

УДК 549.3:553.2

О ЗОНАЛЬНОСТИ ФОРМЫ И СОСТАВА КРИСТАЛЛОВ ПИРИТА БЕРЕЗОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (УРАЛ)

В.И. Попова*, Д.А. Артемьев, В.А. Котляров

Институт минералогии УрО РАН, 456317, Россия, г. Миасс, Ильменский заповедник;

**popov@mineralogy.ru*

ZONATION OF FORM AND COMPOSITION OF PYRITE CRYSTALS OF THE BEREZOVSKY GOLD DEPOSIT (URALS)

V.I. Popova*, D.A. Artemyev, V.A. Kotlyarov

*Institute of Mineralogy UB RAS, 456317, Russia, Miass, Ilmen State Reserve; *popov@mineralogy.ru*

В статье рассмотрены морфология кристаллов, зональность строения и состава пирита разных форм роста и внешнего ограничения из кварцевых жил, березитов и лиственитов Берёзовского золоторудного месторождения. При кристаллизации смена форм роста пирита происходила по схеме $\{111\} \rightarrow \{111\} + \{100\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\}$ или по более сложным схемам: $\{100\} \rightarrow \{210\} + \{100\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\}$, $\{100\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} + \{421\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\}$ и другим. Наиболее ранние формы зон роста пирита характерны для более глубоких горизонтов месторождения. Формирование сульфидно-кварцевых жил происходило в неспокойной тектонической обстановке, что проявлено в деформации пирита и залечивании полостей трещин в них более поздними зонами. Ранний пирит в сульфидно-кварцевых жилах при раскрытии новообразованных трещин дорастал до полиэдра как в трещине (жиле), так и замещая березит. Периферические зоны $\{210\}$ кристаллов пирита обогащены тяжёлым изотопом серы (δS^{34} от +8.5 до +10 ‰) и часто содержат микровростки других минералов и золота. Микротопохимические карты распределения элементов, полученные методом ЛА-ИСП-МС в сечении (100) одного из кристаллов пирита величиной 11 мм из друзовой полости сульфидно-кварцевой жилы, также отражают сложную историю формирования пирита. Наряду с более обычными мусковитом, фторапатитом и галенитом, в пирите месторождения впервые выявлены микровключения циркона, монацита-(Ce) и браннерита UTi_2O_6 .

Илл. 8. Табл. 1. Библ. 21.

Ключевые слова: пирит, морфология кристаллов, зональность состава, минеральные включения, Берёзовское месторождение, Урал.

Morphology, zonation and composition of pyrite crystals from quartz veins, beresites and listvenites of the Berezovsky gold deposit are examined. During the crystallization, the pyrite forms changed following a relatively simple scheme $\{111\} \rightarrow \{111\} + \{100\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\}$ or more complex schemes $\{100\} \rightarrow \{210\} + \{100\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\}$, $\{100\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} + \{421\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\}$ and others. The earliest forms of growth zones of pyrite crystals are characteristic of deeper horizons. The sulfide-quartz veins were formed under active tectonic conditions, which are manifested in deformation of pyrite and healing cracks by later zones. In the course of the opening of new cracks, the early pyrite forms of sulfide-quartz veins were upgraded up to polyhedra in the fractures (veins) and also replaced beresite. The $\{210\}$ peripheral zones of pyrite crystals are enriched in heavy S isotope (δS^{34} from +8.5 to +10 ‰) and often contain microinclusions of other minerals, including gold. The LA-ICP-MS trace element patterns of the (100) cross section of one druse pyrite crystal 11 mm in size from a sulfide-quartz vein also reflect the complex evolution of its formation. Along with

more common muscovite, fluorapatite and galena, the microinclusions of zircon, monazite-(Ce) and brannerite UTi_2O_6 were first identified in pyrite of the deposit.

Figures 8. Table 1. References 21.

Key words: pyrite, crystals morphology, zonation of composition, mineral inclusions, Berezovsky deposit, Ural.

Введение

Крупнейшее на Урале Берёзовское золоторудное месторождение, расположенное в 12 км северо-восточнее г. Екатеринбург на Среднем Урале, отрабатывается с 1748 г. Исследования месторождения, закономерностей локализации золота и сопутствующих минералов руд обобщены в многочисленных публикациях и рукописных отчётах (Бородаевский, Бородаевская, 1947; Кутюхин, 1948; Попов, 1970; Самарцев и др., 1973; Чесноков, 1973; Бабенко, 1978; Сазонов и др., 1997; Клеймёнов и др., 2006; Поленов и др., 2013, 2015 и др.). Главным золотосодержащим минералом руд является пирит с содержанием Au от единиц до 100 м г/т и более. Содержание пирита в сульфидно-кварцевых жилах составляет до 2–20 % объёма, в березитах и лиственитах – до 1–5 %. Участки пирит-кварцевых жил с проявлением сульфидов полиметаллов, арсенидов, сульфоарсенидов и сульфосолей обычно более золотоносны. Относительный возраст пирита, морфология, состав и зональность роста кристаллов частично рассмотрена в ряде работ (Бетехтин, Кутюхин, 1941; Бородаевский, Бородаевская, 1947; Кутюхин, 1948; Чесноков и др., 1975; Попова, 1977, 1980; Сидорова, Абрамова, 2017 и др.), а также в обобщающих монографиях (Сазонов и др., 1997; Клеймёнов и др., 2006; Поленов и др., 2015).

Нами приведены дополнительные сведения и обобщения о зональности состава и строения кристаллов пирита из кварцевых жил, березитов и лиственитов Берёзовского месторождения.

Материалы и методы исследования

Кристаллы пирита из друзовых полостей сульфидно-кварцевых жил и метакристаллы из березитов и лиственитов (около 260) были отобраны нами в 1966–1969 гг. на глубинах 88–512 м в подземных горных выработках при минералогическом картировании жил в шахтах Южной, Вспомогательной, № 1, 5, 6, Северной и Центральной (рис. 1). В данной работе исследовались преимущественно относительно крупные кристаллы и их сростки (1–5 см, реже до 10–20 см). Ограничение кристаллов

исследовано В.И. Поповой как визуально (габитусные простые формы), так и гониометрически с применением гониометра ГД-1 (для мелких кристаллов) и прикладного гониометра – для крупных. Идеализированные формы кристаллов вычерчены В.А. Поповым в программе Shape 7.1. Форма зон роста в кристаллах выявлялась в ориентированных полированных сечениях электролитическим травлением методом тампона смесью концентрированных кислот H_3PO_4 , HCl , H_2CrO_4 и дистиллированной H_2O в соотношении, близком 3:1:5:1; время травления ~30 сек (Попова, Чесноков, 1971). Единичные ориентированные срезы кристаллов исследованы методом нейтронно-активационной радиографии после облучения потоком тепловых нейтронов в Институте ядерной физики Казахстана (Попова, 1983). Фотосъёмка образцов пирита выполнена В.А. Поповым. Включения других минералов и их диагностика в сечениях кристаллов пирита исследованы макроскопически и с применением бинокулярного, рудного и рентгеновского электронного (РЭММА-202М с LZ-5, аналитик В.А. Котляров) микроскопов. Распределение элементов в сечении одного из кристаллов пирита величиной 11 мм исследовано в Институте минералогии УрО РАН методом лазерной абляции (ЛА-ИСП-МС) на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7700x с программным комплексом MassHunter и лазерной приставкой New Wave Research UP-213 (аналитик Д.А. Артемьев); элементные карты построены в программе Iolite путём пересчёта графиков интенсивности при абляции по линиям, которая осуществлялась лазерным пучком диаметром 110 мкм при расстоянии 110 мкм между центрами линий со скоростью 80 мкм/с.

