



УДК 549.322.21:553.411(571.53)

ТИПОМОРФИЗМ ПИРРОТИНА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЕРТОВО КОРЫТО

Е. А. Синкина, И. В. Кучеренко, Р. Ю. Гаврилов

Институт природных ресурсов Томского политехнического университета, Томск

Представлены результаты изучения химического состава, микротвердости и доменной структуры пирротина из центральной части рудного тела месторождения Чертово Корыто. Выявлено, что пирротинам трех генераций свойствен выдержанный химический состав (Fe 59,88–62,86 мас. %, S 36,58–39,79 мас. %). Из примесей диагностированы никель (0,00–1,44 мас. %) и медь (0,00–0,34 мас. %). Соотношение моноклинной и гексагональной модификаций в пирротинах трех генераций различно. Отмечено увеличение количества моноклинной модификации от ранней генерации к поздней, что подтверждено доменными структурами пирротина. Для раннего пирротина I характерны слабо выраженные доменные структуры, для позднего пирротина III – ярко выраженные. Микротвердость пирротинов изменяется в интервале 210,239–409,116 кгс/мм². Для раннего пирротина типично преобладание низких значений твердости, для позднего – высоких, что обусловлено различным соотношением модификаций. В результате исследования выявлено, что пирротины I, II и III генераций представлены двумя модификациями (гексагональной и моноклинной), различающимися типоморфными свойствами – химическим составом, доменной структурой и микротвердостью.

Ключевые слова: золоторудное месторождение, пирротин, гексагональный, моноклинный, микротвердость, доменные структуры.

PYRRHOTITE TYPOMORPHISM OF THE CHYORTOVO KORYTO GOLD ORE DEPOSIT

E. A. Sinkina, I. V. Kucherenko, R. Yu. Gavrilo

Institute of Natural Resources of the Tomsk Polytechnic University, Tomsk

The paper presents the results of analysing chemical composition, microhardness, and domain structure of pyrrhotite produced from the central part of the Chyortovo Koryto deposit ore body. It was established that the pyrrhotites of three generations are characterised by stable chemical composition (Fe 59.88...62.86% wt., S 36.58...39.79% wt.). Nickel (0.00...1.44% wt.) and copper (0.00...0.34% wt.) were identified as inclusions. The correlations of monoclin and hexagonal modifications in the pyrrhotites of three generations vary. The amount of monoclin modification increases from the early to the late generation, which is proved by the domain structures of pyrrhotite. The early-generation pyrrhotite I is characterised by feeble domain structures, and the late-generation pyrrhotite III by strongly marked ones. The microhardness of pyrrhotites varies within 210.239...409.116 kgf/mm². The early-generation pyrrhotite is marked by prevailing low hardness, the late-generation one by high hardness, which is due to different correlation of modifications. The study indicated that pyrrhotites I, II, and III are represented by two modifications—hexagonal and monoclin – that vary in typomorphic properties: their chemical composition, domain structure, and microhardness.

Keywords: gold ore deposit, pyrrhotite, hexagonal, monoclin, microhardness, domain structures.

DOI 10.20403/2078-0575-2017-1-58-65

Известно, что условия образования месторождений различных генетических типов отражены в вещественном составе руд. Поэтому изучение «вещества» является неотъемлемой частью реконструкции режимов рудообразования. Изменение этих режимов отражается в типоморфных свойствах «сквозных» минералов, таких как кварц, карбонаты, хлориты, пирит и др. На важное значение типоморфизма впервые обратил внимание А. Е. Ферсман в 1931 г. [15]. Впоследствии типоморфизм минералов, слагающих руды, использовался как критерий условий образования, оценки вероятной рудоносности и уровня эрозионного среза жил и месторождений. Например, при изучении кристалломорфологии, термоЭДС и химического состава пиритов золоторудных месторождений установлено, что пиритам богатых руд свойственно развитие комбинаций простых форм,

наличие электронного типа проводимости и повышенные содержания кобальта и никеля [9].

Изучение пирротина представляет интерес в связи с тем, что изменение его состава обусловлено переменными физико-химическими условиями минерагенеза, определяющими также различные структурные особенности, механические и магнитные свойства минерала. Согласно работам [3, 16], в основе структуры пирротина лежит гексагональная ячейка типа NiAs, которая слегка увеличена, что обуславливает наличие различных структурных модификаций пирротина. Наиболее распространены в природе троилит, гексагональный и моноклинный пирротины. Троилит является антиферромагнетиком, гексагональный пирротин обладает слабыми парамагнитными свойствами, моноклинный пирротин ферромагнитен [3, 16].



