

УДК 553.435 549.324
DOI: 10.7868/S25000640180307

ОНТОГЕНЕЗ ВЫСОКОМЕТАМОРФИЗОВАННОГО КОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО КРИСТАЛЛОМОРФОЛОГИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПИРИТА

© 2018 г. А.Б. Кафтанатий¹, Е.Б. Кафтанатий¹

Аннотация. Рассмотрены геолого-генетические особенности золотоносного медно-колчеданного месторождения Зимнее на Южном Урале. Выделены ведущие признаки информативности конституционных свойств дисульфидов железа на примере сильно метаморфизованного рудного объекта. Повышенная дислоцированность и неравномерный метаморфизм вмещающих пород в значительной степени изменяют состав, структуру руд и вмещающих пород, что приводит к конвергенции первичных генетических признаков. Кристалломорфологические и кристаллоанатомические исследования пирита позволяют уменьшить значительную долю неопределенности в интерпретации генетических позиций оруденения и выявить скрытую внутрирудную зональность. Основными факторами эпигенеза на месторождении являются региональный метаморфизм и локальные дислокационные динамометаморфические воздействия. При онтогенетических исследованиях кристалломорфологических и анатомических особенностей пирита в рудных сечениях Зимнего месторождения выявлена сложная зональность, отличная от зональности слабометаморфизованных объектов. Более обоснованно генетически интерпретировать картину зональности залежи позволило сопоставление кристалломорфологии пирита с текстурно-структурными особенностями оруденения, геохимическими данными и термобарическими характеристиками пиритов. В выборке проб пирита из сплошных колчеданных руд выявлено увеличение ряда кристалломорфологических показателей, аналогичное асимметричной тенденции аутометасоматических преобразований руд, установленной ранее на слабометаморфизованных колчеданных объектах. В выборке из явно гидротермально проработанных рудных образований выявлена зональность центрально-симметричного типа. В кристаллоанатомии пирит фиксирует максимальное количество изменений габитуса как отражение изменчивости наложенных гидротермальных процессов. Динамика смен габитусных форм совпадает с эволюционным морфогенетическим рядом, характерным для менее метаморфизованных колчеданных объектов. Онтогенетический анализ и моделирование трендов кристалломорфологических характеристик позволило уточнить геолого-структурную позицию и генетические особенности метаморфизованного колчеданного месторождения.

Ключевые слова: колчеданное месторождение, генезис, рудолокализирующие факторы, типоморфизм, онтогенез, кристалломорфология, пирит.

ONTOGENESIS OF A HIGHLY METAMORPHOSED SULPHIDE DEPOSIT BY CRYSTALLOMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PYRITES

A.B. Kaftanatiy¹, E.B. Kaftanatiy¹

Abstract. Geological and genetic features of the gold-bearing copper-bearing Zimnee deposit in the southern Urals are considered. The basic signs of informativeness of the constitutional properties of the iron disulfides, on the example of strongly metamorphosed ore object are assigned. Increased dislocation and uneven metamorphism of host rocks significantly change the composition, structure of ores and host rocks, which

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation), Российская Федерация, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, e-mail: kaftanatiy_ab@mail.ru

leads to the convergence of primary genetic traits. The use of crystallographical and crystallo-anatomic studies of pyrite allows to reduce a significant proportion of uncertainty in the interpretation of the genetic positions of mineralization and to reveal the hidden intra-mineral zoning. Regional metamorphism and local dislocation dynamometamorphic effects are important as the main factors of epigenesis at the deposit. A complex zoning, different from the zoning of weakly metamorphosed objects revealed in ontogenetic studies of crystallographical and anatomical features of pyrite in the ore sections of the Zimnee Deposit. To interpret genetically the picture of the deposit zonation on a more reasonable basis, the crystallography of pyrite was compared with texture-structural features of mineralization, geochemical data and thermobaric characteristics of pyrites. In a sample of pyrite specimens from continuous pyrite ores, an increase in a number of crystal morphological indices was found analogous to the asymmetric trend of autometasomatic transformations of ores, established earlier on weakly metamorphosed pyrite objects. In the sample of clearly hydrothermally converted ore formations, a zonation of the centrally symmetric type was revealed. In the crystal-anatomy, maximal number of the habit changes is impressed by pyrite as a reflection of changeability of superimposed hydrothermal processes. The dynamics of shifting habitus forms coincides with the next evolutionary morphogenetic row, characteristic for the less metamorphosed massive sulfide objects. Ontogenetic analysis and modeling of crystallographical characteristics trends allowed to clarify the geological and structural position, and genetic characteristics of the metamorphic massive sulfide deposit.

Keywords: massive sulfide deposit, genesis, ore localizing factors, typomorphism, ontogeny, crystallography, pyrite.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам генезиса и прогнозирования колчеданного оруденения на полигенных объектах с помощью минералов-индикаторов уделяется значительное внимание [1]. Однако многие исследования связи морфологии пирита и онтогенеза колчеданных и золото-сульфидных руд дают противоречивую интерпретацию, особенно при значительных эпигенетических трансформациях [2].