Краткие сведения о геологии Берёзовского месторождения

История открытия первого на Урале коренного золота, найденного в 1845 г. Ерофеем Марковым в кусках кварца у речки Берёзовки недалеко от р. Пышмы, где и был заложен рудник «Первоначальный», обстоятельно и красочно изложена в книге «Знаменитые месторождения Урала» (Клей-

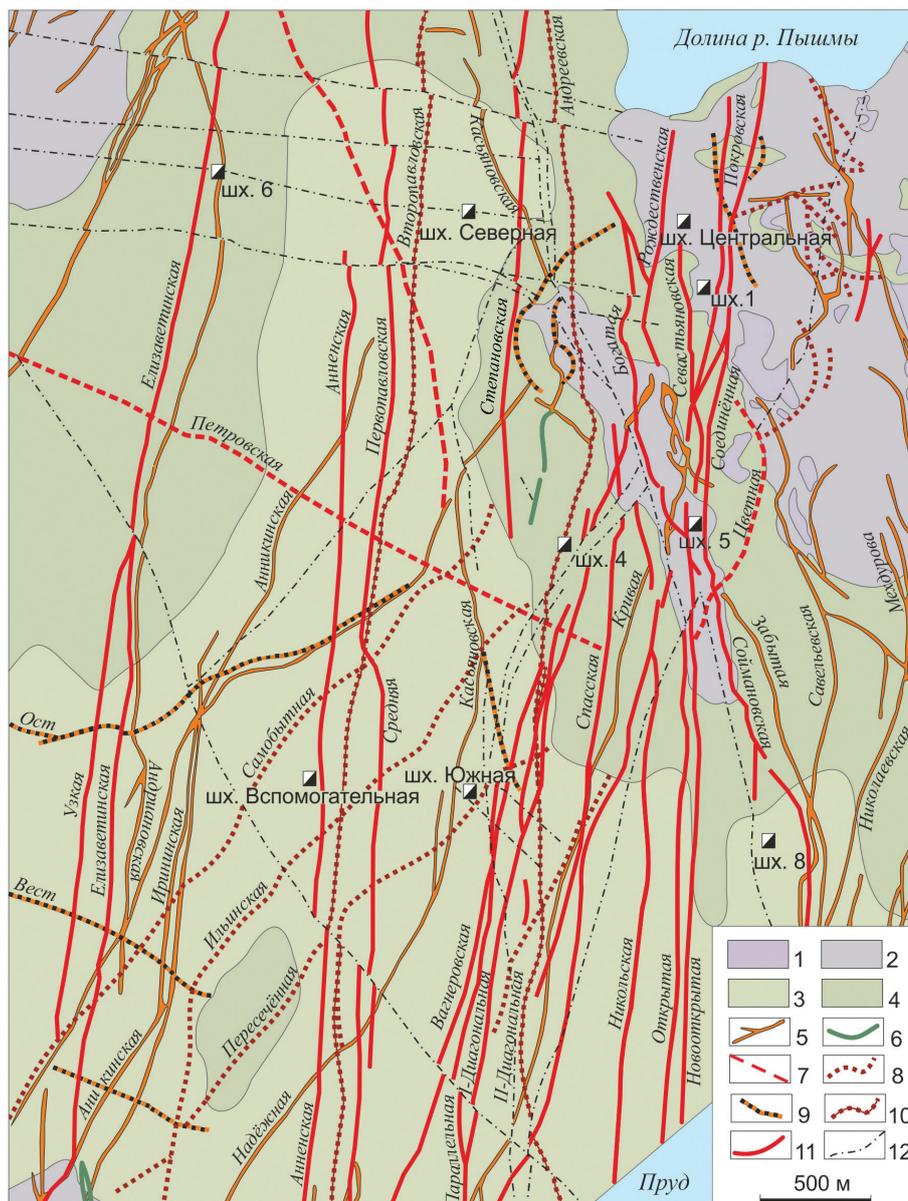


Рис. 1. Геологическая карта центральной части Берёзовского золоторудного месторождения (по: Бородаевский, Бородаевская, 1947, с изменениями).

1 – серпентиниты (O_{1-2}); 2 – тальк-карбонатные породы (O_{1-2}); 3 – туфы порфиров и туфогенно-осадочных пород (S_1V_1); 4 – диабазы и их туфы, частично превращённые в хлорит-актинолитовые сланцы; 5–11 – дайки (C_1-P) от ранних к поздним: 5 – плагиосиенит-порфиры 1-го цикла, 6 – лампрофиры, 7 – плагиогранит-порфиры 1-го цикла, 8 – гранит-порфиры 1-го цикла, 9 – плагиосиенит-порфиры 2-го цикла, 10 – гранит-порфиры 2-го цикла, 11 – плагиогранит-порфиры 2-го цикла; 12 – тектонические нарушения.

Fig. 1. Geological map of the central part of the Berezovsky gold deposit (modified after Borodaevsky, Borodaevskaya, 1947).

1 – serpentinites (O_{1-2}); 2 – talc-carbonate rocks (O_{1-2}); 3 – tuffs of porphyrites and tuffaceous-sedimentary rocks (S_1V_1); 4 – diabases and their tuffs, partially altered to chlorite-actinolite shales; 5–11 – early to late dikes (C_1-P): 5 – porphyry plagiосyenites of the first cycle, 6 – lamprophyres, 7 – porphyry plagiогranites of the first cycle, 8 – porphyry granites of the first cycle, 9 – porphyry plagiосyenites of the second cycle, 10 – porphyry granites of the second cycle, 11 – porphyry plagiогranites of the second cycle; 12 – faults.

мёнов и др., 2006). В дальнейшем Берёзовские рудники были национализированы государством в конце 1917 г., и в 1918 г. добыто 291 кг золота.

После окончания Гражданской войны и попыток восстановления хозяйства России вновь заработал Берёзовский рудник, и развернулись геологоразве-

дочные работы, в том числе с бурением структурных разведочных скважин, показавших перспективность оруденения на глубинах до 800–1000 м. В настоящее время добыча руды осуществляется ООО «Берёзовское рудоуправление» с извлечением в год около 600 кг золота, 1 т серебра и 100 т меди (Клеймёнов и др., 2006).

Месторождение локализовано в метаморфизованных вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах палеозойского возраста в крупной грабен-синклинали центральной части Восточно-Уральского антиклинория. В северной части месторождения расположен Пышминский габбро-перидотитовый массив, изменённый до серпентинитов и тальк-карбонатных пород. На юге рудное поле граничит с Шарташским гранитным массивом, породы которого по геофизическим данным отмечены в центральной части месторождения на глубинах 1.5–2 км, а в северной – на глубинах 2.5–4 км. Месторождение представляет собой сеть сульфидно-кварцевых жил в серии многочисленных даек гранитоидов (см. рис. 1), общее число которых более 350 (Сазонов и др., 1997). По петрографическому составу и относительному возрасту (по пересечениям) дайки подразделяются на семь групп от ранних к поздним (Бородаевский, Бородаевская, 1947):

1) плагиосиенит-порфиры I цикла (дайки Первоначальная, Андриановская, Аникинская, Надёжная-Касьяновская, Кривая, Забытая, Савельевская, Николаевская и др.);

2) диориты и лампрофиры (дайки Платоновская, Зелёная и др.);

3) плагиогранит-порфиры I цикла (дайки Петровская, Юрьевская и др.);

4) гранит-порфиры I цикла (дайки Самобытная, Ильинская, Пересечённая, Цветная и др.);

5) плагиосиенит-порфиры II цикла (дайки Вест, Ост и др.);

6) гранит-порфиры II цикла (дайки Второпавловская, II-Диагональная, Андреевская и др.);

7) плагиогранит-порфиры II цикла (дайки Узкая, Елизаветинская, Анненская, Первопавловская, Вагнеровская, I-Диагональная, Степановская, Никольская, Открытая, Соймановская, Новолеонтьевская и др.).

