах выклинивания как по простиранию, так и падению рудных тел ассортимент кристаллов пирита сокращается до минимума. Основываясь на полученных закономерностях по кристалломорфологии пирита была проведена оценка уровня

Форма кристаллов пирита (рис. 1) является одним из контрастно выраженных типоморфных признаков пирита золоторудных месторождений различных формационных типов, которая изменяется в зависимости от условий формирования месторождения. Для каждого месторождения характерны свои индивидуальные морфологические особенности кристаллов пирита.

Так пириты месторождений золото-кварцевой формации имеют преимущественно кубический габитус кристаллов. При этом в высокотемпературных кварцево-золоторудных минеральных ассоциациях редко встречаются кристаллы в виде простых форм – $\{100\}$, $\{210\}$ и $\{111\}$, а встречаются в виде их комбинаций (Масловское, Подлунный, Константиновское). В среднетемпературных золото-сульфидных ассоциациях кристаллы пирита чаще образуют гексаэдры (Балахчинское, Кузнецовское, Знаменитинское, Медвежье), а в средне-, низкотемпературных кварцево-золото-полиметаллически сульфидных ассоциациях – в виде гексаэдров или пентагондодекаэдров (Лысогорское, Саралинское). Пириты золото-скарновых месторождений

эрозионного среза и перспективности более 100 жил рудного поля. Показано, что уровень эрозионного среза рудного поля (и жил соответственно) увеличивается в западном и юго-западном направлениях (рис. 4).

2. Химический состав является другим наиболее характерным типоморфным признаком пиритов золоторудных месторождений (табл.). По сравнению с пиритами других генетических типов, пириты золоторудных месторождений характеризуются наибольшим разбросом статических параметров распределения (\bar{X} , S^2 , V) элементов-примесей. Это особенно характерно для комплекса элементов, специфичного для золоторудных месторождений – Au, Ag, Cu, Pb, Zn, постоянно накапливающихся в пиритах золоторудных месторождений в повышенных концентрациях.

Для золото-кварцевой формации характерно 1,5...2-кратное обогащение пирита Au, Ag, As, Pb, Bi, Sn, Cd, Ba по сравнению с пиритами золото-скарновых месторождений. В последних несколько больше накапливается Mo, Zn, Cr, нередко Ti, Co. При этом пириты высокотемпературных золото-кварцевых ассоциаций обогащаются Mo, Ti, Cr, Co, Ni, V, As, Bi (Коммунарское, Тарданское месторождения); пириты среднетемпературных кварцево-золото-сульфидных ассоциаций – Au, Cu, Pb, Zn (Балахчинское, Медвежье месторождения), а пириты средне-низкотемпературных кварцево-золото-полиметаллическисульфидных ассоциаций обогащаются Hg, Ba, Ag, Sb, As (Лысогорское, Саралинское).

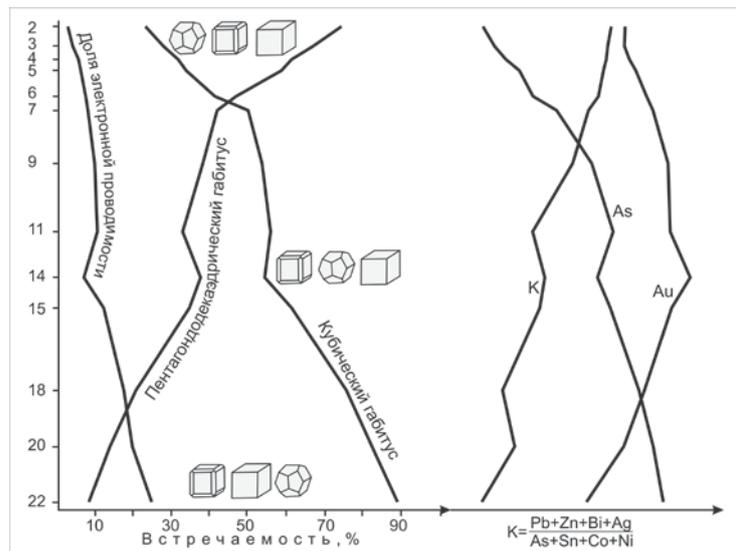


Рис. 2. Изменение содержаний элементов примесей, кристалломорфологии и термо-эда в пиритах с глубиной жили Каскадной Саралинского рудного поля