Известны работы, в которых описаны составы, физические свойства и структуры пирротинов медно-никелевых, колчеданных руд [14 и др.] и золотых месторождений. В золоторудных месторождениях пирротин – один из «сквозных» минералов. Обычно он ассоциирует с пиритом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом, арсенопиритом, хлоритами, карбонатами (кальцитом, анкеритом), кварцем и образует одну, две или три генерации. Например, в месторождениях Мурунтау (Узбекистан), Кумтор (Киргизия), Сухой Лог (Россия) диагностированы две генерации, а в месторождениях Благодатное (Россия), Олимпиадинское (Россия) он представлен тремя генерациями, а его количество позволяет отнести его к главным рудным минералам [10, 12]. В ходе изучения пирротиновой минерализации месторождения Панимба (Енисейский край) установлено, что в пирротинах золото входит в кристаллическую решетку минерала, а пирротины месторождения Благодатное (Енисейский край) примесных атомов золота в структуре не имеют [8]. При изучении золотых месторождений Енисейского края (Благодатное, Ведугинское, Панимба, Герфед) выявлено, что состав пирротина, а именно отношение S/Fe, можно использовать в качестве типоморфного признака богатых и бедных золотоносных руд [7]. При изучении пирротина из золоторудных месторождений Сибири методом магнитной порошковой графии установлено, что в рудных зонах преобладает магнитный пирротин моноклинной модификации, а за их пределами среди гидротермально измененных сланцев – гексагональный пирротин [11].

В статье приведены результаты изучения типоморфных свойств пирротина (химического состава, микротвердости и доменной структуры) золоторудного месторождения Чертово Кoryто (Патомское нагорье) и приведена интерпретация полученных результатов с точки зрения условий минералообразования.

Геология месторождения

Чертово Кoryто относится к золоторудным месторождениям, образованным в черных сланцах. Оно расположено на севере Патомского нагорья в бассейне р. Бол. Патом. Рудная залежь находится в раннепротерозойской толще углеродистых терригенных сланцев михайловской свиты и сложена метасоматитами березит-пропилитовой формации с жильно-прожилково-вкрапленной сульфидно-кварцевой минерализацией. В кварцевых жилах и прожилках сульфиды встречаются редко. Среди них преобладают пирит, арсенопирит, пирротин, в качестве незначительной примеси отмечены галенит, сфалерит, халькопирит. Свободное золото доминирует в кварце. Подробно геологическое строение описано в [1].

Методика исследования

Химический состав пирротина изучен рентгеноспектральным анализом на микрозонде JXA-

8100, Camebax-Micro в Институте геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск, аналитик В. Н. Королюк) и на рентгенофлуоресцентном анализаторе Nariba XGT-7200 в НИ ТПУ (Томск, аналитик М. А. Рудмин). Определение выполнено в шлифах (300 точечных определений). Микротвердость изучалась на приборе PMT-3M с фотоэлектрическим микрометром и электронно-вычислительным устройством. Условия замеров были одинаковы для всех проб: нагрузка 50 г, время экспозиции 15 с. Всего выполнен 271 замер. Доменные структуры изучались с использованием метода порошковых фигур Акулова – Биттера. На полированную поверхность шлифа наносилась капля специально приготовленной магнитной коллоидной суспензии. Затем капля раздавливалась тонким покровным стеклом и производилось наблюдение распределения суспензии на пирротине. Наиболее подробно методика описана в [2]. Всего изучено 50 полированных шлифов с вкрапленным, прожилковым и крупнозернистым пирротинотом из кварцевых жил, соответствующим различным минеральным комплексам. Сечения зерен пирротина имели случайный характер, что позволило не связывать со структурой магнитных полей различия в покрытии зерен эмульсией. Предварительно каждый шлиф дополнительно полировался для снятия магнитной восприимчивости пирротина, возникающей при его поверхностном окислении.

Результаты исследований

Руды месторождения сложены пятью минеральными комплексами, выделенными в ходе детального текстурно-структурного анализа руд с учетом диагностики генераций минералов на основе их химических составов, типоморфных свойств, номенклатуры и содержаний примесей, термодинамических режимов образования ранних и поздних зарождений кварцев (рис. 1) [1].

Пирротин входит в состав первого, второго и четвертого минеральных комплексов. Типоморфные свойства изучены у пирротинотомов всех генераций.

Пирротин I входит в состав первого минерального комплекса. Ассоциирует с кварцем I, хлоритом I, рутилом, апатитом, пиритом I, халькопиритом I, анкеритом I и кальцитом I. Сульфид образует «штрихи» параллельно сланцеватости углеродистых сланцев (рис. 2, а). Имеет кристаллически-зернистое внутреннее строение. Размер «штрихов» изменяется в интервале 0,1–5 мм. Как правило, имеет следы полировки в виде ямок.