Многие дайки прослежены по простиранию на 8–9 км и более, а по падению – до глубины 1–1.2 км. В относительно пластичных тальк-карбонатных породах длина даек обычно менее 1 км.

Золотосодержащие сульфидно-кварцевые «лестничные» жилы, поперечно секущие дайки

гранитоидов по тектоническим трещинам, имеют экзоконтактовые зоны березитов, а менее проявленные «красичные» жилы во вмещающих породах, часто являющихся продолжением «лестничных» жил, сопровождаются экзоконтактовыми зонами лиственитов. В участках пересечения или сочленения разных даек секущие их жилы обычно прослеживаются без видимых изменений и прерыва. По данным разных исследователей, минералообразование в сульфидно-кварцевых жилах и агрегатах происходило из газо-гидротерм при температурах от 420 до 285–150 °С и давлении 2.5–0.3 кбар (Поленов и др., 2015) при неоднократных тектонических подвижках.

В сульфидно-кварцевых жилах выявлены последовательные минеральные ассоциации – анкерит-кварцевая с пиритом, пирит-кварцевая с шеелитом, полиметаллическая (полисульфидно-кварцевая) и кварц-карбонатная (Самарцев и др., 1973). Пирит в разных количествах встречается практически во всех типах жил и вмещающих пород.

Морфология кристаллов и зон роста пирита

В породах и жилах Берёзовского месторождения исследованные кристаллы пирита встречены в форме гексаэдра {100} (куба), пентагондодекаэдра {210} и октаэдра {111}, нередко образующие комбинации форм (рис. 2) и осложнённые маленькими гранями дидодекаэдров {211} и {421}, реже – тетрагонтриоктаэдра {321}, а также частично огранённые асимметричные индивиды с индукционными поверхностями совместного роста с кварцем и другими минералами в «лестничных» и «красичных» жилах (Попова, 1977). Наиболее часты кристаллы и сростки пирита в форме куба с характерной линейной штриховкой [001] на их гранях, образованной комбинацией узких граней куба и пентагондодекаэдра {210} (рис. 3а), а также пентагондодекаэдрические кристаллы и их сростки (см. рис. 3б). На гранях пентагондодекаэдра {210} штриховка очень тонкая и слабо заметна, а при наличии в огранении кристаллов даже крохотных граней дидодекаэдров (доли миллиметра) штриховка более отчётливая, вплоть до проявления бугорков роста в форме усечённых прямоугольных пирамидок.

По результатам морфологического анализа последовательных зон роста разных простых форм в сечениях (100) электролитически протравленных 249 кристаллов пирита из сульфидно-квар-

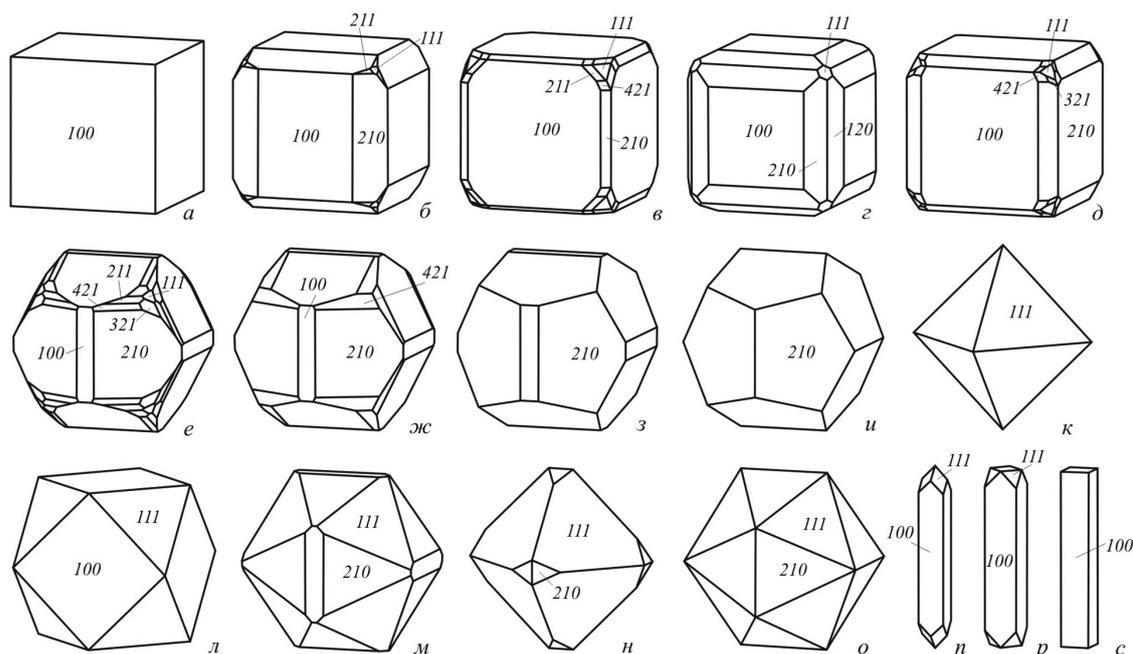


Рис. 2. Формы кристаллов пирита Берёзовского месторождения.
Fig. 2. Forms of pyrite crystals of the Berezovsky deposit.

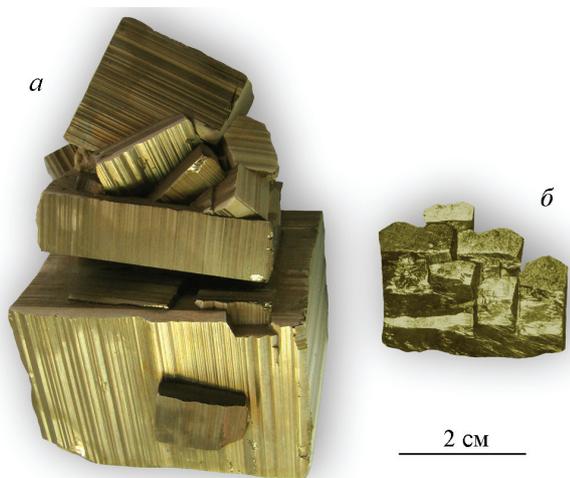


Рис. 3. Наиболее типичные кристаллы пирита из друзовых полостей в сульфидно-кварцевых жилах (а) и метакристаллов из березитов (б).

Fig. 3. Most typical druzy crystals of pyrite of sulfide-quartz veins (a) and metacrystals from beresites (b).

цевых жил и березитов установлено, что в процессе их роста форма кристаллов, как правило, изменялась неоднократно. Центральные наиболее ранние участки некоторых кристаллов из кварцевых жил образованы зонами роста октаэдра (рис.

4а), а периферические – зонами куба и пентагон-додекаэдра, что указывает на возрастание щёлочности минералообразующей среды (Попов, 1984). В кристалле величиной ~20 см из жилы в плагиогранит-порфире дайки Елизаветинской (с глубины 88 м) группа внутренних зон октаэдра $\{111\}$ составляет более половины, сменяясь комбинацией зон $\{111\} + \{100\}$, затем зонами $\{100\}$ и $\{100\} + \{210\}$. В листовниках метакристаллы пирита в форме $\{111\}$ и в комбинации с другими формами довольно часты (см. рис. 2к–о).