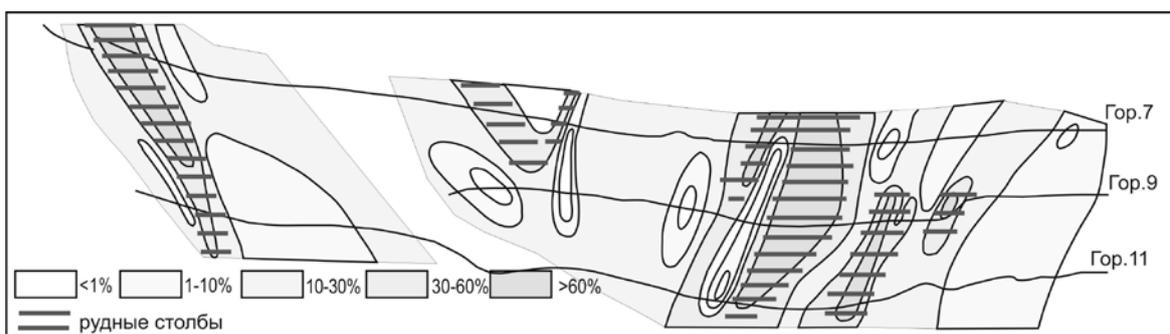


Рис. 3. Распределение кристаллов пирита пентагондодекаэдрического габитуса (в %) в плоскости жили Каскадной Саралинского рудного поля

Пириты золоторудных месторождений резко обогащены золотом по сравнению с пиритами месторождений других генетических типов [2, 6]. Но особенно высокие концентрации золота наблюдаются в пиритах из прожилково-вкрапленных и вкрапленных руд из черносланцевых толщ, где они достигают 50 г/т и выше (рис. 5). Уровни накопления золота в пиритах месторождений черносланцевых формаций увеличиваются от диагенетического пирита к метаморфогенному и рудогенному. Последний в сотни-тысячи и более раз обогащен золотом по сравнению с диагенетическим пиритом.

Установлено зональное (часто волнообразное с амплитудой 200...240 м) распределение примесных элементов в пиритах с глубиной рудных тел, заключающееся в преимущественной концентрации Ba, Hg, Ag, Sb, иногда As в пиритах верхних частей рудных тел и из надрудных ореолов; пириты средних частей рудных тел

резко обогащаются Au, Cu, Pb, Zn, а пириты прикорневых частей рудных тел накапливают Ni, Co, Ti, Cr, иногда As, Cu и резко обедняются остальными элементами. Это позволяет использовать химический состав пирита для относительной оценки уровня эрозионного среза рудных тел, их перспективности на глубину и фланги (рис. 2, 5).

3. Физические свойства – плотность, микротвердость, отражение, параметр элементарной ячейки, термолуминесценция, декрепитация, термо-эдс пиритов золоторудных месторождений Алтае-Саянской складчатой области дают определенную генетическую информацию об условиях его образования и могут быть использованы в качестве типоморфных признаков при расшифровке генезиса месторождений. Однако определение большинства физических свойств трудоемки и слабо информативны в силу большого разброса единичных замеров. Наиболее информативным и экспрессным из физических свойств является термо-эдс пирита (рис. 6, табл.).