Пирротин II входит в состав второго (кварц-пирит-арсенопирит-пирротинотомов с золотом) минерального комплекса. Ассоциирует с кварцем II, хлоритом II, пиритом II, арсенопиритом I, халькопиритом II, сфалеритом I, золотом I, анкеритом II и кальцитом II. Образует плотные зернистые скопления в маломощных кварц-карбонатных прожилках (см. рис. 2, б).



Минералы	Минеральные комплексы руд				
	Кварц-рутил-апатит-пирит-пирротиновый	Кварц-пирит-арсенопирит-пирротиновый с золотом	Кварц-пирит-арсенопиритовый с золотом	Кварц-полиметаллический с золотом	Кварц-карбонатный
Кварц	I	II	IIIa,б	IV	V
Хлорит	I	II	III		
Серицит					
Альбит					
Эпидот					
Анкерит	I	II	III	IV	
Кальцит	I	II	III	IV	V
Ильменит					
Рутил, лейкоксен					
Апатит					
Пирит	I	II	III	IV	
Арсенопирит		I	II		
Пирротин	I	II		III	
Халькопирит		II		III	
Сфалерит		I		II	
Галенит				III	
Золото		I	II		
Ульманит					
Кобальтин					
Теллуrowисмутит					
Самородный свинец					
Вильяманит					
Тектонические подвижки, интенсивность их проявления	Вкрапленная, прожилковая, гнездовая, брекчиевая				
Текстуры					
Структуры	Липидогранобластовая, гранобластовая, кристаллическая, зернистая, замещения, колломорфная				
Условия образования					
Температура, °C	420—380	420—350	390—200	210—110	130—80
Давление, МПа	300—250	230—150	200—140	150—60	50—40
Соленость, мас. % экв. NaCl	8—6	15—8	21—10	16,5—8	9—4,5
Состав растворов	H ₂ O+NaCl	H ₂ O+NaCl+CO ₂	H ₂ O+NaCl+MgCl ₂ +CO ₂ +CH ₄	H ₂ O+NaCl+MgCl ₂ +CO ₂ +CH ₄ +N ₂	H ₂ O+NaCl

Рис. 1. Схема последовательности минералообразования в месторождении Чертово Кoryто

Пирротин III входит в состав четвертого (кварц-полиметаллического с золотом) минерального комплекса. Ассоциирует с кварцем IV, пиритом IV, халькопиритом III, сфалеритом II, галенитом, золотом III, анкеритом IV, кальцитом IV. Встречается в виде гнездовых обособлений различного размера в относительно мощных (до нескольких метров) кварц-карбонатных жилах (см. рис. 2, в).

Химический состав пирротинов определяется вариациями содержаний железа (59,88–62,86 мас. %) и серы (36,58–39,79 мас. %). Из примесей отмечены никель и медь. Элементный

состав последовательных генераций пирротинов представлен в табл. 1. В раннем пирротине концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах: Fe 60,2–61,87 мас. %, S 37,11–39,52 мас. %. В составе минерала отмечено присутствие никеля (0,0–0,6 мас. %). В семи пробах диагностирована медь (0,11–0,34 мас. %). В пирротине II содержание железа изменяется в интервале 59,88–62,86 мас. %, серы – 36,58–39,79 мас. %, также наблюдается никель (с средним 0,292 мас. %). В двух пробах выявлена медь (0,16 мас. %). Пирротин III из