Крупные кристаллы в форме искажённых кубов (прямоугольных параллелепипедов) наиболее часты и характеризуются тонкой почти «зеркальной» зональностью по $\{100\}$ (см. рис. 4б), практически без погребённой штриховки (Чесноков, Попова, 1971); более поздние зоны пентагондодекаэдра $\{210\}$ завершают кристаллизацию (см. рис. 4в). Встречались кристаллы с двойной сменой форм $\{100\} + \{210\}$ с преобладанием зон пентагондодекаэдра (см. рис. 4з), как и метакристаллы пирита из березитов (см. рис. 4д–ж). Наиболее редки кристаллы с более сложной последовательностью форм роста, например: $\{100\} \rightarrow \{210\} + \{100\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\}$, $\{100\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} + \{421\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\}$ и другие (Попова, 1980). В участ-

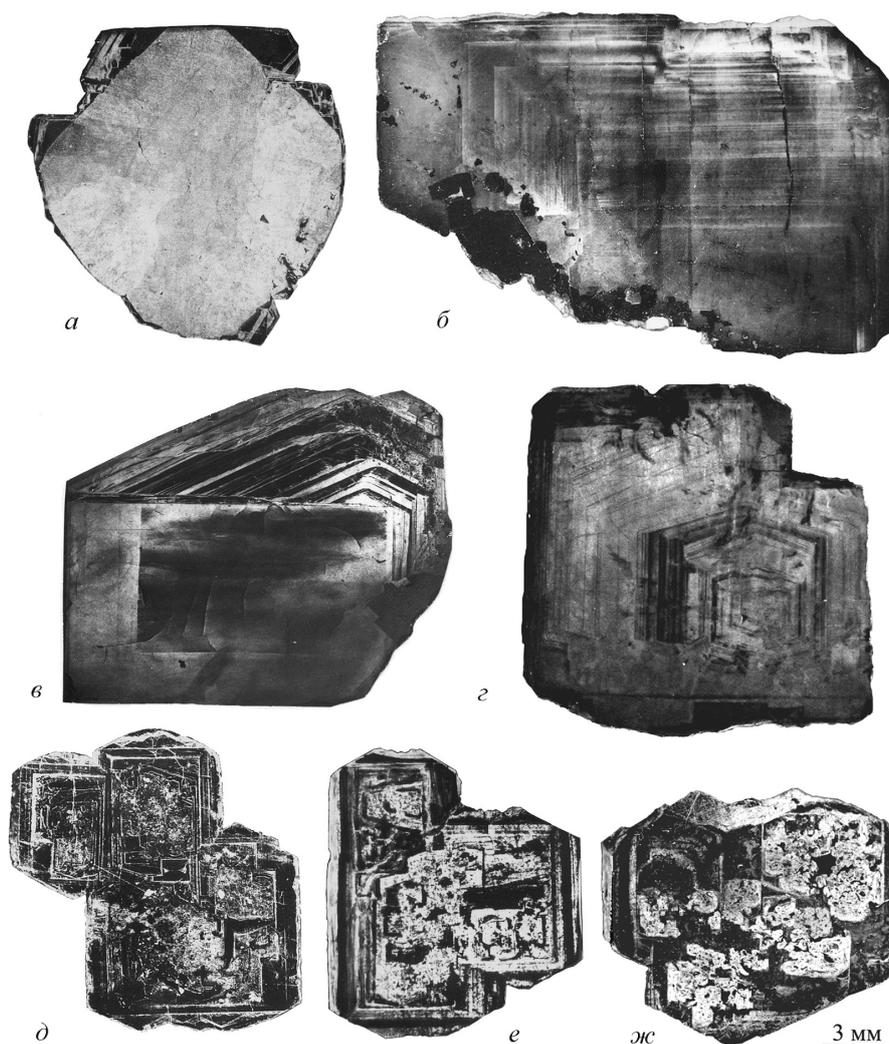


Рис. 4. Примеры зональности форм роста кристаллов пирита из сульфидно-кварцевых жил (*а–г*) и из березитов (*д–ж*). Объяснения см. в тексте.

Fig. 4. Zonation of growth forms of pyrite crystals from sulfide-quartz veins (*a–g*) and metacrystals from beresites (*б–ж*). For explanations, see text.

ках даек, где пириты отобраны из жил на разных горизонтах (глубинах), ранние зоны в кристаллах характерны для более глубоких горизонтов (например, в дайках Первопавловской, Второпавловской и Ильинской).

Кристаллы пирита и их сростки как в друзовых полостях кварцевых жил, так и метакристаллы в березитах разновелики и часто включают разноориентированные вростки более мелких кристаллов. Формирование сульфидно-кварцевых жил происходило в неспокойной тектонической обстановке, что проявилось как в образовании деформационных блоков роста пирита (см. рис. 4б), так и обрастании обломков ранних кристаллов и залечивании в них полостей трещин более поздними

зонами до полиэдра (рис. 5а–в). Ранние выделения пирита в сульфидно-кварцевых жилах при раскрытии новообразованных трещин дорастали до полиэдра как в полости трещины (в жиле), так и замещающая березит (см. рис. 5г).

О составе зон роста пирита Берёзовского месторождения

Ранее отмечалось, что пириты из кварцевых жил в дайках гранитоидов и березитов практически чисты по составу с размером элементарной ячейки $a_0 = 5.4174 - 5.4176 \pm 0.0001 \text{ \AA}$ с незначительными примесями Ni 0.004 и Co 0.002 мас. %, а пириты из лиственитов характеризуются $a_0 = 5.4195 \text{ \AA}$ и

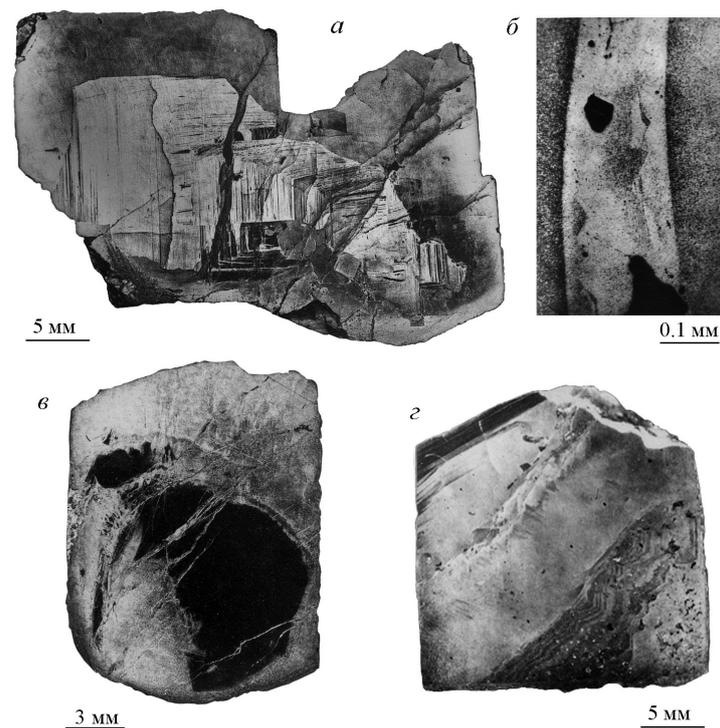


Рис. 5. Обрастание обломков ранних кристаллов пирита с залечиванием полостей трещин более поздними зонами до полиэдра (*а–в*) как в полости трещины (в жиле), так и замещая березит (*г*).

Fig. 5. Healing fractures of early pyrite crystals by later zones up to the polyhedron (*a–в*) in fracture (vein) and replacing beresite (*г*).