На юге России, на Северном Кавказе и Южном Урале, известен и интенсивно эксплуатируется ряд колчеданных и золото-сульфидных месторождений. В Ростовской области имеется ряд перспективных объектов, в том числе Керчикское месторождение, требующее более детального изучения в силу сложного и крайне неоднородного строения. На Северном Кавказе активно разрабатываемое Урупское золото-медноколчеданное месторождение потребовало восполнения сырьевой базы за счет привлечения дополнительных источников. В последнее время в разработку были вовлечены гидротермально-метасоматические руды соседнего Скалистого месторождения. В ближайшей перспективе новым импульсом в расширении минерально-сырьевых источников для действующего горнодобывающего комплекса послужит вовлечение в эксплуатацию таких колчеданных месторождений, как Первомайское, Худесское, Быковское, золото-сульфидное Чучкурское (Карачаево-Черкесия) и в более далекой перспективе Кызыл-Дере (Дагестан) и др.

Использование их руд осложняется значительными вариациями вещественного состава, текстурно-структурными особенностями, различной степенью метаморфизованности руд и вмещающих пород. Минеральные типы как отражение единой рудно-геохимической зональности как золоторудных [3], так и колчеданных месторождений определяют локализацию и формы нахождения полезных компонентов. Они служат во многом определяющими факторами как в горнотехнических процессах разработки, так и в технологических схемах их переработки. В качестве эталонных сравнительных объектов для северокавказских месторождений могут служить их южноуральские генетические аналоги со значительным диапазоном вещественно-минералогических характеристик. В качестве примера еще более метаморфизованных полигенных и полихронных представителей колчеданного рудогенеза в кристаллических сланцах могут быть представлены так называемые архейские сульфидиты Эльмузской площади Карелии – Педролампи, Талпус [4]. Золото-сульфидные руды последних обнаруживают реликты полигенеза в форме автобластического метаморфогенного пирита и последующих наложенных многостадийных гидротермально-метасоматических рудных образований.

Комплексное изучение различных минералогических, минералофизических, минералогеохимических и других параметров индикаторного минерала пирита в различных регионах выявляет общие закономерности единой рудно-геохимической зо-

нальности золоторудных [2] и колчеданных месторождений. Их использование позволяет установить как генетическую природу и особенности конкретных месторождений и рудопоявлений, так и общие закономерности формирования и локализации оруденения.

ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПОЗИЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Для определения генетической информативности конституционных свойств дисульфидов железа при значительных влияниях эпигенетических факторов проводились исследования на метаморфизованных в различной степени колчеданных объектах Южного Урала – Комсомольском и Зимнем месторождениях. Комсомольское месторождение изучено нами ранее [5] при разработке методики кристалломорфологического картирования как типичный представитель слабометаморфизованных рудных образований пренит-пумпелитовой стадии. Зимнее месторождение рассматривается в данной работе как типичное полигенное гидротермально-осадочное месторождение с отчетливо проявленными наложенными гидротермально-метаморфогенными процессами.

Зимнее месторождение, расположенное в пределах Аул-Кумакской площади Домбаровского рудного района, отнесено к типичным полигенным гидро-

термальным осадочным колчеданным объектам [1]. Вмещающие породы представлены зеленокаменно метаморфизованными вулканитами основного состава и туфогенно-осадочными образованиями. Литологические особенности вмещающих пород свидетельствуют о приуроченности рудной залежи к конседиментационной депрессионной структуре. Повышенная дислоцированность проявляется в неравномерном метаморфизме пород, достигающем высоких степеней зеленосланцевой фации, и сопровождается рассланцеванием, развитием «конформных» кварцевых жил молочно-белого цвета, катаклазом и будинированием кварцевых и кремнистых агрегатов. Эпигенетические трансформации в значительной степени изменяют состав, структуру вмещающих пород и самого колчеданного оруденения. В качестве основных факторов эпигенеза на месторождении можно выделить региональный метаморфизм и локальные дислокационные динамометаморфические воздействия. Метаморфогенное перерождение сплошных и прожилково-вкрапленных руд месторождения привели к существенным изменениям их текстурно-структурных особенностей, морфологических, минералофизических и геохимических характеристик пирита, несущего основную генетическую информацию. В ходе регионального метаморфизма происходила собирательная перекристаллизация тонкодисперсных сингенетических дисульфидов железа, в результате которой были полностью перекристаллизованы седиментационно-диагенетические формы [6]. Сохранились они в реликтовой форме в ядрах полигенных зерен пирита и в наименее измененных участках сплошных руд (рис. 1). В них электролитическим травлением выделяются признаки радиально-лучистых, микроконкрециевидных, пластинчатых форм, типоморфных для гидротермально-осадочных руд. С учетом их подчиненного развития в основной массе руды целесообразно назвать их метаморфизованными гидротермально-осадочными. Перекристаллизации подвергались мелкие зерна и агрегаты автобластического пирита [6]. На месте мелкозернистых разностей образовался азональный метаморфогенный пирит со специфическими тройчатыми контактами. Метаморфогенный пирит покрывает более крупные зональные кристаллы в виде азональной оболочки. Динамические трансформации руд вызвали образование полосчатых, линзовидно-полосчатых, сланцеватых и плейчатых текстур. В рудах наложенное окварцевание подчеркивает метаморфогенные текстурные элементы. В агрегатах и полигенных зернах кварц,