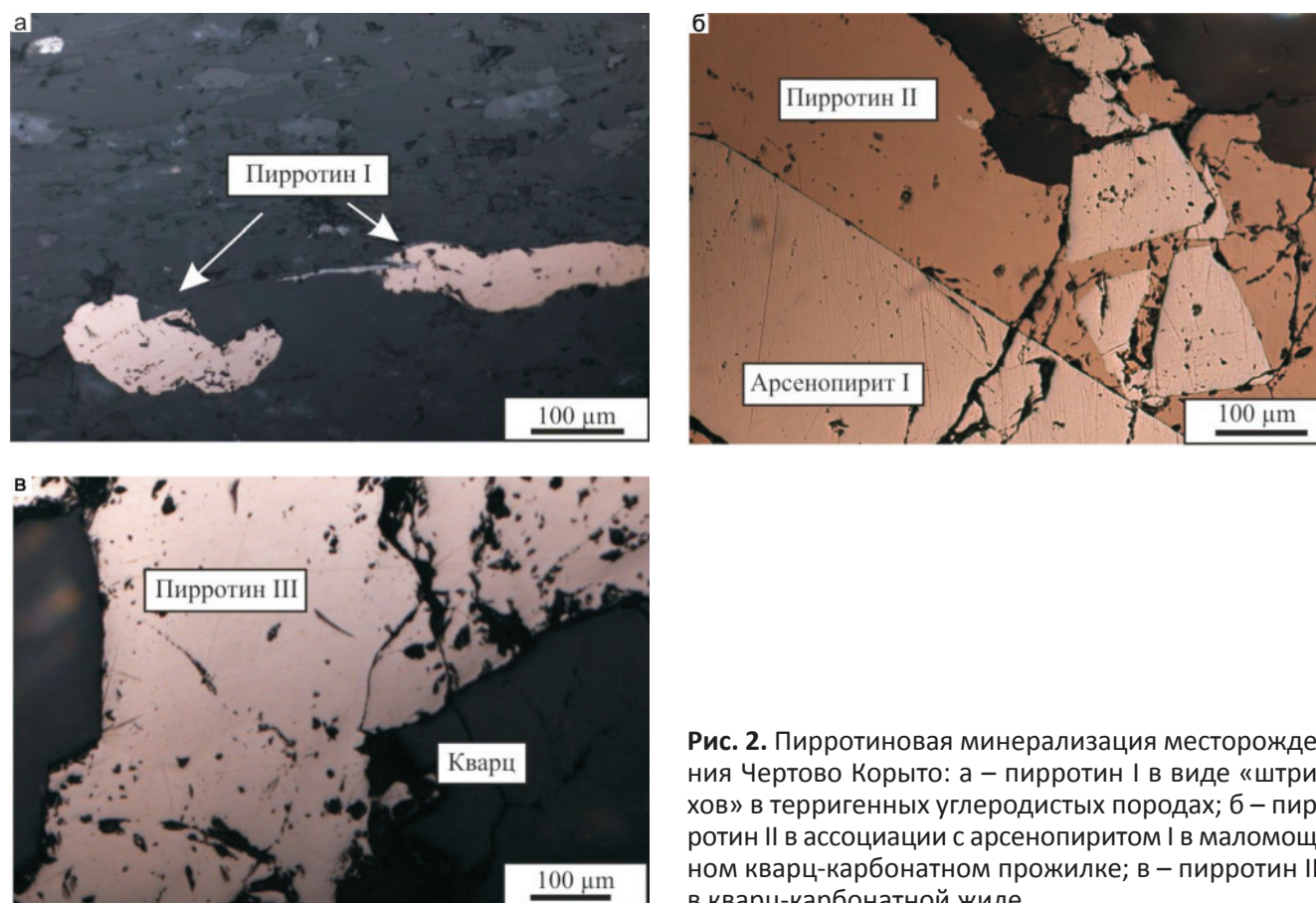


Рис. 2. Пирротиновая минерализация месторождения Чертово Корыто: а – пирротин I в виде «штрихов» в терригенных углеродистых породах; б – пирротин II в ассоциации с арсенопиритом I в маломощном кварц-карбонатном прожилке; в – пирротин III в кварц-карбонатной жиле

Таблица 1

Химический состав последовательных генераций пирротитов

Генерация пирротитина (кол-во определений)	Fe	S	Ni	Cu	Fe	Fe (моноклинный)	Fe (гексагональный)
	мас. %				ат. %		
I (165)	<u>60,2–61,87</u> 60,972	<u>37,11–39,52</u> 38,6	<u>0,00–0,6</u> 0,230	0,11–0,34 (7 проб)	<u>46,48–48,29</u> 47,349	<u>46,48–47,1</u> 46,79 (33 %)	<u>47,11–48,29</u> 47,62 (67 %)
II (89)	<u>59,88–62,86</u> 60,961	<u>36,58–39,79</u> 38,337	<u>0,07–1,44</u> 0,292	0,16 (2 пробы)	<u>46,49–48,27</u> 47,206	<u>46,49–47,1</u> 46,77 (56 %)	<u>47,12–48,27</u> 47,55 (44 %)
III (46)	<u>60,12–61,7</u> 61,288	<u>37,63–39,62</u> 38,346	<u>0,0–0,29</u> 0,13	0,07–0,23 (4 пробы)	<u>46,45–48,02</u> 47,31	<u>46,45–47,0</u> 46,75 (76 %)	<u>47,03–48,02</u> 47,532 (24 %)

Примечание. В числителе – интервал значений, в знаменателе – среднее. В последних двух столбцах в скобках указана частота встречаемости пирротитов.

полиметаллической стадии имеет нестехиометрический состав: Fe 60,12–61,7 мас. %, S 37,63–39,62 мас. %. Из примесей диагностирован никель (0,0–0,29 мас. %), в четырех пробах – медь (0,07–0,23 мас. %).