содержаниями Ni до 0.40 и Co 0.30 мас. %. Более протравливающиеся зоны пирита характеризуются повышением a_0 на $0.000n \text{ \AA}$ и содержат несколько больше Ni и Co (по данным спектрального анализа) по сравнению с зонами, слабо поддающимися электроотравлению (Чесноков, Попова, 1971). В периферических зонах роста некоторых кристаллов выявлены примеси Au и As, возможно, из-за микровключений. Так, в двух мелких зёрнах пирита (~1 мм) из дайки Первопавловской проявлено обогащение As и Au более светлых (в BSE) периферических участков кристалликов, а в тёмных центральных участках («неправильной» формы вследствие несколько косо́го сечения зёрен) – относительно повышенные примеси Sn, Cu, Zn, Pb, Cd, In, Ag и Ga, предположительно из-за включений станнина (Сидорова, Абрамова, 2017). В периферических зонах роста и преимущественно по трещинкам кристаллов пирита отмечались микровключения галенита, халькопирита, блёклой руды, золота и других минералов, а в доломитовых жилах среди листовенитов шахты № 1, кроме пирита, встречены кристаллы герсдорфита (до 5 см и более) и никелина в ассоциации с более поздними виоларитом, милле-

ритом, полидимитом, теннантитом и халькопиритом (Чесноков и др., 1975; Сазонов и др., 1997).

Крупные кристаллы пирита из сульфидно-кварцевых жил зональны по изотопному составу серы. В одном из кристаллов (рис. 6) значение δS^{34} центральных зон {100} близко метеоритному (–1 до +1.5 ‰) за счёт более глубо́нного источника

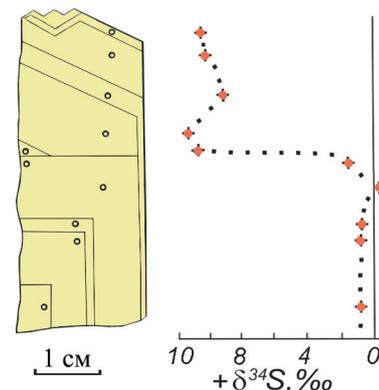


Рис. 6. Различия изотопного состава серы пирита в зонах роста куба {100} и более поздних зонах пентагонально-додекаэдра {210} (по Игумнов и др., 1977).

Fig. 6. Different S isotopic composition of pyrite in cube {100} growth zones and later pentagonal dodecahedron {210} zones (after Igumnov et al., 1977).

минералообразующего раствора, а зоны {210} обогащены тяжёлым изотопом серы (δS^{34} от +8.5 до +10 ‰), что объясняется изменением состава растворов при кристаллизации более поздних зон пирита в ассоциации с сульфидами цветных металлов и золота (Игумнов и др., 1977). Изотопный состав серы галенита и халькопирита близок таковому периферических зон пирита, что увязывается с наличием микровостков галенита, халькопирита, блёклой руды и золота в краевых зонах кристаллов пирита.

Один из кристаллов пирита в форме {100} величиной ~1 см (из друзовой полости в кварцевой жиле дайки Второпавловский на горизонте 233 м) электролитически протравлен в сечении, близком к (100) кристалла, где выявлена последовательность изменения форм роста по схеме {100} + мал. {111} → {100} → {100} + мал. {111} → {100} + мал. {210} → периферическая тонкая зона {210} (рис. 7). После травления кристалл был отполирован и исследован методом ЛА-ИСП-МС. Карты распределения ряда элементов (см. рис. 7) неоднородны вследствие некоторого отклонения плоскости среза от идеального сечения (100), что наиболее проявлено для главных элементов (Fe и S).

Распределение Co, Ni и As в пирите наиболее контрастно выявлено во внутреннем участке сечения кристалла в виде погребённой реликтовой «штриховки» по дидодекаэдру {421}, где содержания Co и Ni составляют до 150–180 г/т; в этих же участках присутствует Te (до 15 г/т). Можно предположить, что «штриховка» обусловлена чередованием тонких зон кобальтсодержащего пирита и герсдорфита NiAsS (известных в рудах месторождения). Минимальные содержания Co и Ni характерны для зон роста по кубу (менее 20 г/т). Концентрации Au и Ag в пирите низкие (0.0n г/т) и лишь в периферической зоне кристалла повышаются до 0.2 и 0.5 г/т, соответственно.

Близкие между собой картины распределения в отдельных мозаично-расположенных участках при разном их содержании (см. рис. 7) получены для Pb (до 50–200 г/т), Zn (до 70 г/т), Bi (2–3 г/т), Ag (до 0.4–0.5 г/т), а также Cu (до 14 г/т), вероятно, из-за микровключений сульфидов, в том числе по тонким трещинкам и в периферической зоне роста пирита. Низкими содержаниями в основной массе кристалла и относительным обогащением в периферической зоне характеризуются (г/т): Sn (до 5), Sb (до 3), Mo (до 1), Tl (до 0.5). Содержания Ge в пирите незначительны (до 2 г/т) и приурочены к

трещинкам и, частично, к периферической зоне пентагондодекаэдра {210}.

Литофильные (Na, K, Ca, Si, Al, Mg, P) и сидерофильные (V, Cr, Mn) элементы приурочены к периферической зоне кристалла и фиксируют минеральные микровключения и «тени» трещин. Концентрации этих элементов иногда достигают нескольких сотен, а порой и тысяч граммов на тонну. Кальций и P фиксируют включение апатита в средней части кристалла, K, Na, Mg, Al и Si (и, возможно, Mn, V и Cr) – слюды, а распределение Ti и U указывает на наличие в пирите микровключений оксидов этих элементов, что рассмотрено ниже.

Минеральные включения в кристалле пирита

После изучения методом ЛА-ИСП-МС сечение кристалла было отполировано и исследовано на электронном микроскопе РЭММА-202М, в результате чего были обнаружены редкие включения мусковита, кварца, циркона, рутила, фторапатита, монацита-(Ce), браннерита и галенита. Состав пирита относительно однороден с формулой $Fe_{0.99}S_2$.

Вростки **мусковита** величиной 1–100 мкм, иногда совместно с цирконом, кварцем, монацитом-(Ce) и рутилом (рис. 8а, б), встречаются в разных участках кристалла, но наиболее часты в периферической его зоне. Состав мусковита (мас. %): Na₂O 0.47; K₂O 10.73; MgO 0.86; Al₂O₃ 33.96; SiO₂ 47.54; TiO₂ 0.34; FeO 1.50; сумма 95.40. При расчёте на 7 катионов состав отвечает формуле $(K_{0.91}Na_{0.06})_{0.96}(Al_{1.84}Mg_{0.09}Fe_{0.08}Ti_{0.02})_{2.03}(Al_{0.83}Si_{3.17})_{4}O_{10}(OH)_2$ при $H_2O_{расч.} = 4.5$ мас. %.

Галенит PbS в виде удлинённых зёрен выявлен только в периферической зоне роста пирита (см. рис. 8з). Состав галенита (мас. %): Pb 86.34; S 13.36; сумма 99.70. Результаты анализов других минералов приведены в таблице.

Зёрна **апатита-(CaF)** до 1 мм находятся в зонах роста куба {100} (промежуточных между центральной частью и периферией кристалла пирита) и содержат мельчайшие включения циркона, рутила и кварца (см. рис. 8в), а также более крупные – мусковита. В апатите примеси не выявлены (см. табл., ан. 1).

