



ОБЪЁМНАЯ МОДЕЛЬ ПИРРОТИНОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЁРТОВО КОРЫТО, ПАТОМСКОЕ НАГОРЬЕ

Приведены результаты изучения пирротиновой минерализации месторождения Чёртово Корыто. Проанализированы химический состав пирротинов, их рентгеноструктурные характеристики. Доказано, что сульфид представлен тремя генерациями, состоящими из гексагональной (Fe_8S_9 , Fe_9S_{10}) и моноклинной (Fe_7S_8) структурных модификаций. Показано распределение пирротинов различных генераций в объёме рудной залежи и показателя магнитной восприимчивости, обусловленного присутствием ферримагнитного пирротина. Установлена устойчивая пространственная связь между распределением золота и показателем магнитной восприимчивости.

Ключевые слова: золоторудное месторождение, пирротин, структурные модификации, магнитная восприимчивость.

В настоящее время имеются факты, доказывающие, что золотое оруденение многих мезотермальных месторождений локализуется в породах, обладающих повышенными значениями магнитного поля [2, 5, 7, 10, 12, 15, 22, 23]. К таким объектам относится месторождение Чёртово Корыто. По данным Ю.В.Колмакова с соавторами [6], оно характеризуется интенсивно проявленным магнитным полем. Возникновение магнитного поля обусловлено наличием большого количества пирротина в метасоматическом ореоле. Установлено, что в распределении пирротина и золота наблюдается отчётливая взаимосвязь: интервалы с промышленным содержанием золота полностью локализируются в пределах ореола пирротинизации, но обособляются от участков с максимальными концентрациями сульфида [3, 14].

О связи пирротиновой минерализации с золотом свидетельствует статья М.А.Сазонова с соавторами (2014 г.), посвящённая изучению золотых месторождений, расположенных на Енисейском кряже (Благодатное, Олимпиада, Ведугинское, Панимба, Герфед). Выяснено, что состав пирротина, а именно отношение S/Fe, можно рассматривать как типоморфный признак богатых и бедных золотоносных руд [11]. Таким образом, в некоторых случаях пирротин может служить поисковым критерием для выделения промышленных интервалов в рудных залежах, промышленных рудных тел, продуктивных минеральных комплексов и др.

Статья представляет собой результат комплексного исследования, направленного на изучение особенностей распределения пирротиновой минерализации в объёме рудной залежи месторождения Чёртово Корыто, химического состава и рентгеноструктурных характеристик пирротина, магнитной восприимчивости пород методом каппаметрии и сопоставление получен-

Синкина Екатерина Андреевна

кандидат геолого-минералогических наук
доцент
vea1986@mail.ru

Гаврилов Роман Юрьевич

кандидат геолого-минералогических наук
доцент
GavrilovRY@ignd.tpu.ru

Институт природных ресурсов
Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
г. Томск