При изучении доменных структур выявлено, что для пирротитина I характерно неравномерное осаждение порошка, образующего разнообразные узоры. В целом пирротитин I покрывается суспензией слабо и осаждение происходит медленно. При этом в областях, которые все же покрываются магнитной суспензией, порошок осаждается в направлении сланцеватости вмещающих пород (рис. 3, а). Для пирротитина II характерны уже ярко выраженные доменные структуры, имеющие различное направ-

ление и рисунок (см. рис. 3, б). Рисунок получаемых порошковых фигур (зигзагообразные, волнообразные, веретенообразные) зависит от сечения минерала. В пирротитине II встречаются области, не покрытые магнитной суспензией (см. рис. 3, б), что соответствует гексагональной (немагнитной) модификации пирротитина. Для пирротитина III типично равномерное осаждение порошка по всей поверхности. В зернах почти не остается «пустых» участков (см. рис. 3, в). Осаждение порошка происходит быстро.

Изучение микротвердости показало, что в целом пирротитины характеризуются значительным разбросом микротвердости – от 210,239 до 409,116 кгс/мм² (табл. 2).

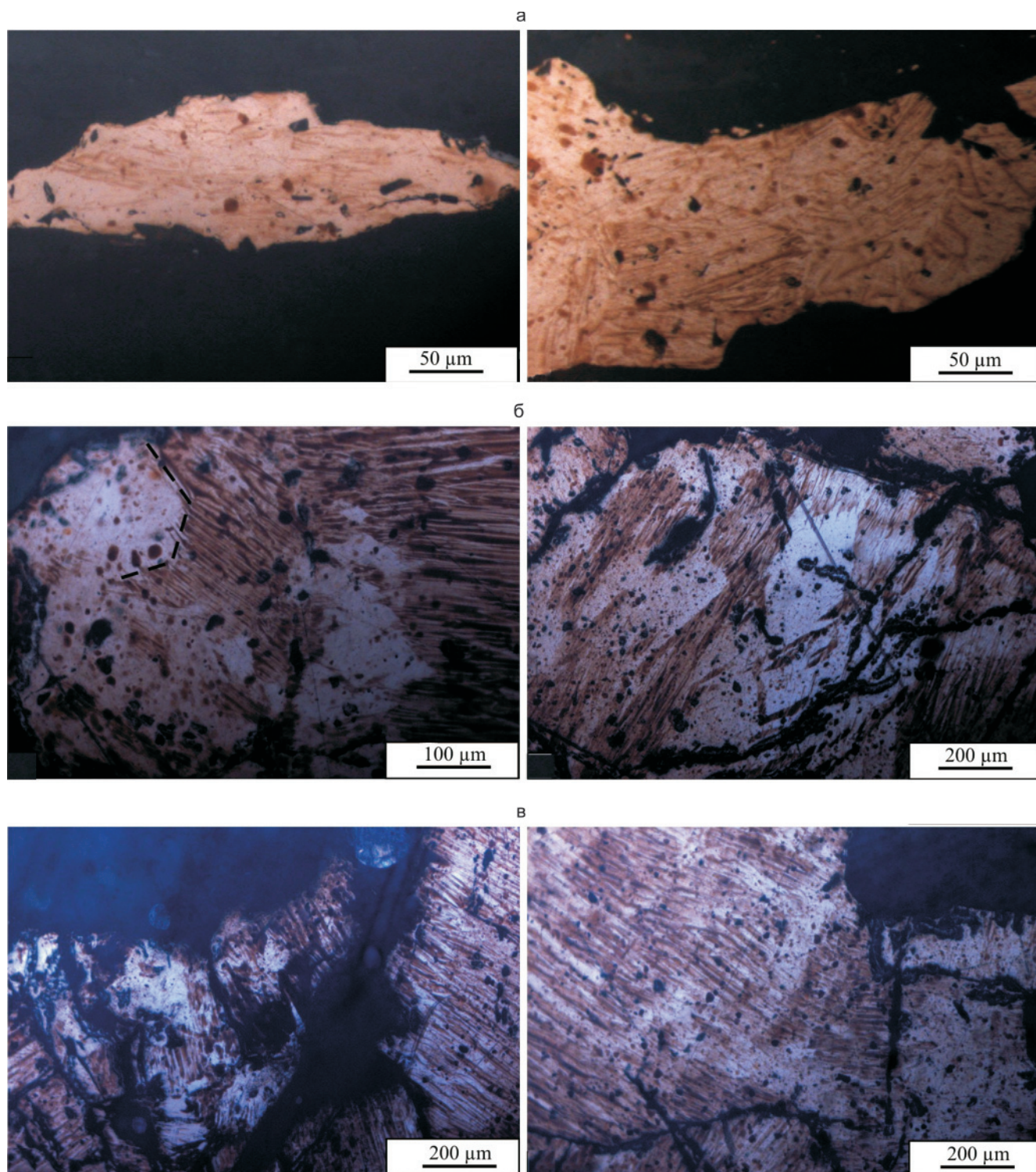


Рис. 3. Доменные структуры пирротинов месторождения Чертово Кoryто: а – слабые порошковые фигуры пирротина I; б – ярко выраженная доменная структура пирротина II (светлые участки соответствуют гексагональной немагнитной модификации); в – ярко выраженная равномерная тонкопластинчатая доменная структура пирротина III

Обсуждение результатов

Как видно из полученных результатов, для пирротинов характерен ограниченный набор элементов примесей, в основном никель и медь. Другим месторождениям золота, например Олимпиадинскому и Благодатному, также свойственно присутствие никеля, меди и отчасти кобальта примерно в тех же соотношениях. Небольшой набор примесей в пир-

ротине, возможно, связан со спецификой функционирующих в системе растворов, не богатых Co, Ni, Cu и другими элементами. Это подтверждается отсутствием собственных минералов кобальта, никеля, а кроме того, отражено в химическом составе более раннего (в сравнении пирротинном) пирита I, II и III генераций, для которых типично также присутствие примеси Co, Ni и Cu в небольших количествах.

Таблица 2

Значение микротвердости (*H*) пирротинов месторождения Чертово Кoryто

Генерация пирротина (кол-во проб)	<i>H</i> , кгс/мм ²	Кол-во определений <i>H</i> , %, характерных для пирротина	
		моноклинного	гексагонального
I (100)	<u>213,579–364,754</u> 278,548	25	75
II (91)	<u>210,239–409,116</u> 293,572	27	73
III (80)	<u>250,288–380,163</u> 359,745	68	32

Примечание: В числителе – интервал значений, в знаменателе – среднее.