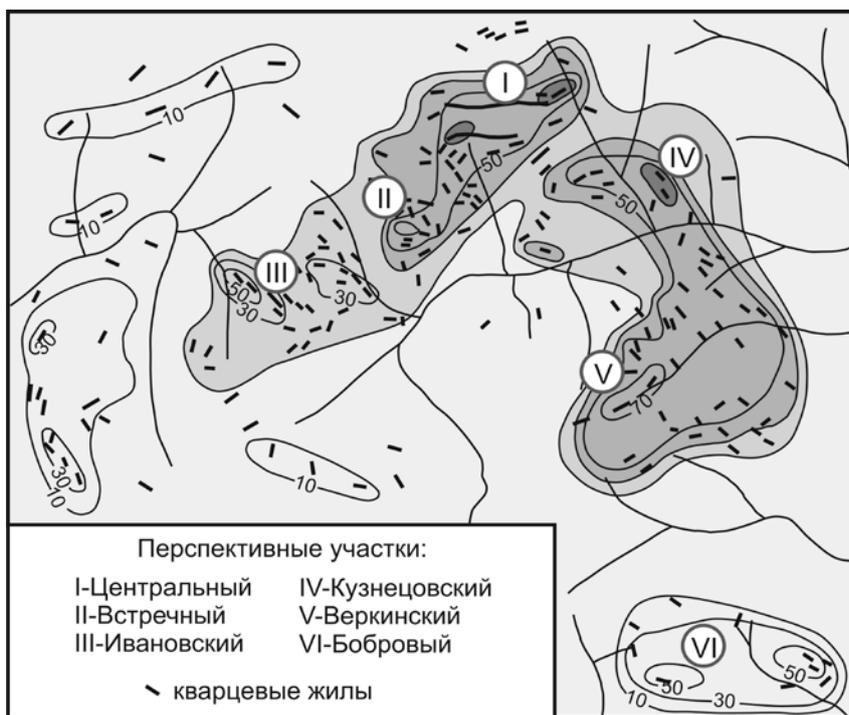


Рис. 4. Распределение кристаллов пирита пентагондодокаэдрического габитуса на площади Саралинского рудного поля

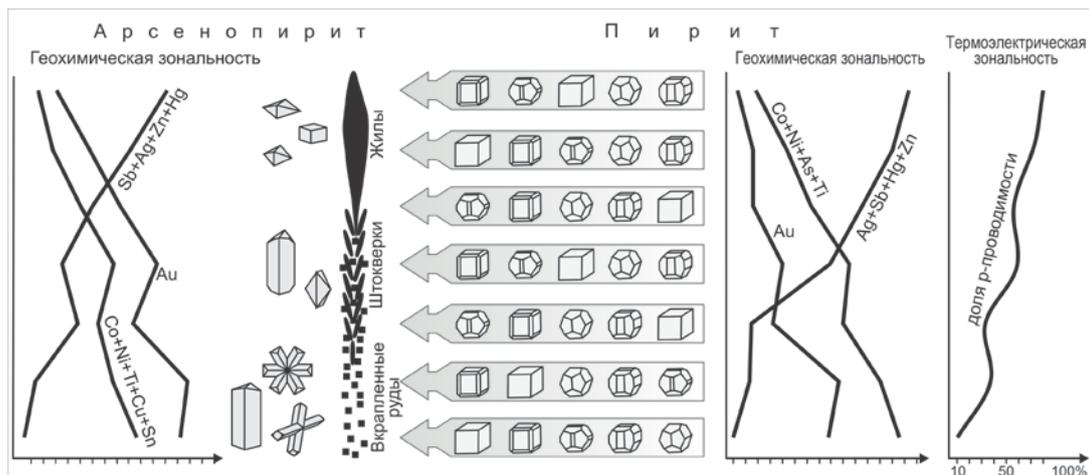


Рис. 5. Обобщенная модель зональности пирита и арсенопирита золоторудных месторождений Западной Калбы

Пириты рудных тел и околорудных метасоматитов золоторудных месторождений Алтае-Саянской складчатой области характеризуются своими параметрами термо-эдс, обусловленными особенностями их формирования и имеют, в основном, смешанную проводимость с преобладанием электронной (Спасское, Калиостровское, Константиновское, Тарданское) или дырочной (Саралинское, Балахчинское, Лысогорское,

Медвежье), или р- и п-типы пиритов встречаются в равных количествах (Знаменитинское, Кузнецовское, Январское, Масловское, Подлунный). И очень редко наблюдаются пириты только с электронной проводимостью (Тарчинское) (рис. 6) [7].

Для большинства месторождений установлена закономерная смена типа проводимости пирита с электронной на электронно-дырочную и дырочную от ранних высокотемпературных минеральных ассоциаций к заключительным этапам формирования месторождений (зональность во времени) (рис. 6). Термо-эдс пирита изменяется и в пространстве: от верхних частей рудных тел и месторождений к прикорневым их частям происходит смена типа проводимости пирита с дырочной на электронно-дырочную и электронную. При этом, пириты продуктивных минеральных ассоциаций и наиболее обогащенных золотом участков рудных тел обладают, как правило, смешанным типом проводимости (табл.).