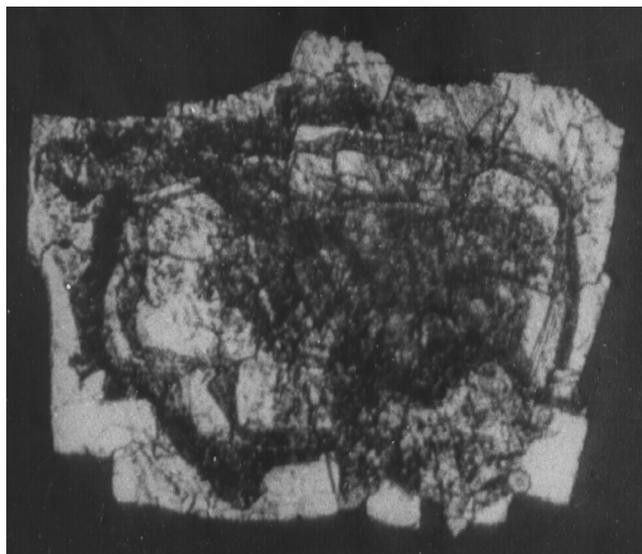


Рис. 1. Полигенное и полифазное зерно пирита с блоковым строением (програвлено HNO_3). Ядерная часть реликтового сингенетического пирита обрастает внешней оболочкой кубического габитуса.

Fig. 1. Polygenic and polyphase grains of pyrite with block structure (etched with HNO_3). The nuclear part of the relic syngenetic pyrite is covered by the outer shell of the cubic habit.

реже халькопирит, замещает наименее устойчивые в условиях метаморфизма седиментационно-диагенетические разности. В сплошных колчеданных рудах метаморфогенная перекристаллизация пирита в мелкозернистые агрегаты с азональными зернами и специфическими тройчатыми контактами выразилась в монофракциях увеличением доли поликристаллических сростков. От седиментационно-диагенетических сростков они отличаются более высокой отражательной способностью при боковом освещении и характером излома в агрегатах. Зерна диагенетических агрегатных сростаний наблюдаются лишь в единичных случаях в наименее метаморфизованных участках рудных сечений.

Онтогенический подход к изучению геологических объектов позволяет использовать типоморфные характеристики минералов-индикаторов в решении вопросов генезиса и при использовании минералогических критериев в поисках и оценке рудных объектов. Рациональный комплекс применяемых минералогических методов исследований в значительной степени предопределен требованиями экспрессности, экономичности, доступности и воспроизводимости в объеме, достаточном для статистически обоснованных геологических выводов. Пирит относят к минералам, чутко реагирующим как на изменения внешних условий среды во время роста, так и на воздействие эпигенетических трансформаций впоследствии. Одним из методов, отвечающих предъявляемым требованиям при оценке колчеданного и золото-сульфидного оруденения, является кристалломорфологический анализ пирита [2]. При изучении морфологии пирита помимо размеров, габитуса, простых форм и их относительных степеней развития в комбинациях, особенностей отклонения от идеальных моделей, скульптуры граней, определяющих внешнюю форму, нами рассматриваются и отдельные элементы анатомии, характеризующие изменение минерального индивида в процессе его существования.

КРИСТАЛЛОМОРФОЛОГИЯ

Кристалломорфологический анализ пирита проводили по методике, описанной в работе [5], путем исследований тяжелых фракций искусственных шлихов и монофракций, отобранных из сплошных и вкрапленных руд, а также вмещающих пород, несущих рассеянную прожилково-вкрапленную пиритизацию. Изучению подвергались статистически значимые выборки кристаллов и ксеноморфных зе-

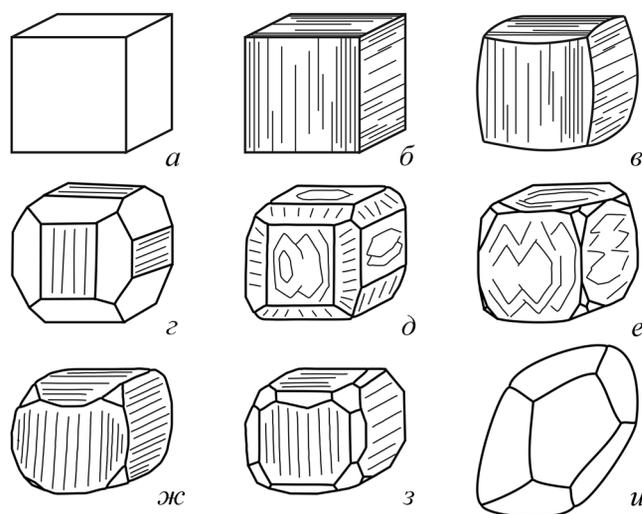


Рис. 2. Морфология кристаллов пирита Зимнего месторождения: *a* – зеркальный; *b* – параллельно-штрихованный на {100}; *v* – параллельно-штрихованный на {100} + {310}; *z* – зеркальные грани {210} и параллельно-штрихованные {100}; *d* – пламенеvidный микро рельеф на {100}; *e* – вытянуто-шестиугольный микрограней {100} + {211}; *ж* – {100} + {310} + {111}; *з* – {100} + {310} + {111} + {210}; *u* – деформированные линзовидные {210}.

Fig. 2. Morphology of pyrite crystals of the Zimnee deposit: *a* – mirror; *b* – parallel-hatched on {100}; *v* – parallel-hatched on {100} + {310}; *z* – mirror faces {210} and parallel-hatched {100}; *d* – “flame-shaped” microrelief on {100}; *e* – elongated-hexagonal micrograns {100} + {211}; *ж* – {100} + {310} + {111}; *з* – {100} + {310} + {111} + {210}; *u* – deformed lenticular {210}.

рен, отобранных по сети рядовых проб в опорных разрезах Зимнего месторождения.