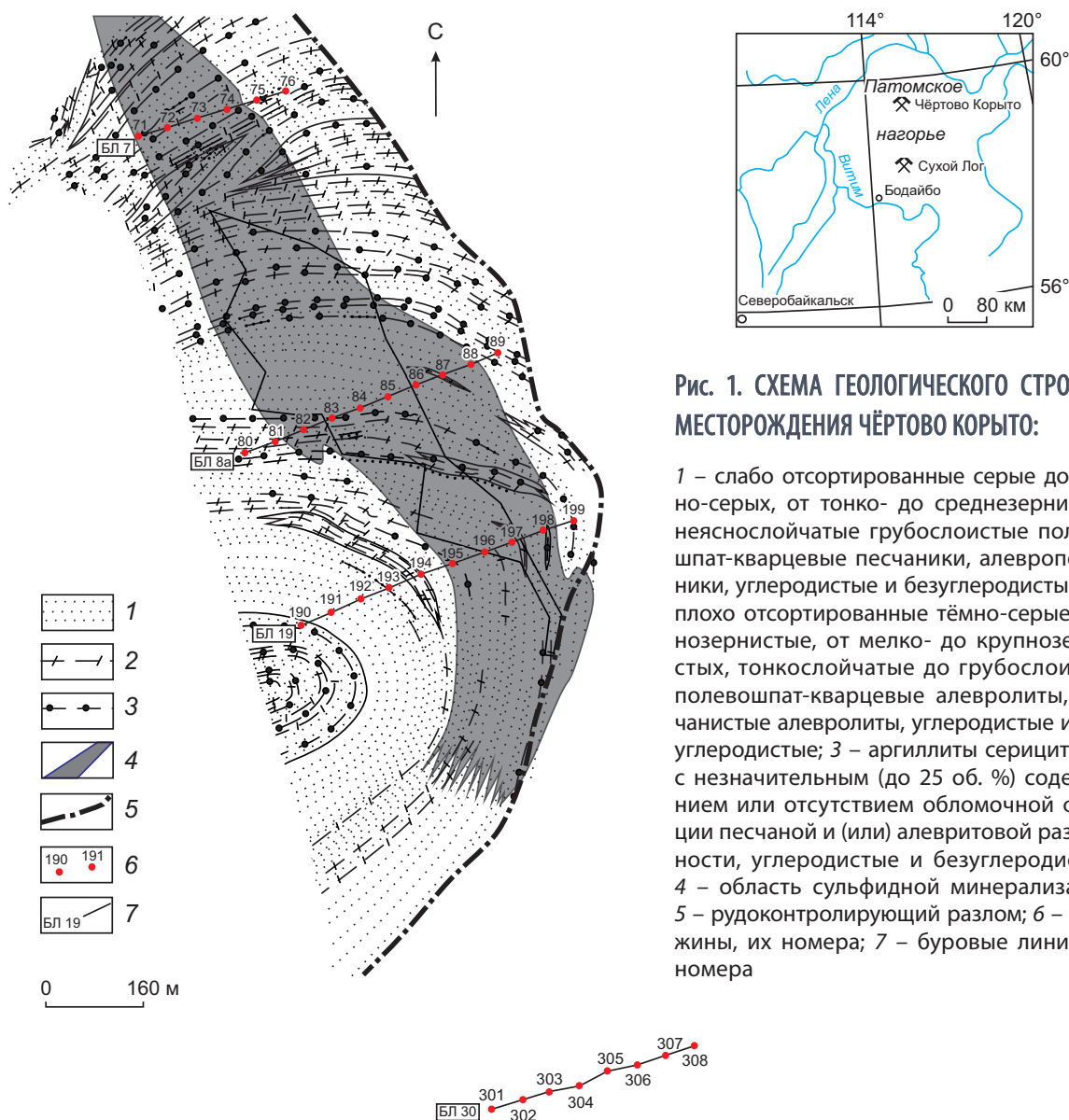


Рис. 1. СХЕМА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЁРТОВО КОРЫТО:

1 – слабо отсортированные серые до тёмно-серых, от тонко- до среднезернистых, неяснослойчатые грубослойчатые полевошпат-кварцевые песчаники, алевропесчаники, углеродистые и безуглеродистые; 2 – плохо отсортированные тёмно-серые разнозернистые, от мелко- до крупнозернистых, тонкослойчатые до грубослойчатых полевошпат-кварцевые алевролиты, песчаные алевролиты, углеродистые и безуглеродистые; 3 – аргиллиты серицитовые с незначительным (до 25 об. %) содержанием или отсутствием обломочной фракции песчаной и (или) алевритовой размерности, углеродистые и безуглеродистые; 4 – область сульфидной минерализации; 5 – рудоконтролирующий разлом; 6 – скважины, их номера; 7 – буровые линии, их номера

ных данных с характером распределения золота для разработки прогнозно-поискового критерия золотого оруденения.

Геологическое строение месторождения.

Располагается в 100 км к северу от месторождения Сухой Лог и входит в состав Артемьевского золоторудного поля Кевактинского рудного узла. Открыто в процессе геологической съёмки м-ба 1:50 000 (1964–1966 гг.) под руководством Б.В.Антонова. Крупная рудная залежь локализована в нижнепротерозойской толще углеродистых терригенных сланцев верхней подсвиты михайловской свиты (PR₁mh) мощностью до 1200 м. Толща образует пологую брахисинклинальную складку

широтного простирания. Сложена метапесчаниками, метаалевролитами, наиболее широко развитыми, составляющими до 90% изученного разреза, и метааргиллитами, имеющими подчинённое положение (до 10%). Породы гидротермально изменены до метасоматитов березит-пропилитового ряда. Рудная залежь контролируется северо-северо-западной (350°) складчато-разломной зоной типа взбросо-сдвига с падением сместителя (∠60°) в западном направлении (рис. 1).