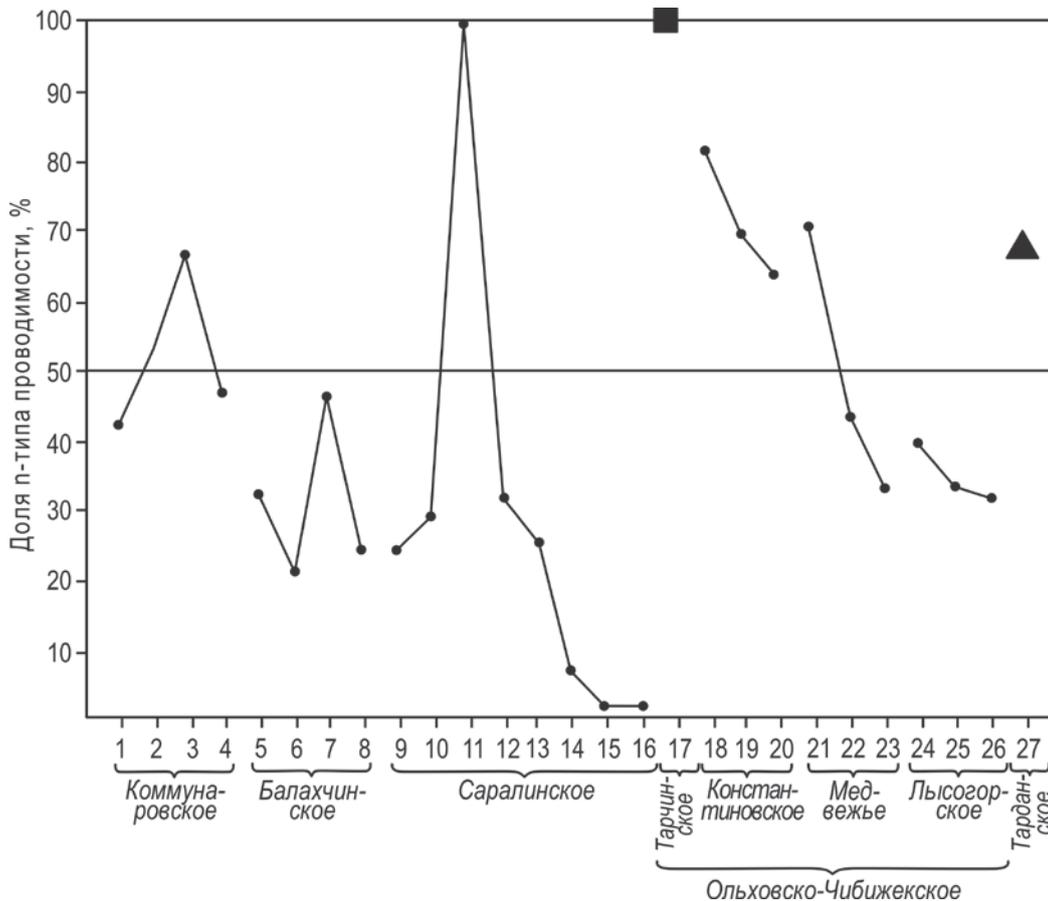


Рис. 6. Характер изменения доли электронной проводимости пирита золоторудных месторождений Алтае-Саянской складчатой области во времени. Минеральные ассоциации (от ранних к поздним): 1, 5, 18, 21, 24 – пириты из околорудных метасоматитов; 2 – кварцево-золото-актинолитовая; 3 – кварцево-золото-швелитовая; 4 – кварцево-золото-теллурувисмутитовая; 6, 7, 8 – пирит 1-й, 2-й, 3-й генераций – кварцево-золото-полиметаллически сульфидная; 9 – диагенетический пирит из сланцев; 10 – пирит из альбитизированных и 11 пирит из калипшатизированных даек габбро-диабаз; 12 – пирит из графитизированных сланцев; 13 – пирит из биотит-тремолитовых метасоматитов; 14 – пирит из кварца; 15 – пирит из кварц-серицит-карбонатных метасоматитов; 16 – пирит из кальцитовых пострудных прожилков; 17 – кварцево-золото-сульфидная; 19 и 22 – карбонатно-пирит-пирротиновая; 20 и 23 – кварцево-золото-сульфидная; 25 – кварцево-золото-пирит-висмутитовая; 26 – пирит из карбонатных пострудных прожилков; 27 – кварцево-золото-медносульфидная

Основными причинами изменчивости проводимости пирита является отклонение от стехиометрии его основных компонентов (Fe или S), или изоморфное вхождение в структуру минерала Ni, Co, As, Zn и других элементов. При этом температура является, по-видимому, только фактором, регулирующим изоморфное вхождение в структуру минерала тех или иных элементов. На термо-эдс пирита влияет также разность температур между холодным и горячим электродами, кристаллографическое направление, в котором ведется измерение, естественное и искусственное облучение пирита [7]. Параметры термо-эдс (особенно доля пирита в процентах с электронной проводимостью) могут служить показателем относительной глубины формирования рудных тел и определения уровня их эрозионного среза (табл.).