При гранулометрическом анализе выяснено, что самое высокое кристалломорфологическое разнообразие имеет фракция 0,25–0,1 мм, наиболее чутко реагирующая на внешнее воздействие. Более крупные фракции на данном объекте проявили большую консервативность в изменении габитуса. Наиболее распространенный гексаэдр фиксировал изменения среды лишь в скульптурном микро рельефе и кристаллоанатомии.

Морфометрия комбинационных кристаллов пирита позволила выявить на месторождении следующие простые формы: гексаэдр {100}, пентагондодикаэдры {210}, {310}, {120}, октаэдр {111}, дидодекаэдр {321}, тетрагонтриоктаэдр {211}. Представленный ряд ранжирован в порядке уменьшения частоты встречаемости на месторождении. Габитусное значение имеют в основном только грани куба {100}. В отдельных интервалах по степени развития к габитусным приближаются {210} (рис. 2). Остальные являются аксессуарными, имеют индикаторное значение и начинают проявляться как ступени роста при зарождении микрограней на поверхности кристаллов.

Морфогенетическое значение гранного микрорельефа подчеркивали многие исследователи. Микрорельеф грани в сравнении с габитусом более чувствителен к изменениям внешних условий кристаллообразующей среды и отражает направленность кристалломорфологической эволюции минеральных индивидов на последних онтогенетических этапах [7–10]. Наиболее показательны в этом отношении грани $\{100\}$. На гранях гексаэдра выявлены следующие типы микрорельефа: зеркальный, криволинейно-слоистый, пламенеvidный, параллельно-ступенчатый, вытянуто-шестиугольный, ромбовидный.

Наиболее распространенными на месторождении являются грани $\{100\}$ с зеркальным (рис. 2а) и криволинейно-слоистым микрорельефом, характерным для метаморфогенных разностей пирита. Подобный тип рельефа свойственен для медленно растущих кристаллов в стабильной обстановке с незначительными колебаниями пресыщенности растворов [11]. Такие условия соблюдаются при метаморфогенной собирательной перекристаллизации дисульфидов железа. При резком изменении пресыщения растворов формируются расчлененный рельеф. Параллельно-штрихованный рельеф (рис. 2б, в) граней $\{100\}$ образован узкими чередующимися ступенями $\{210\}$, $\{310\}$, $\{100\}$. Такие кристаллы отмечаются в зонах интенсивных гидротермально-метасоматических изменений. При более интенсивном развитии граней $\{210\}$ штриховка микрограней $\{210\}$, $\{310\}$ остается только на комбинационных гранях $\{100\}$ (рис. 2з). Пламенеvidный микрорельеф (рис. 2д) с микрогранями $\{321\}$, $\{100\}$, $\{210\}$ является промежуточным между двумя вышеописанными типами и характерен для регенерированного гидротермально-метаморфогенного пирита. Ромбовидный вытянуто-шестиугольный рельеф (рис. 2е) обусловлен проявлением на гранях куба ступенчатых микрограней $\{321\}$ и $\{211\}$, $\{111\}$, $\{210\}$. В зонах локальной термальной проработки спорадически встречаются комбинационные грани $\{111\}$ (рис. 2ж, з). Грани пентагондodeкаэдров, как и грани гексаэдра, несут различные типы штрихованного микрорельефа: параллельно-штрихованный (рис. 2д) и зеркальный (рис. 2з).

В локальных зонах расщепления находятся деформированные линзовидные метакристаллы пирита (рис. 2и). Такие чечевице- и веретенообразные формы зачастую не содержат гранных элементов. Грани $\{210\}$ или $\{100\}$ проявляются на противоположных торцах зерен в тенях давления.

Поверхность линзовидных кристаллов в большинстве случаев имеет неровные борозды и углубления, традиционно интерпретируемые как штрихи скольжения. В породе линзовидные кристаллы ориентированы длинными осями, совпадающими с кристаллографическими осями l_2 согласно сланцеватости. Форма кристаллов и их положение в пространстве является отражением симметрии среды и стрессовых условий при гидротермально-метасоматическом росте.

КРИСТАЛЛОМОРФОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

Кристалломорфологическое картирование пирита в рудных сечениях Зимнего месторождения выявило сложную зональность, отличную от зональности слабометаморфизованных объектов. Более обоснованно генетически интерпретировать картину зональности залежи позволило сопоставление кристалломорфологии пирита с текстурно-структурными особенностями оруденения, геохимическими данными и термобарическими характеристиками пиритов. Термобарические характеристики [1] позволили установить влияние локальных средне-высокотемпературных эпигенетических пропарок на кристалломорфологию пирита с выделением пиритов, фиксирующих регрессивную направленность наложенного гидротермального процесса. Геохимическая характеристика руд [1] послужила основой для разделения проб на две выборки, отражающие асимметрию внутрирудной автометасоматической зональности на фоне эпигенетических трансформаций. Первую выборку составляют пробы пирита из сплошных колчеданных руд, вторую – пробы из прожилково-вкрапленных руд и гидротермально проработанных сплошных колчеданных руд, импрегнированных кварцем.