Химический состав природных пирротинов по содержанию железа следующий (ат. %): моноклинные пирротины 46,5–46,9, гексагональные 47,0–48,3, троилит 49,8–50,2. Многие исследователи отмечают, что в рудах гидротермальных месторождений развиты гексагональный и моноклинный пирротины при существенном преобладании последнего [2, 6, 11]. Химический состав пирротинов месторождения Чертово Кoryто соответствует моноклинной и гексагональной модификациям, причем их соотношение меняется от ранней генерации пирротина к поздней (см. табл. 1). В раннем пирротине соотношение моноклинной и гексагональной модификаций равно 33 и 67 %, в пирротине II – 56 и 44 %, в пирротине III – 76 и 24 % соответственно. Иными словами, в продуктивном минеральном комплексе преобладает пирротин моноклинной модификации, обладающий магнитными свойствами. Подобная зависимость отмечена на Дарасунском и Олимпиадинском золоторудных месторождениях, а также на Тетюхинском и Приморском полиметаллических [2, 6].

Преобладание моноклинного пирротина в продуктивных минеральных комплексах подтверждается изученными доменными структурами.

Как известно [4, 5, 13], микротвердость пирротинов колеблется в широких пределах – от 210 до 410 кгс/мм². У гексагонального пирротина она меняется в интервале (кгс/мм²) 210–320, у моноклинного – 320–390, у троилита – 192–305. Параметр твердости может уменьшаться, если в пирротине присутствуют изоморфные примеси меди, никеля, кобальта и других элементов. Кроме того, для всех модификаций пирротина характерна анизотропия микротвердости. Более низкие ее значения фиксируются в направлении, параллельном плоскости 0001, более высокие – в направлении, ему перпендикулярном. Из полученных результатов видно (см. табл. 2), что пирротин I генерации представлен преимущественно гексагональной модификацией (75 %). У пирротина II большее число определений попадает в область значений, типичных для гексагонального пирротина, хотя по

результатам химического анализа и доменным структурам должен преобладать моноклинный. Пирротину II свойственно повышенное содержание никеля (до 1,44 мас. %) в сравнении с ранним и поздним пирротинном (до 0,6 и 0,29 мас. % соответственно). Предполагается, что изоморфное вхождение Ni снижает твердость сульфида из-за ослабления связей в структуре минерала за счет более высокой электропроницаемости никеля сравнительно с железом [10]. Уменьшение твердости за счет изоморфных примесей никеля, кобальта и меди отмечено многими исследователями при изучении пиритов золоторудных месторождений. Для пирротина III характерно преобладание моноклинной модификации (68 %).