Зёрна **монацита-(Ce)** размером 2–25 мкм встречаются в периферической зоне пирита, содержащей относительно много вростков мусковита, рутила, циркона и кварца. Монацит-(Ce) образует

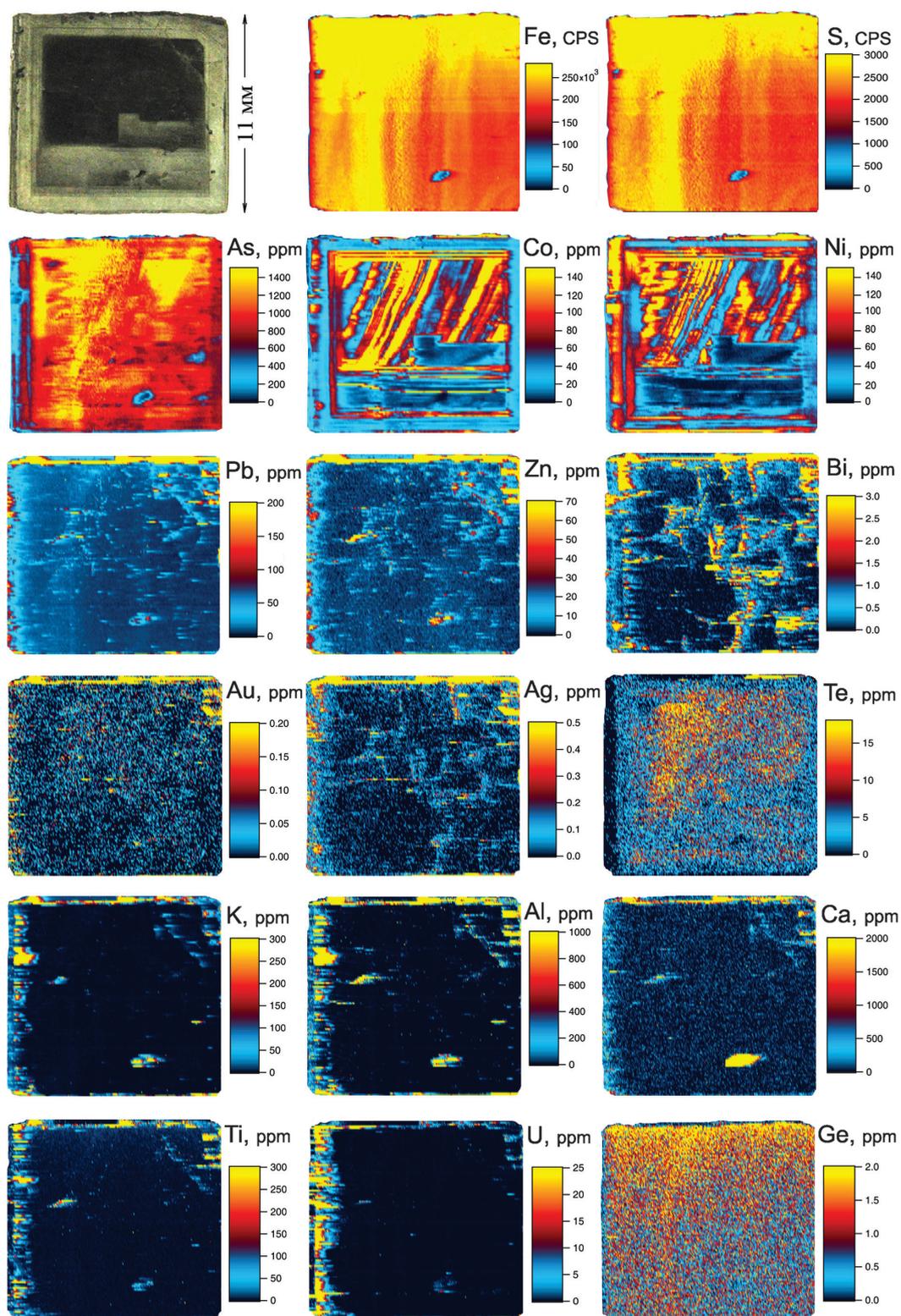


Рис. 7. Сечение (100) кристалла пирита из сульфидно-кварцевой жилы (*протравлено*) и карты распределения элементов по данным LA-ICP-MS (объяснения см. в тексте).

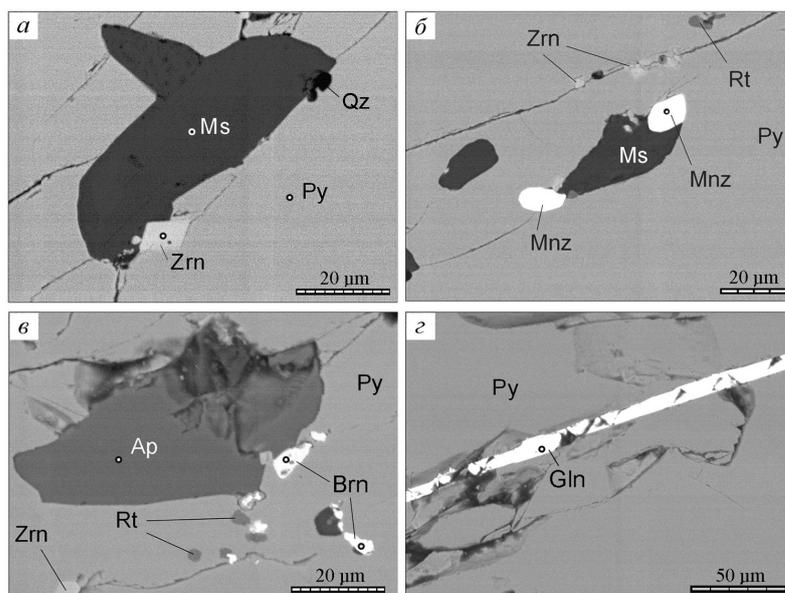
Fig. 7. Cross section (100) of pyrite crystal from sulfide-quartz vein (*etched*) and LA-ICP-MS trace element patterns (for explanations, see text).

Рис. 8. Микровключения минералов в исследованном кристалле пирита (Py).

Ms – мусковит, Qz – кварц, Zrn – циркон, Mnz – монацит-(Ce), Rt – рутил, Ap – апатит-(CaF), Brn – браннерит, Gln – галенит. Объяснения см. в тексте.

Fig. 8. Microinclusions of minerals in pyrite crystal (Py).

Ms – muscovite, Qz – quartz, Zrn – zircon, Mnz – monazite-(Ce), Rt – rutile, Ap – apatite-(CaF), Brn – brannerite, Gln – galena. For explanations, see text.



Химический состав минеральных включений в пирите (мас. %)

Таблица

Table

Chemical composition of mineral inclusions in pyrite (wt. %)

№ ан.	1	2	3	4	5
Минерал	Апатит-(CaF)	Монацит-(Ce)	Браннерит	Рутил	Циркон
SiO ₂	–	–	0.70	–	32.67
TiO ₂	–	–	39.52	97.65	–
P ₂ O ₅	43.46	29.52	0.51	–	–
CaO	54.14	0.48	0.48	–	–
FeO	–	1.50*	–	0.91	–
ZrO ₂	–	–	–	–	65.83
HfO ₂	–	–	–	–	1.00
Nb ₂ O ₅	–	–	–	1.26	–
ThO ₂	–	1.23	2.72	–	–
UO ₂	–	–	51.08	–	–
La ₂ O ₃	–	14.78	–	–	–
Ce ₂ O ₃	–	33.63	–	–	–
Pr ₂ O ₃	–	4.48	–	–	–
Nd ₂ O ₃	–	10.36	–	–	–
Sm ₂ O ₃	–	1.60	–	–	–
F	2.37	–	–	–	–
SO ₂	–	1.47*	–	–	–
Сумма	99.97	99.05	95.21	99.82	99.50
Эмпирические формулы (расчёт по катионам)					
Апатит-(CaF)	Ca _{4.73} (PO ₄) ₃ [F _{0.61} (OH) _{0.39}]				
Монацит-(Ce)	(Ce _{0.50} La _{0.22} Nd _{0.15} Pr _{0.07} Sm _{0.02} Ca _{0.02} Th _{0.01})(PO ₄)				
Браннерит	(U _{0.79} Th _{0.04} Ca _{0.04})Ti _{2.07} (Si _{0.05} P _{0.03})O ₆				
Рутил	(Ti _{0.98} Fe _{0.01} Nb _{0.01})O ₂				
Циркон	(Zr _{0.98} Hf _{0.01})(SiO ₄)				

Примечание. *) Примеси FeO и SO₂ в анализе 2 обусловлены «подложкой» пирита; прочерк – не обнаружено. СЭМ РЭММА-202М, аналитик В.А. Котляров.