В разрезах наиболее отчетливо выделяются направленные изменения кристалломорфологических показателей по усредненным значениям в интервалах с естественными геологическими границами. Тенденции таких изменений иллюстрирует показатель $C(hk0)$ – суммарное развитие граней $\{210\}$ и $\{120\}$. Его увеличение отражает в первой выборке интенсивность проявления автометасоматоза и во второй – проявление наложенных гидротермальных пропарок. По сплошным колчеданным рудам верхнего рудного тела установлено увеличение показателей $C(hk0)$, $C(210)$ сверху вниз, аналогичные тенденции автометасоматических преобразований

руд, установленной на слабометаморфизованных колчеданных месторождениях [6], но менее контрастной.

В зависимости от интенсивности проявления локального термального метаморфизма сохранность автобластических пиритов имеет пятнистый характер. Такая разница наблюдается в распределении характеристических точек значений альтернативных показателей $C(100)$, $C(hkl + hkl + 111)$, C_p и подтверждается термобарическими исследованиями [1]. Пробы с высокими содержаниями агрегатных сростаний C_p коррелирует с метаморфизованными разностями дисульфидов железа. В последних при структурном травлении в отраженном свете наблюдается рисунок, напоминающий березовую кору. Такая структура, возможно, сформирована микродислокационными явлениями при природной декрепитации газовой-жидких включений [1] и при термальном воздействии метаморфогенного характера. Разрушение индивидов сдерживается импрегнируемым кварцем.

Группа проб из прожилково-вкрапленных руд и гидротермально проработанных сплошных колчеданных руд отражает центрально-симметричное проявление гидротермальных пропарок. В рудных сечениях эти участки представлены интервалами брекчирования и окварцевания с проявлением симметричной зональности показателей $C(hkl)$, $C(210)$.

При помощи моделирования кристалломорфологических характеристик пирита в плоскости разреза (рис. 3) произведена геометризация в геологическом пространстве двух тенденций. Наиболее информативными в описании пространственных закономерностей явились признаки $C_3(210)$ и $C(100)$. Оптимальной формой функции, описывающей поверхность тренда, является аппроксимирующий полином пятой степени. Эти признаки в наибольшей степени отражают на месторождении эпигенетические трансформации.

Конфигурация изолиний поверхности тренда $C(100)$ показывает наличие в пространстве двух градиентов значений. Основной занимает секущее положение по отношению к простиранию рудной залежи и всей рудовмещающей толщи. Показатель отражает уменьшение доли куба за счет развития агрегатных сростаний пирита. Он наиболее коррелирует с полученными [1] пространственными распределениями термобарических показателей, характеризующих глубокое метаморфогенное перерождение. Второй градиент проявлен в меньшей степени и характеризует в пределах разреза

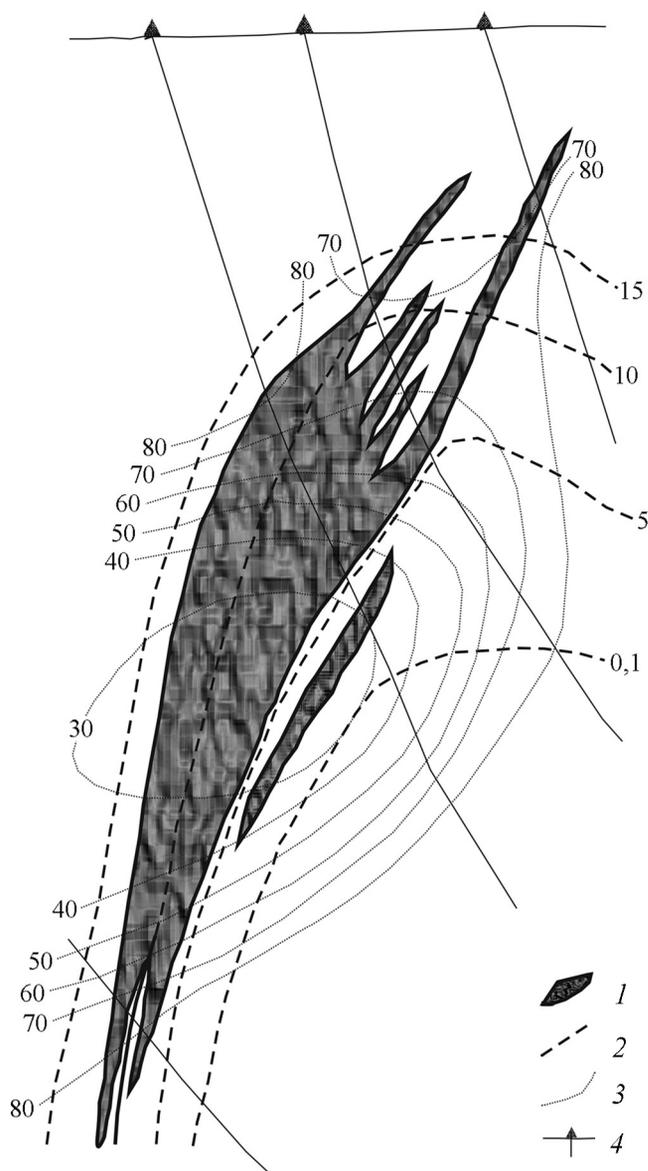


Рис. 3. Кристалломорфологическая зональность Зимнего месторождения: 1 – тела колчеданных руд; 2 – изолинии развития граней гексаэдра $C(100)$; 3 – изолинии развития граней пентагондодекаэдра $C_3(210)$; 4 – разведочные скважины.

Fig. 3. Crystallographical zonation of the Zimnee deposit: 1 – the bodies of pyrite ores; 2 – isolines of the development of the faces of the hexahedron $C(100)$; 3 – isolines of the development of the faces of the pentagonal dodecahedron $C_3(210)$; 4 – exploratory wells.