Наличие моноклинной и гексагональной модификаций пирротина в минеральных комплексах руд и их различное количественное соотношение отражается и в температурных режимах образования комплексов (см. рис. 1). По результатам изучения газовой-жидких включений установлено, что ранний комплекс формируется при температурах 420–380 °C и в нем преобладает гексагональный пирротин, являющийся более высокотемпературным в сравнении с моноклинным. По данным работы [2], при температурах выше 325 °C пирротин обладает гексагональной структурой. Четвертый минеральный комплекс образуется в интервале 210–110 °C и в нем преобладает моноклинный пирротин, формирующийся при низких температурах.

Выводы

В ходе проведенных исследований установлено, что пирротины месторождения Чертово Кoryто представлены гексагональной и моноклинной структурными модификациями, различающимися типоморфизмом (химическим составом, доменными структурами, микротвердостью). В пирротинах трех генераций в сростаниях сосуществуют две модификации в различных соотношениях. Количество моноклинной модификации увеличивается от ранней генерации к поздней. В продуктивном минеральном комплексе преобладает моноклинный пирротин, что может быть использовано как критерий выявления этих комплексов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-35-00041\16).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагина (Синкина) Е. А. Минеральные комплексы руд и генезис золоторудного месторождения Чертово Кoryто (Патомское нагорье) // Изв. ТПУ. – 2012. – Т. 321, № 1. – С. 63–69.
2. Генкин А. Д., Логинов В. П., Органова Н. И. О взаимоотношениях и особенностях размещения гексагональных и моноклинных пирротин в рудах // Геология рудных месторождений. – 1965. – № 3. – С. 3–24.



3. **Елисеев Э. Н.** Исследование химического состава природных пирротитов // Вестн. ЛГУ. – 1958. – Вып. 6. – С. 5–16.

4. **Зленко Б. Ф.** Детальное исследование моносulfидов железа ряда троилит-пирротин на примере руд Вавилонского месторождения Алтая // Экспериментально-методические исследования рудных минералов. – М.: Наука, 1965. – С. 141–161.

5. **Касьянов А. В., Бочек Д. И., Розова Е. В.** Исследование некоторых физических свойств устойчивых минеральных фаз в системе FeS – Fe₇S₈ с целью их диагностики // Тр. ЦНИГРИ. – 1970. – Вып. 93. – С. 86–103.

6. **Некрасова Н. А.** Вариации состава пирротина в минерализованной зоне Олимпиаднинского золоторудного месторождения // Тр. XVIII Междунар. науч. симп. им. акад. М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск, 2014. – С. 224–225.

7. **Онуфриенко В. В.** Сравнительный анализ распределения примесных атомов в структуре пирротина золотосодержащих руд // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 3. – С. 51–57.

8. **Петромагнитная** и минералогическая неоднородность и золотоносность рудной зоны месторождения Благодатное / Ю. В. Колмаков, А. М. Сазонов, А. Ю. Пинсон и др. // Изв. ТПУ. – 2006. – Т. 309, № 2. – С. 46–53.

9. **Пириты** золоторудных месторождений (свойства, зональность, практическое применение) / А. Ф. Коробейников, В. А. Нарсеев, А. Я. Пшенничкин, П. С. Ревякин. – М.: ЦНИГРИ, 1993. – 213 с.

10. **Пирротиты** золотосодержащих руд: состав, точечные дефекты, магнитные свойства, распределение золота / А. М. Сазонов, В. В. Онуфриенко, Ю. В. Колмаков, Н. А. Некрасова // Журн. СФУ. Техника и технологии. – 2014. – № 6. – С. 717–737.

11. **Пыцкая Е. А.** Критерии выявления продуктивных минеральных ассоциаций на примере изучения типоморфизма пирротина и кварца // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. – 1986. – № 12. – С. 103–105.

12. **Рафаилович М. С., Мизерная М. А., Дьяков Б. А.** Крупные месторождения золота в черносланцевых толщах: условия формирования, признаки сходства. – Алматы, 2011. – 272 с.

13. **Справочник-определитель** рудных минералов в отраженном свете / Т. Н. Чвилева, М. С. Безсмертная, Э. М. Спиридонов и др. – М.: Недра, 1988. – 505 с.

14. **Твалчрелидзе А. Г., Чичинадзе М. К.** Типоморфизм пирротина стратиформных и жильных медно-пирротитовых руд // Докл. АН СССР. – 1984. – Т. 278, № 3. – С. 726–729.

15. **Ферсман А. Е.** Избранные труды Т. 2. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 768 с.