Таблица

*Критерии оценки уровня эрозионного среза рудных тел золоторудных месторождений
и их перспективности на глубину по типоморфным признакам пирита*

Местоположение пирита	Морфология кристаллов	Элементы-примеси	Термо-эдс
Надрудный пирит	Кристаллы простой морфологии (2-3 морфологических типа) чаще кубического габитуса. Грани {210}, {111}, {321} слабо развиты	Присутствуют Hg, Ba, Sb и другие легко подвижные элементы. В повышенных концентрациях (по сравнению с метакристаллами без рудных зон) присутствуют Ag, Pb, Cu, As. Содержание золота Au $n \cdot 10^{-5}$ – $n \cdot 10^{-4}$ %	Дырочный тип проводимости (90 % и более)
Пирит из верхних частей рудных тел	Кристаллы 2-5 (реже более) морфологических типов кубического или пентагондодекаэдрического габитусов. Часто присутствует в комбинациях грань {321}	Повышенная концентрация Hg, Ba, ap, Sb, нередко As. Отсутствие или следовые содержания Co, Ni, Ti, Cr. Содержание Au колеблется от $n \cdot 10^{-4}$ до $n \cdot 10^{-3}$, но оно всегда на порядок и более превышает его в ореольном пирите	Преобладает дырочный тип проводимости (75...90 %)
Пирит из средних частей рудных тел	Максимальное количество морфологических типов кристаллов (до 30 и более). Резкая комбинационная неустойчивость. Грани неравномерно развиты. Количество габитусов кристаллов максимальное при преобладающем развитии кубического или пентагондодекаэдрического	Большие концентрации Pb, Zn, Cu, As и других элементов и их большие параметры распределения (\bar{X} , S^2 , V). Содержание Au $n \cdot 10^{-3}$ и больше	Электронно-дырочный тип проводимости
Пириты из прикорневых частей рудных тел	Количество морфологических типов кристаллов 2-5 кубического или куб-пентагондодекаэдрического габитусов. Отсутствие в комбинациях граней {321} и других со сложными индексами	Минимальное содержание Au ($n \cdot 10^{-5}$... $n \cdot 10^{-4}$ %), отсутствуют элементы – Hg, Ba, Sb. Повышенная концентрация Co, Ni, Cr, Ti, V, нередко As	Преобладает электронный тип проводимости (80...90 %)

Примечание. Пириты из околорудных пород (по уровням эрозионного среза рудных тел) близки по своим типоморфным особенностям к пиритам руд. Отличаются они более простой морфологией кристаллов и меньшими концентрациями примесных элементов, содержание которых увеличивается по направлению к рудному телу.

Закономерное изменение типоморфных свойств пирита согласуется с минералогической и геохимической зональностью рудных тел и месторождений и позволяет проводить оценку уровня их эрозионного среза, перспективности и протяженности оруденения на глубину и выявлять слепые рудные тела. Поэтому пирит можно успешно использовать как минералогический критерий при поисково-оценочных работах на золото (табл.).

Минералогическое картирование по пириту (пиритометрическая съемка) на золото необходимо, проводить (в комплексе с другими методами исследования) на всех этапах поисково-разведочных и эксплуатационных работ.

Решаемые задачи по типоморфным свойствам пирита: оценка уровня эрозионного среза рудных тел; выявление горизонтальной и вертикальной зональности рудных тел, месторождений; локальный прогноз оруденения на глубину и фланги; поиски скрытого оруденения.

На стадии геолого-съемочных работ в хорошо расчлененных районах (масштаб 1:200000, 1:50000) по результатам шлиховой съемки дается общая характеристика морфологии кристаллов пирита района. При этом участки с повышенным содержанием пирита в шлихах и особенно присутствие в них кристаллов сложных морфологических типов, можно считать (с учетом расстояния и направления сноса) перспективными на обнаружение коренных источников золота.