Сульфидная минерализация сосредоточена в гидротермально изменённых породах. Преобладают пирит, арсенопирит, пирротин, в качестве незначительной примеси в сульфидно-кварцевых

комплексах отмечаются галенит, сфалерит, халькопирит, микропримеси кобальтина, самородного свинца, ульманита, теллурувисмутита. В кварцевых жилах и прожилках сульфиды встречаются эпизодически. Преобладает свободное золото в кварце [1, 8]. В рудном теле описаны пластовые и субпластовые тела диоритов, диоритовых порфиритов и долеритов мощностью от 0,2 до 15 м [8].

Методика и результаты исследования. Диагностика пирротинов осуществлялась оптическим методом на поляризационном микроскопе Zeiss Imager A2m. На энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном микроскопе HORIBA XGT-7200 в Томском политехническом университете (аналитик М.А.Рудмин) выполнен количественный химический анализ пирротинов в диапазоне элементов от Na до U. Измерения проводились со следующими параметрами: площадь сканирующего луча составляла 10 мкм, мощность излучения – 50 кВ, сила электрического тока – 1 мА, время замера – 50 с. В каждом зерне рудного минерала в зависимости от размера производилось от 3 до 10 измерений. Выполнено 389 точечных определений в 50 полированных шлифах. Кроме того, химический состав пирротинов установлен рентгеноспектральным анализом на микрозонде JXA-8100 Camebax-Micro в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск, аналитик В.Н.Королюк) с пределами обнаружения содержания элементов-примесей 0,001 масс. % (22 точечных определения).

Рентгеноструктурный анализ выполнен на рентгеновском дифрактометре XPert PRO (PANalytical) в Аналитическом центре геохимии природных систем Томского государственного университета (аналитик Т.С.Небера). Условия съёмки: трубка с медным анодом (CuK α), напряжение на трубке 40 кВ, сила электрического тока 30 мА, шаг 0,02°, диапазон углов дифракции 2 θ 20...80°, вращение 30 об/мин, выдержка 0,1 с в точке, рабочий радиус 141 мм. Расшифровка дифрактограмм проводилась с помощью программного обеспечения PDF-4 и HighScore. Исследованы 12 проб.

Магнитная восприимчивость керновых проб измерялась прибором КТ-10. Диапазон измерений с автоматическим переключением от 0,001·10⁻³ до 999,99·10⁻³ ед. СИ. Образцы были представлены штуфными пробами из керна скважин, распиленного по плоскости симметрии на две равные части. Изучены магнитные свойства 1964 штуфных проб

из скважин четырёх буровых линий (БЛ) – 7, 8а, 19, 30 (см. рис. 1).

Объёмная модель распределения пирротиновой минерализации составлена на основании документации керна 33 скважин и 1964 штуфных образцов пород и руд.

Взаимоотношение золота и пирротина. Ранее в месторождении Чёртово Корыто авторами было выделено пять минеральных комплексов руд: кварц-рутил-апатит-пирит-пирротиновый, кварц-арсенопирит-пирротиновый с золотом, кварц-пирит-арсенопиритовый с золотом, кварц-полиметаллический с золотом и кварц-карбонатный. Подробно минеральные комплексы описаны в работе [1]. Пирротин относится к главным сульфидным минералам месторождения и представлен тремя генерациями, входящими в состав трёх минеральных комплексов (первого, второго и четвёртого).

Пирротин I встречается в метасоматически изменённых породах в виде «штрихов», параллельных сланцеватости во всем объёме минерализованной зоны. Размер «штрихов» колеблется в интервале от 5 до 0,1 мм (рис. 2, а). Внутреннее строение кристаллически-зернистое, определяющее гранулярную структуру. Форма зёрен изометрическая, слегка удлинённая, неправильная. Пирротин I не ассоциирует с золотом и не образует с ним сростаний. По данным рентгеноспектральных исследований в его составе золото не диагностировано.

Пирротин II представлен гнездовыми скоплениями в кварц-карбонатных прожилках и является более поздним минералом по отношению к пириту II и арсенопириту I, так как цементирует их (см. рис. 2, б). Минерал отмечается во всём объёме минерализованной зоны, но преобладающее его количество фиксируется в центральной части рудного тела. Иногда образует сростания с поздним золотом (золото II). Структура взаимных границ между минералами зазубренная, что свидетельствует об их одновременном выделении (см. рис. 2, г–е).