субсогласное направление. Более контрастно наложенная дислокация подчеркивается изолиниями тренда показателя $C_3(210)$, имеющего флексуобразную форму. Изгиб совпадает с осевой частью секущего основного градиента $C(100)$ и интерпретируется как проявление дислокационной структуры. Интервалы максимальных значений $C_3(210)$ характеризуют участки локальной гидротермальной проработки, распространяющейся по оперяющим основному нарушению субсогласным зонам.

В рудных сечениях показатель $C_3(210)$ выделяет участки с увеличением значений, распределенных центрально симметрично относительно основных частей гидротермопроводящих каналов. Признаки сингенетического асимметричного аутометасоматического перерождения наиболее сохранены на некотором удалении от зон аномально термальных наложенных проработок.

КРИСТАЛЛОАНАТОМИЯ И ОНТОГЕНИЯ

Онтогенические исследования с помощью минералов-индикаторов позволяют проследить основные этапы формирования и трансформаций геологических объектов. В отличие от внешнего морфологического облика внутреннее строение кристаллов пирита сохраняет следы, отражающие изменения среды минералообразования. Такие следы позволило выявить структурное травление полированных шлифов, отобранных по той же регулярной сети, что и кристалломорфологические пробы. Имея представление о внешней границе кристаллов в точках наблюдения, можно однозначно идентифицировать простые формы комбинационных многогранников, фиксируемые в зональности роста. Примером могут служить квадратные сечения как гексаэдра, так и октаэдра, совмеща-

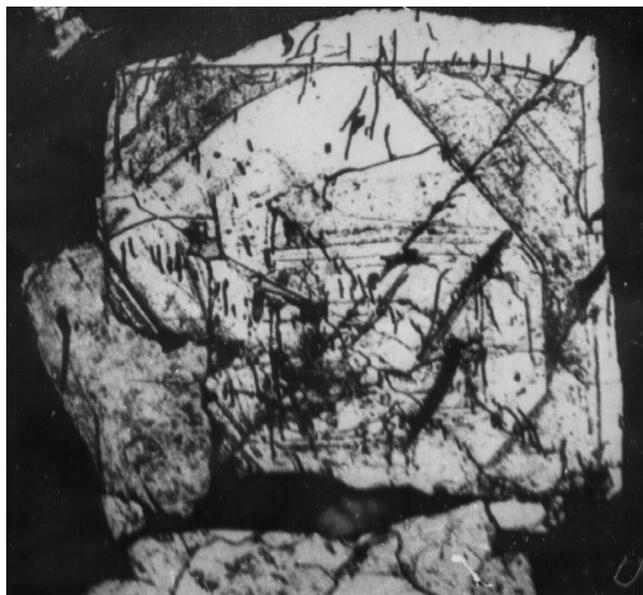


Рис. 4. Зональность роста фиксирует изменение габитуса кристалла пирита: $\{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{111\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} + \{210\} \rightarrow \{100\}$.

Fig. 4. Zoning of growth fixes the change in the habit of the pyrite crystal: $\{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{111\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} + \{210\} \rightarrow \{100\}$.

емые в одном индивидуе, но повернутые друг относительно друга на 45° . Информация о габитусе внешней оболочки таких зональных кристаллов позволяет однозначно провести диагностику габитусных форм от периферии к центральным частям зональных кристаллов. Многократные измерения двугранных углов случайных сечений вскрытых зон роста в статистически значимой выборке различных индивидов позволяет выявлять последовательности смен и других простых габитусных форм. Для таких интервалов в зональном строении индивидов, выявляемом структурным травлением в полированных шлифах (рис. 4, 5), отражается максимальное количество признаков изменения среды минералообразования. В анатомии кристаллы обнаруживают эволюцию габитуса в виде изменений развития граней комбинационных кристаллов. Так, например, в ядерной части вышеуказанного интервала во внутреннем строении кристалломорфного пирита выявляется наиболее полный ряд смен габитусных форм, отражающий в эволюции индивидов эволюцию гидротермальной системы: $\{100\}_{100} \xrightarrow{I} \{100+210\}_{50,50} \xrightarrow{II} \{100\}_{100} \xrightarrow{III} \{100+310\}_{70,30} \xrightarrow{IV} \{100+111\}_{80,20} \xrightarrow{V} \{111+100\}_{80,20} \xrightarrow{VI} \{100+210\}_{30,20} \xrightarrow{VII} \{100+210+111\}_{70,20,10} \xrightarrow{VIII} \{100\}_{100}$.

Здесь последовательность габитусных переходов указана цифрой над стрелкой. После скобок внизу указаны величины, характеризующие в процентном соотношении степени развития соответствующих простых форм (индексы в скобках) в комбинационных кристаллах.

Первая смена габитуса характеризует обрастание аутобластическим пиритом микрокристаллов, подобных седиментационно-диагенетическим разностям. Второй переход фиксирует завершение этапа сингенеза образованием кристалла кубического габитуса. Азональная оболочка характеризует собирательную перекристаллизацию стадии регионального метаморфизма. Третий габитусный переход отражает возобновление гидротермальной проработки с образованием комбинированных форм куба и пологого пентагондодекаэдра $\{310\}$. Четвертый и пятый переходы с развитием граней октаэдра $\{111\}$ указывают на увеличение температурных параметров наложенного гидротермального процесса. Максимальное развитие октаэдра на других ранее изученных объектах показало наиболее высокие значения термобарической декриптоактивности. Три последних габитусных перехода проявляются в последовательном уменьшении и

исчезновении граней $\{111\}$, смене их $\{210\}$ и дальнейшем уменьшении последних за счет развития граней $\{100\}$. Такая последовательность подчеркивает регрессивный характер завершающих стадий эволюции гидротермальной системы.