16. **Caprenter R. H., Desborough G. A.** Range in solid solution and structure of naturally occurring

troilite and pyrrhotite // Amer. Mineralogist. – 1964 – Vol. 49. – P. 1350–1364.

REFERENCES

1. Vagina E.A. (Sinkina E.A.) [Mineral ore complexes and genesis of the Chyortovo Koryto gold ore deposit (Patom highland)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 63–69. (In Russ.).

2. Genkin A.D., Loginov V.P., Organova N.I. [Relationship and location features of hexagonal and monoclinal pyrrhotites in ores]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of Ore Deposits*, 1965, no. 3, pp. 3–24. (In Russ.).

3. Eliseev E.N. [Research into the chemical composition of natural pyrrhotites]. *Vestnik LGU – LSU Bulletin*, 1958, no. 6, pp. 5–16. (In Russ.).

4. Zlenko B.F. [Detailed research into ferrum monosulphides of the troilite-pyrrhotite range on the example of ores of the Vavilonskoe deposit, Altai]. *Ekspperimental'no-metodicheskie issledovaniya rudnykh mineralov* [Experimental and methodological studies of ore minerals]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 161 p. (In Russ.).

5. Kasyanov A.V., Bochek D.I., Rozova E.V. [Research into certain physical features of stable mineral phases of FeS – Fe₇S₈ with the aim of their detection]. *Trudy TsNIGRI – TsNIGRI Proceedings*, 1970, issue 93, pp. 86–103. (In Russ.).

6. Nekrasova N.A. [Pyrrhotite composition varieties in the mineralisation zone of the Olimpiadninskoe gold ore deposit]. *Trudy XVIII Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova «Problemy geologii i osvoeniya nedr»* [Proceedings of the 18th International Scientific Symposium named after M.A. Usov "Issues of Geology and Subsoil Use"]. Tomsk, 2014, pp. 224–225. (In Russ.).

7. Onufrienok V.V. [Comparative analysis of distribution of impurity atoms in structure pyrrhotite gold ore containing]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern High Technologies*, 2013, no. 3, pp. 51–57. (In Russ.).

8. Kolmakov Yu.V., Sazonov A.M., Pinson A.Yu., et al. [Petromagnetic and mineralogical inhomogeneity and zonation of the Blagodatnoye deposit ore zone]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 2, pp. 46–53. (In Russ.).

9. Korobeynikov A.F., Narseev V.A., Pshenichkin A.Ya., Revyakin P.S. *Pirity zolotorudnykh mestorozhdeniy (svoystva, zonal'nost', prakticheskoe primeneniye)* [Pyrites of gold ore deposits (features, zonation, practical usage)]. Moscow, TsNIGRI Publ., 1993. 213 p. (In Russ.).

10. Sazonov A.M., Onufrienok V.V., Kolmakov Yu.V., Nekrasova N.A. [Pyrrhotite of gold-bearing ores: composition, point defects, magnetic properties, gold distribution]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii – Journal of Siberian Federal*



University. *Engineering and Technologies*, 2014, no. 6, pp. 717–737. (In Russ.).

11. Pytskaya E.A. [Criteria to identify producing mineral associations on the example of researching into typomorphism of pyrrhotite and quartz]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka – Proceedings of Higher Schools. Geology and Exploration*, 1986, no. 12, pp. 103–105. (In Russ.).

12. Rafailovich M.S., Mizernaya M.A., Dyachkov B.A. *Krupnye mestorozhdeniya zolota v chernoslantsevykh tolshchakh: usloviya formirovaniya, priznaki skhodstva* [Large gold deposits in black shale strata: formation conditions and similarity attributes]. Almaty, 2011. 272 p. (In Russ.).

13. Chvileva T.N., Bezsmertnaya M.S., Spiridonov E.M., et al. *Spravochnik-opredelitel' rudnykh*

mineralov v otrazhennom svete [A book of reference on defining ore minerals in reflected light]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 505 p. (In Russ.).

14. Tvalchrelidze A.G., Chichinadze M.K. [Typomorphism of pyrrhotite in stratiform and vein copper-pyrrhotite ores]. *Doklady akademii nauk SSSR – Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1984, vol. 278, no. 3, pp. 726–729. (In Russ.).

15. Fersman A.E. *Izbrannye trudy T. 2* [Collected papers. Vol. 2]. Moscow, Akademizdat publ., 1953. 768 p. (In Russ.).

16. Caprenter R.H., Desborough G.A. Range in solid solution and structure of naturally occurring troilite and pyrrhotite. *Amer. Mineralogist*, 1964, vol. 49, pp. 1350–1364.

© Е. А. Синкина, И. В. Кучеренко, Р. Ю. Гаврилов, 2017