Пирротин III образует обособленные от других сульфидов (сфалерита и галенита) гнездовые выделения в кварце (см. рис. 2, в). Сульфид развит в центральной части рудного тела. В сростании с самородным золотом пирротин III не зафиксирован. Золото четвёртого комплекса встречается в виде механической примеси в галените, сфалерите и кварце.

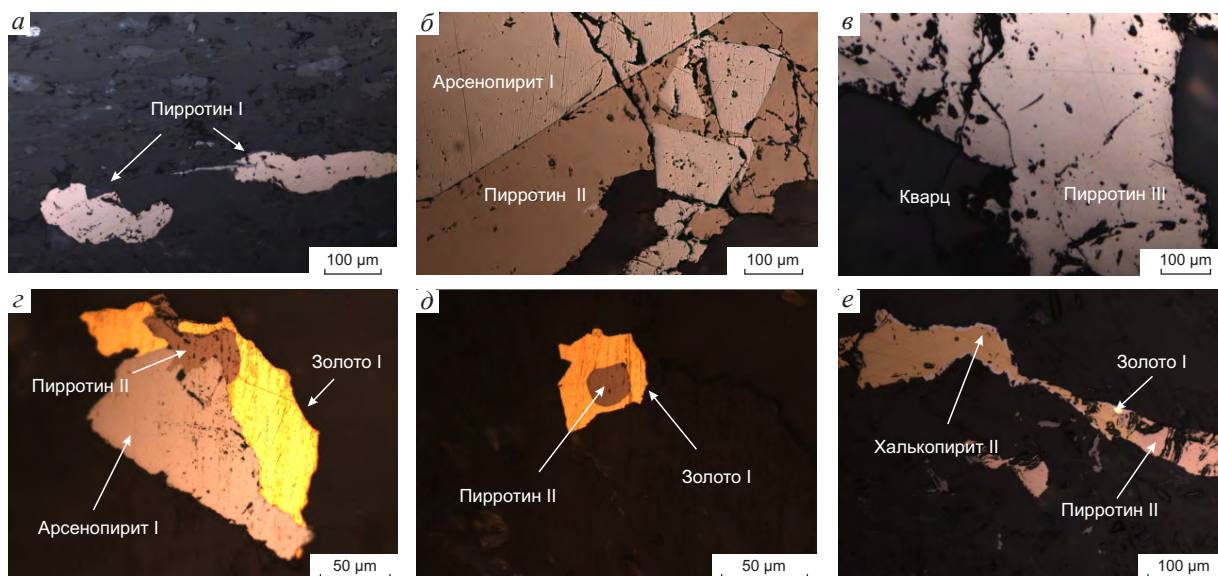


Рис. 2. ПИРРОТИН МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЁРТОВО КОРЫТО:

a – пирротин I в виде «штрихов» в терригенных углеродистых породах; *б* – пирротин II в ассоциации с арсенопиритом I в маломощном кварц-карбонатном прожилке; *в* – гнездовые выделения пирротина III в кварц-карбонатных жилах; *г-е* – пирротин II в ассоциации с золотом I

Химический состав пирротинов. По данным рентгенофлуоресцентных исследований во всём объёме рудной залежи для пирротинов характерен выдержанный химический состав. Содержание Fe изменяется в интервале 59,61...62,86, S – 36,58...40,36 масс. % (табл. 1). Из примесей диагностированы никель и медь.

Рентгеноструктурные характеристики пирротина. При рентгенодифрактометрическом анализе выявлены два основных типа рентгенограмм пирротиновых проб. Первый тип (рис. 3, *a*) соответствует гексагональному пирротину, второй – смеси гексагонального и моноклинного (см. рис. 3, *б*). Первый тип рентгенограммы встречен в первой генерации пирротина, второй – во всех трёх генерациях.

Как показал рентгенодифрактометрический анализ, величина межплоскостного расстояния *d* (102) гексагонального пирротина колеблется от 2,05936 до 2,0668 Å, что по кривой Р.Арнольда [16] соответствует изменению состава минерала от 47,2 до 47,4 ат. % Fe и отвечает формуле Fe₈S₉, Fe₉S₁₀. По данным рентгеноспектрального анализа содержание Fe изменяется в интервале 60,76...61,57 масс. %. Из примесей во всех пробах диагностирован никель (0,1...0,35 масс. %), в одной – медь (0,04 масс. %) (табл. 2).