По периферии зональных кристаллов, как правило, расположена азональная кайма, развитие которой может привести к полному исчезновению во внешнем ограничении кристаллов граней, отличных от кубических $\{100\}$. На интенсивно метаморфизованных объектах это явление нивелировки при кристалломорфологических исследованиях требует тщательного изучения кристаллоанатомии минерала-индикатора, более консервативной к внешнему метаморфизирующему воздействию. Онтогенетический анализ помогает найти признаки тех условий роста зерен, которые имели место при возникновении агрегатов и индивидов, то есть сингенетические, а также проследить основные этапы эпигенеза. Сопоставление внешних и внутренних кристаллоанатомических характеристик позволяет в значительной степени устранить конвергентность признаков колчеданных руд. Динамика смен габитусных форм, выявленных в анатомии кристаллов пирита, совпадает с эволюционным морфогенетическим рядом, характерным для менее метаморфизованных колчеданных объектов [5].

ВЫВОДЫ

Изучение морфологии пирита сплошного колчеданного оруденения выявило асимметричный характер вертикальной зональности, отражающий интенсивность аутометасоматоза на этапе сингенетического формирования рудной залежи. Эпигенетические наложенные гидротермальные процессы носят центрально симметричный характер, совпадающий с секущей оруденение зоной транзита и выноса тектонического характера. Оперяющие нарушения приводят к переотложению и локализации медного и благороднометалльного оруденения. Кристаллоанатомия пирита фиксирует основные онтогенетические этапы, последовательность и направленность процессов гидротермально-метаморфогенных процессов. Проведенное кристалломорфологическое картирование в рамках комплексного рудно-минералогического позволило более обоснованно на генетической основе интерпретировать геологическую историю рудной залежи и установить соотношение интенсивности проявления фак-

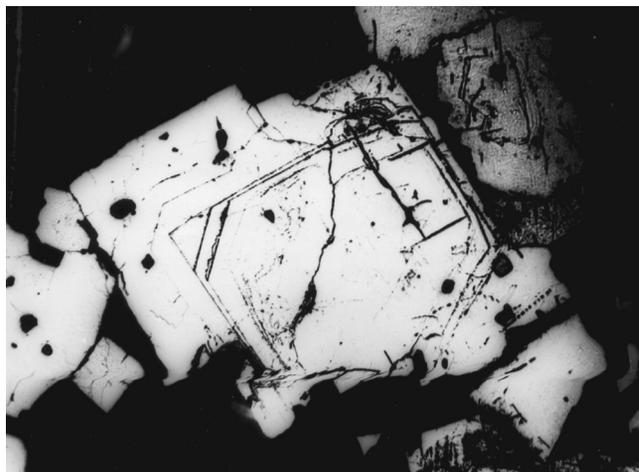


Рис. 5. Полицикличность изменения габитуса в анатомии кристалла пирита. Зональность роста отражает смену габитусного значения форм $\{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\}$.

Fig. 5. Polycyclic changes in the habitus in the anatomy of the pyrite crystal. Zoning of growth reflects a change in the habitus value of the $\{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\}$.

торов сингенеза и эпигенеза, а также скрытую внутрирудную зональность. Таким образом, геометризация в пространстве кристалломорфологических характеристик позволяет уточнить геолого-структурную позицию и генетические особенности метаморфизованного колчеданного оруденения, а также прогнозировать распределение в пространстве полезных компонентов, коррелятивно связанных с градиентными минералофизическими признаками.

Таким образом, в кристаллоанатомической последовательности смены габитусного значения простых форм отражаются основные этапы как формирования рудной залежи, так и эпигенетических трансформаций. Их изучение дает возможность наблюдать, как в иерархии уровней структурной организации рудное поле – рудное тело – кристаллический агрегат – кристалл на кристаллическом уровне проявляется неоднородность, определяемая проявлением реакции кристалла на изменение параметров минералогенеза. Установленные закономерности являются отражением общности единой рудно-геохимической зональности золоторудных [2] и колчеданных месторождений для различных регионов России и мира. Так, перспективные геолого-промышленные типы рудопроявлений золота в Ростовской области [3], в частности Керчикское, находят место в завершающих фазах описанной онтогенетической последовательности. Варианты проявления этого процесса на различных объектах изучения и их частях зависят от полноты