Note. *) FeO and SO₂ contents in analysis 2 are derived from host pyrite. Dash – below detection limit. SEM REMMA-202M, analyst V.A. Kotlyarov.

агрегаты с мусковитом, цирконом и рутилом (см. рис. 8б). В его составе, кроме редкоземельных элементов, установлены примеси ThO_2 и CaO (см. табл., ан. 2); примеси FeO и SO_2 обусловлены влиянием «подложки» пирита.

Браннерит – оксид урана и титана – впервые обнаружен нами в рудах Берёзовского месторождения в виде зёрен до 10 мкм в пирите и на контакте с апатитом, цирконом, рутилом и мусковитом (см. рис. 8в). В анализе, кроме преобладающих UO_2 , TiO_2 и ThO_2 , содержатся малые примеси оксидов Si, P и Ca из-за микровключений других минералов (см. табл., ан. 3). В отличие от известного на Приполярном Урале браннерита из золотоносных штоков месторождения Чудное (Федюнин и др., 1998), браннерит из включений в пирите Берёзовского золоторудного месторождения более «чист» по составу.

В **рутиле** определены примеси FeO 0.91 и Nb_2O_5 1.26 мас. % (см. табл., ан. 4), а в цирконе – 1 мас. % HfO_2 (см. табл., ан. 5).

Кроме указанных включений минералов, результаты ЛА-ИСП-МС анализа указывают на присутствие в пирите включений герсдорфита NiAsS , скуттерудита CoAs_3 , халькопирита CuFeS_2 , айкинита PbCuBiS_3 , виоларита FeNi_2S_4 , миллерита NiS и/или полидимита Ni_3S_4 , теннантита $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$, станнина $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ и золота.

Заключение

Обобщение данных о морфологии, зональности строения и состава кристаллов пирита из кварцевых жил, березитов и лиственитов Берёзовского золоторудного месторождения, а также новые данные о распределении элементов методом ЛА-ИСП-МС в сечении (100) относительно крупного кристалла (11 мм) из друзовой полости в кварцевой жиле и выявленных в нём включений минералов позволяет сделать ряд выводов.

Кристаллы пирита из жил и вмещающих жилы метасоматитов характеризуются разнообразием форм роста и внешнего ограничения. При кристаллизации происходила смена форм роста $\{111\} \rightarrow \{111\} + \{100\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\}$ или по более сложным схемам: $\{100\} \rightarrow \{210\} + \{100\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\}$, $\{100\} \rightarrow \{100\} + \{111\} \rightarrow \{100\} + \{421\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{100\} + \{210\}$ и другим. Наиболее ранние формы зон роста пирита характерны для кристаллов с более глубоких горизонтов месторождения.

Формирование сульфидно-кварцевых жил месторождения происходило в неспокойной тектонической обстановке, что привело к деформации пирита и залечиванию в них полостей трещин более поздними зонами. Ранние выделения пирита в сульфидно-кварцевых жилах при раскрытии новообразованных трещин дорастали до полиэдра как в полости трещины (в жиле), так и замещая березит.

Периферические зоны $\{210\}$ кристаллов пирита обогащены тяжёлым изотопом серы (δS^{34} от +8.5 до +10 ‰) и часто содержат микровростки галенита, халькопирита, блёклой руды, золота и других минералов. Микротопохимические карты распределения элементов в сечении (100) одного из кристаллов пирита также отражают сложную историю формирования пирита. В исследованном кристалле пирита из сульфидно-кварцевой «лестничной» жилы дайки Второпавловской наряду с более обычными мусковитом, фторопатитом и галенитом впервые выявлены микровключения циркона, монацита-(Ce) и браннерита UTi_2O_6 (браннерит – вторая находка на Урале).

Авторы признательны В.А. Попову и О.Л. Буслонской за содействие в работе.

Основная литература

- Бабенко В.В.** (1978) Структурные условия и зональность оруденения Берёзовского месторождения (Урал). *Известия АН СССР, серия геол.*, (10), 114–126.
- Бетехтин А.Г., Кутюхин П.И.** (1941) Пирит / Минералогия Урала. Том 2. М.-Л., АН СССР, 324–365.
- Бородаевский Н.И., Бородаевская М.Б.** (1947) Берёзовское рудное поле. М., Металлургиздат, 264 с.
- Игумнов С.А., Перкова Р.И., Чесноков Б.В.** (1977) Зональное распределение изотопов серы в кристаллах пирита и некоторые особенности формирования сульфидной минерализации Берёзовского золоторудного месторождения на Урале. *Геохимия*, (9), 1407–1412.
- Клеймёнов Д.А., Альбрехт В.Г., Коротеев В.А., Нурмухаметов Ф.М., Сакулин Е.А., Григорьев В.В.** (2006). Берёзовское золоторудное месторождение / Знаменитые месторождения Урала. Часть 1. Екатеринбург, Изд-во «Баско», 31–56.
- Кутюхин П.И.** (1948) Условия локализации оруденения в жилах Берёзовского месторождения / 200 лет золотой промышленности Урала. Свердловск, УФАН СССР, 249–275.
- Поленов Ю.А., Огородников В.Н., Бабенко В.В.** (2013) Берёзовское золоторудное месторождение квар-

цево-жильного типа – классический объект полихронного и полигенного генезиса. *Литосфера*, (6), 39–53.

Поленов Ю.А., Огородников В.Н., Бабенко В.В. (2015) Берёзовское месторождение золота – уникальный объект полихронного и полигенного рудообразования. Екатеринбург, Уральский гос. горный ун-т, 149 с.

Попов В.А. (1970) Относительный возраст и типы березитов Берёзовского золоторудного месторождения / *Метаморфизм горных пород Урала*. Изд. Свердловск. горн. ин-та, 1, 93–95.

Попов В.А. (1984) Практическая кристалломорфология минералов. Свердловск, УНЦ АН СССР, 191 с.

Попова В.И. (1977) Методы синхронизации минералов в геолого-минералогических исследованиях. *Дисс... канд. геол.-минерал. наук*. Миасс, ИГЗ УНЦ АН СССР, 254 с.

Попова В.И. (1980) Синхронизация кристаллов пирита в жилах и березитах Берёзовского месторождения / *Минералогические исследования гидротермалитов Урала*. Свердловск, УНЦ АН СССР, 11–30.

Попова В.И. (1983) Нейтронно-активационная радиография пирита, марказита и кварца / *Минералы и парагенезисы минералов месторождений Урала*. Свердловск, УНЦ АН СССР, 50–55.

Попова В.И., Чесноков Б.В. (1971) Электролитическое травление крупных кристаллов пирита методом тампона / *Геология и полезные ископаемые Урала*. Труды Свердловск. горн. ин-та, 79, 123–125.

Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Сустанов С.Г., Григорьев В.В. (1997) Золотооруденение Екатеринбургского геологического полигона. Екатеринбург, УГГГА, 226 с.

Самарцев И.Т., Захваткин В.А., Казмирский В.Ф., Михайлова Л.В., Бирюков В.Ф. (1973) О зональности Берёзовского золоторудного месторождения на Среднем Урале. *Геология рудных месторождений*, (1), 110–117.

Сидорова Н.В., Абрамова В.Д. (2017) Золотосодержащий пирит Берёзовского месторождения (Средний Урал). *Металлогения древних и современных океанов–2017*. Миасс, ИМин УрО РАН, 135–139.

Федюнин О.В., Плетнёв П.А., Спиридонов Э.М. (1998) Браннерит UTi_2O_6 из метаморфизованных золотоносных брекчий месторождения Чудное, Приполярный Урал / *Уральская летняя минералогическая школа-98*. Екатеринбург, УГГГА, 165–167.

Чесноков Б.В. (1973) Эндогенная зональность Берёзовского рудного поля на среднем Урале. *Докл. АН СССР*, 210(4), 915–917.

Чесноков Б.В., Котыбаева Н.Н., Бушмакин А.Ф. (1975) Эндогенные минералы висмута и никеля Берёзов-

ского золоторудного месторождения на Среднем Урале / *Минералогия и петрография Урала*. Труды Свердловск. горн. ин-та, 106, 123–127.

Чесноков Б.В., Попова В.И. (1971) Кристалломорфология пирита Берёзовского золоторудного месторождения (Ср. Урал) / *Минералогия и минералогическая кристаллография* (Труды совещ. памяти Е.С. Фёдорова, 1969 г.). Изд. Свердловск. горн. ин-та, 43–47.

References

Babenko V.V. (1978) [Structural conditions and zonation of mineralization of the Berezovsky deposit (Ural)]. *Izvestiya AN SSSR, ser. geol. [Izvestiya, Academy of Sciences USSR, ser. geol.]*, (10), 114–126. (in Russian)

Betekhtin A.G., Kutukhin P.I. (1941) [Pyrite]. In: *Mineralogiya Urala [Mineralogy of the Urals]*. Moscow–Leningrad, AN SSSR, 2, 324–365. (in Russian)

Borodaevsky N.I., Borodaevskaya M.B. (1947) [Berezovsky ore field]. Moscow, Metallurgizdat, 264 p. (in Russian)

Chesnokov B.V. (1973) [Endogenic zonation of the Berezovsky ore field of the Central Urals]. *Doklady AN SSSR [Doklady Academy of Sciences USSR]*, 210(4), 915–917. (in Russian)

Chesnokov B.V., Kotybaeva N.N., Bushmakina A.F. (1975) [Endogenic Bi and Ni minerals of the Berezovsky gold deposit of the Central Urals]. In: *Mineralogiya i petrografiya Urala. Trudy Sverdlovskogo gornogo instituta [Mineralogy and Petrography of the Urals. Proceedings of the Sverdlovsk Mining Institute]*, 106, 123–127. (in Russian)

Chesnokov B.V., Popova V.I. (1971) [Morphology of pyrite crystals of the Berezovsky gold deposit (Central Urals)]. In: *Mineralogiya i mineralogicheskaya kristallografiya (Trudy confer. pamyati E.S. Fedorova, 1969) [Mineralogy and Mineralogical Crystallography. Proceedings of the Conference in E.S. Fedorov's Memory]*, 1969. Sverdlovsk Mining Institute, 43–47. (in Russian)

Fedyunin O.V., Pletnyov P.A., Spiridonov E.M. (1998) [Brannerite UTi_2O_6 from metamorphic gold-bearing breccias of the Chudnoe deposit, Subpolar Ural]. *Uralskaya letnyaya mineralogicheskaya shkola-98 [Uralian Summer Mineralogical School-98]*. Yekaterinburg, UGGA, 165–167. (in Russian)

Igumnov S.A., Perkova R.I., Chesnokov B.V. (1977) [Zonal distribution of S isotopes in pyrite crystals and some features of formation of sulfide mineralization of the Berezovsky gold deposit of the Urals]. *Geokhimiya [Geochemistry]*, (9), 1407–1412. (in Russian)

Kleimenov D.A., Al'brekht V.G., Koroteev V.A., Nurmukhametov F.M., Sakulin E.A.,

- Grigor'ev V.V.** (2006). [Berezovsky gold deposit]. In: *Znamenitye mestorozhdeniya Urala [Famous deposits of the Urals]. Part 1*. Yekaterinburg, Basko, 31–56. (in Russian)
- Kutyukhin P.I.** (1948) [Localization conditions of mineralization in veins of the Berezovsky deposit]. In: *200 let zolotoi promyshlennosti Urala [200 Years of the Uralian Gold Industry]*. Sverdlovsk, UFAN SSSR, 249–275. (in Russian)
- Polenov Yu.A., Ogorodnikov V.N., Babenko V.V.** (2013) [Berezovsky gold deposit of quartz vein type: a classical polychronous and polygenic object]. *Litosfera [Lithosphere]*, (6), 39–53. (in Russian)
- Polenov Yu.A., Ogorodnikov V.N., Babenko V.V.** (2015) [Berezovsky gold deposit: a unique object of polychronous and polygenic formation]. Yekaterinburg, UGGU, 149 p. (in Russian)
- Popov V.A.** (1984) [Practical crystal morphology of minerals]. Sverdlovsk, UNC AN SSSR, 191 p.
- Popov V.A.** (1970) [Relative age and beresite type of the Berezovsky gold deposit]. In: *Metamorphism gornykh porod Urala [Metamorphism of Mountain Rocks of the Urals]*. Sverdlovsk Mining Institute, 1, 93–95. (in Russian)
- Popova V.I.** (1977) [Methods of synchronization of minerals in geological and mineralogical studies]. *Dissertation of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences*. Miass, Ilmeny State Reserve, 254 p. (in Russian)
- Popova V.I.** (1983) [Neutron activation radiography of pyrite, marcasite, and quartz]. In: *Mineraly i mineralnye paragenesisy Urala [Minerals and Mineral Paragenesis of the Urals]*. Sverdlovsk, UNC AN SSSR, 50–55 (in Russian)
- Popova V.I.** (1980) [Synchronization of pyrite crystals in veins and beresites of the Berezovsky deposit]. In: *Mineralogicheskie issledovaniya gidrotermal'itov Urala [Mineralogical Study of Hydrothermalites of the Urals]*. Sverdlovsk, USC AS SSSR, 11–30. (in Russian)
- Popova V.I., Chesnokov B.V.** (1971) [Electrolytic etching of large pyrite crystals by means of the tampon method]. In: *Mineralogiya i poleznye iskopaemye Urala [Mineralogy and Mineral Resources of the Urals. Proceedings of the Sverdlovsk Mining Institute]*, 79, 123–125. (in Russian)
- Samartsev I.T., Zakhvatkin V.A., Kazimirsky V.F., Mikhaylova L.V., Biryukov V.F.** (1973) [Zonation of the Berezovsky gold deposit of the Central Urals]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposit]*, (1), 110–117. (in Russian)
- Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Sustavov S.G., Grigoriev V.V.** (1997) [Gold mineralization of the Yekaterinburg geological polygon]. Yekaterinburg, UGGA, 226 p. (in Russian)
- Sidorova N.V., Abramova V.D.** (2017) [Au-bearing pyrite of the Berezovsky gold deposit (Central Urals)]. *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov-2017 [Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2017]*. Miass, IMin UB RAS, 135–139. (in Russian)

Поступила в редакцию 26 марта 2018 г.