На стадии поисково-оценочных работ (масштаб 1:25000, 1:10000) необходимо проводить отбор проб с пиритом из всех кварцевых свалов и выявленных горными работами и скважинами рудных тел и зон гидротермальной проработки (минерализованных зон). Задачей пиритометрических исследований при поисковых исследованиях является установление положительных на золото ореолов пирита, выявление по ним новых рудных тел и месторождений и предварительная оценка их уровня эрозионного среза и перспективности на глубину и фланги.

Геологоразведочные и эксплуатационные работы (масштаб 1:10000, 1:5000, 1:1000) должны сопровождаться систематическим отбором пирита из всех выявленных рудных тел и околорудных метасоматитов по простираю, в крест простираения и падению рудных тел. По результатам пиритометрического опробования выявляется минералогическая и геохимическая зональность как отдельных рудных тел, так месторождений и рудных полей в целом; производится оценка уровня их эрозионного среза, оценивается перспективность и протяженность оруденения на глубину и фланги, выявляются слепые рудные тела.

Пиритометрическую съемку необходимо начинать с постановки опытно-методических работ. При их выполнении могут решаться следующие вопросы.

1. Выявление кристалломорфологических особенностей пирита руд и околорудных метасоматитов.
2. Определение в пиритах содержаний золота и элементов, спутников золотого оруденения – Ag, Cu, As, Zn и установление отличий по элементам-примесям пиритов, связанных с золотым оруденением от безрудных.
3. Изучение термо-эдс пирита (особенно доли пирита с электронной или дырочной проводимостью) руд и околорудных метасоматитов.
4. Выявление зональности рудных тел и месторождений по кристалломорфологии, химическому составу и термо-эдс пирита.
5. По установленным свойствам пирита руд и околорудным метасоматитам определяется (в комплексе с другими геологическими и геохимическими данными) уровень эрозионного среза рудных тел (и месторождений), их перспективность на глубину и фланги (табл.).

Лабораторная обработка проб с пиритом должна осуществляться в следующем порядке. В начале образцы с пиритом просматриваются под бинокулярным микроскопом и описываются с целью установления принадлежности пирита к определенным генерациям и минеральным ассоциациям. Затем измеряется термо-эдс пирита и сопутствующих сульфидов-полупроводников. После дробления и выделения монофракций пирита, приступают к изучению под бинокулярным микроскопом его кристалломорфологии. Детально изучается фракция 0,25...0,5 мм [1]. Для ускорения процесса определения морфологических типов кристаллов пирита используются таблицы идеализированных кристаллов пирита (рис. 1). Одновременно с изучением морфологии кристаллов производится отбор мономинерального пирита на спектральный, химический, нейтронно-активный, инверсионно-вольтамперометрический и другие виды анализов. Результаты исследований представляются в виде таблиц, графиков, схем, карт.

Литература

1. Коробейников А.Ф., Нарсеев В.А., Пшеничкин А.Я., Ревякин П.С., Арифуров Ч.Х. Пириты золоторудных месторождений (свойства, зональность, практическое применение). – М.: ЦНИГРИ, 1993. – 213 с.
2. Коробейников А.Ф., Пшеничкин А.Я. Геохимические особенности пирита золоторудных месторождений // Геохимия. – 1985. – № 1. – С. 93–104.
3. Пшеничкин А.Я. Использование кристалломорфологии пирита при минералогическом картировании золоторудных месторождений Алтае-Саянской складчатой области // Минералогическое картирование рудоносных территорий. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. – С. 60–71.
4. Пшеничкин А.Я. Кристалломорфология пирита и её использование в практике поисково-разведочных работ на золото // Геология и геофизика. – 1989. – № 11. – С. 65–75.
5. Пшеничкин А.Я., Коробейников А.Ф., Масалович А.М. Кристалломорфология искусственного пирита и распределение в нём золота // Записки Всесоюз. мин. общ. – 1977. – Вып. 4. – Ч. 106. – С. 469–474.
6. Пшеничкин А.Я., Рихванов Л.П. Морфологические и геохимические особенности пиритов магматогенно-гидротермального и метаморфогенного генезиса // Проблемы метаморфизма и рудообразования Забайкалья. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 124–129.
7. Пшеничкин А.Я. Термоэлектрические свойства пиритов некоторых золоторудных месторождений различных типов // Известия ТПИ. – 1977. – Т. 247. – С. 74 – 78.