развития полигенного и полихронного онтогенетического цикла, возможной повторяемости, интенсивности, геохимической специализации отдельных его элементов и других факторов. Комплексное использование различных минералогических, минералофизических, минералогеохимических и других методов проливает свет как на происхождение конкретных месторождений и рудопроявлений, так и на природу различных формационно-генетических типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богуш И.А., Черненко М.Ю., Болтенко А.Е. 1991. *Методы рудоминералогенетического моделирования и локальный прогноз колчеданного оруденения*. Новочеркасск, изд-во НПИ: 47 с.
2. Кокин А.В., Парада С.Г. 2016. Минеральные типы как отражение единой рудно-геохимической зональности золоторудных месторождений (на примере Якутии и Кавказа). *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. 3(3): 69–75.
3. Парада С.Г. 2014. Перспективные геолого-промышленные типы рудопроявлений золота в Ростовской области. *Вестник Южного научного центра*. 10(4): 53–60.
4. Коваль А.В., Полевиковский Ю.С. 2013. Петрографические особенности тектонитов Хаутоварско-Койкарской зоны разломов на участке Талпус (Карелия). В кн.: *Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии северо-запада России. Труды XXIV Молодежной научной конференции, посвященной памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца. Апатиты, 7–10 октября 2013 г.* Апатиты, К & М: 53–55.
5. Богуш И.А., Кафтантаий А.Б., Черненко М.Ю. 1991. Кристалломорфологический анализ пиритов руд Комсомольского медноколчеданного месторождения. *Записки Всесоюзного минералогического общества*. 3: 43–49.
6. Богуш И.А. 2015. Автобластез, гетерогенез и зональность роста пирита колчеданных месторождений. *Вестник Южного научного центра*. 11(3): 59–65.
7. Абдуллаев Г.К. 1957. К вопросу о связи морфологии кристаллов пирита с условиями их образования. *Докл. АН АзССР*. 13(1): 43–48.
8. Джафаров И.Д. 1964. О зональном строении кристаллов пирита и причинах, вызывающих неравномерность их роста. *Геология рудных месторождений*. 4: 87–92.
9. Джафаров И.Д. 1970. *Кристалломорфология пирита и ее минерогенетическое значение*. Баку, Элм: 118 с.
10. Строителев С.А. 1961. О причинах образования комбинационной штриховки кристаллов. *Записки Всесоюзного минералогического общества*. 6: 709–714.
11. Касаткин И.А., Грунский О.С., Гликин А.Н. 1990. Морфология кристаллов, растущих при изменяющемся прессыщении. В кн.: *Минералогическая кристаллография, кристаллогенезис, кристаллосинтез*. Сыктывкар, Коми научный центр УрО РАН: 99–100.

REFERENCES

1. Bogush I.A., Chernenko M.Yu., Boltenko A.Ye. 1991. *Metody rudnomineralogicheskogo modelirovaniya i lokal'nyu prognos*

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность профессору, д. г.-мин. н. И.А. Богушу (Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова (НПИ), г. Новочеркасск) за общее руководство проведенными исследованиями и профессору, д. г.-мин. н. А.В. Мохову (Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону) за ценные советы при написании этой работы.

- kolchedannogo orudneniya. [Methods of ore-mineralogical modeling and local forecasting of pyrite mineralization]*. Novochoerkassk, Novochoerkassk Polytechnic Institute: 47 p. (In Russian).
2. Kokin A.V., Parada S.G. 2016. [Mineral types as a reflection of single ore geochemical zonation of gold ore deposits (by the example of Yakutia and Caucasus)]. *Groznenkiy estestvennonauchnyy byulleten'*. 3(3): 69–75. (In Russian).
 3. Parada S.G. 2014. [Promising geological-industrial types of golden ore manifestations in the Rostov Region]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 10(4): 53–60. (In Russian).
 4. Koval A.V., Polekhovski Yu.S. 2013. [Petrographic features of tectonites of the Khautovar-Koikar fault zone at the site Talpus (Karelia)]. In: *Aktual'nye problemy geologii, geofiziki i geoekologii severo-zapada Rossii. Trudy XXIV Molodezhnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati chl.-korr. AN SSSR K.O. Krattsy. [Actual problems of geology, geophysics and geoecology of Northwest Russia. Proceedings of the XXIV Youth scientific conference, dedicated to the memory of corresponding member of the USSR Academy of Sciences K.O. Kratsy (Apatity, Russia, 7–10 October 2013)]*. Apatity, K & M: 53–55. (In Russian).
 5. Bogush I.A., Kaftanatiy A.B., Chernenko M.Yu. 1991. [Crystal-morphological analysis of ore pyrites of the Komsomolskoye copper-pyritic deposit]. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 3: 43–49. (In Russian).
 6. Bogush I.A. 2015. [Autoblastation process, heterogenesis, and growth zoning of pyrite of massive sulfide deposits]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 11(3): 59–65. (In Russian).
 7. Abdullaev G.K. 1957. [To the question about connection of pyrite crystals morphology with condition of their formation]. *Doklady Akademii nauk Azerbaydzhanskoj SSR*. 13(1): 43–48. (In Russian).
 8. Dzhaфарov I.D. 1964. [About zonal structure of pyrite crystals and causes evoking irregularity of their growth]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 4: 87–92. (In Russian).
 9. Dzhaфарov I.D. 1970. *Kristallomorfologiya piritа i ee minerageneticheskoye znachenie*. [Crystal-morphology of pyrite and its mineragenetic meaning]. Baku, Elm: 118 p. (In Russian).
 10. Stroitelev S.A. 1961. [About causes of formation of combination striation of crystals]. *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo obshchestva*. 6: 709–714. (In Russian).
 11. Kasatkin I.A., Grunskiy O.S., Glikin A.N. 1990. [Morphology of crystals, growing at changing satiety]. In: *Mineralogicheskaya kristallografiya, kristallogenezis, kristallosintez*. [Mineralogical crystallography, crystal-genesis, crystal-synthesis]. Syktyvkar, Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences: 99–100. (In Russian).

Поступила 19.06.2018