По данным дифрактометрии *d* (102) моноклинного пирротина варьирует в интервале 2,0463...2,05298 Å, что, по данным Р.Арнольда [17], соответствует изменению содержания Fe в интервале 45,8...46,1 ат. % и приблизительно отвечает составу

1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПИРРОТИНОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

Элементы, масс. %	Генерации пирротина (число определений)		
	I (201)	II (112)	III (76)
Fe	$\frac{59,63...62,78}{60,97}$	$\frac{59,63...62,86}{60,81}$	$\frac{59,61...62,86}{61,03}$
S	$\frac{36,58...40,04}{38,56}$	$\frac{37,27...40,04}{38,77}$	$\frac{36,78...40,36}{38,64}$
Ni	$\frac{0,00...0,8}{0,25}$	$\frac{0,00...1,44}{0,29}$	$\frac{0,0...0,38}{0,13}$
Cu	0,1...0,34 (в семи пробах)	0,09...0,16 (в двух пробах)	0,07...0,23 (в девяти пробах)
Fe, ат. %	$\frac{45,85...49,37}{47,43}$	$\frac{46,05...48,83}{47,24}$	$\frac{45,9...49,33}{47,48}$
Соотношение моноклинного и гексагонального пирротинов, %	29:71	40:60	68:32

Примечание. В числителе – интервал значения, в знаменателе – среднее значение.

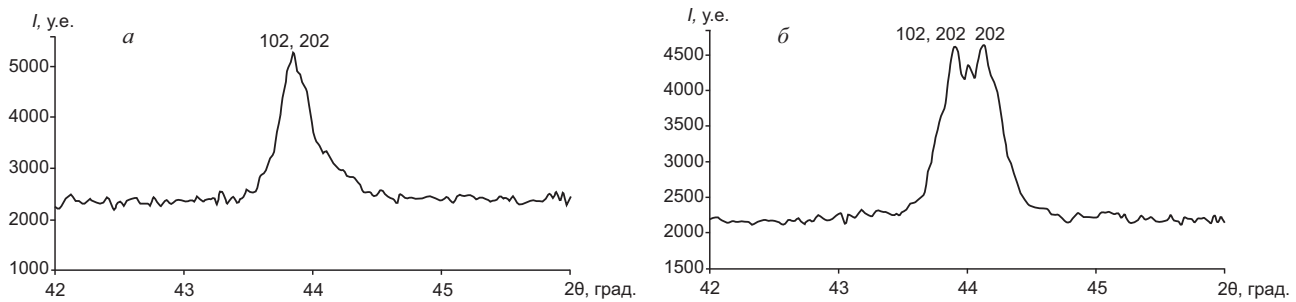


Рис. 3. ТИПЫ РЕНТГЕНОГРАММ ПРОБ ПИРРОТИНОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЁРТОВО КОРЫТО:

а – гексагональный пирротин; *б* – смесь гексагонального и моноклинного пирротинов; по вертикальной оси – интенсивность отражения I рентгеновских лучей, по горизонтальной – угол дифракции рентгеновских лучей 2θ

ву Fe_7S_8 . По данным рентгеноспектрального анализа содержание Fe в моноклинном пирротине изменяется в интервале 60,21...60,49 масс. %. Из примесей во всех пробах диагностирован никель (0,02...0,31 масс. %), в четырёх – медь (по 0,03 масс. %) (см. табл. 2).

Магнитная восприимчивость пород и руд. Установлено, что для метаморфизованных осадочных терригенных пород михайловской свиты (PR, mh) показатель магнитной восприимчивости (χ) изменяется в пределах 0,9...35,9·10⁻⁵ ед. СИ. В крупнообъёмном метасоматическом ореоле он существенно возрастает до 1000·10⁻⁵ ед. СИ и более.

Для нахождения взаимосвязи между распределением золота и показателем магнитной восприимчивости в породах и рудах месторождения рассчитывались их статистические параметры и коэффициенты ранговой корреляции по четырём разведочным профилям – БЛ 7, 8а, 19, 30 (табл. 3), а также статистические параметры для каждой из 33 буровых скважин, расположенных на этих профилях.

На изученных профилях коэффициент вариации (V) показателя магнитной восприимчивости изменяется от неравномерного – 82–89%, до весьма неравномерного – 122%. Золото характеризуется крайне неравномерным распределением содержания с V , превышающим 150%. Ранговый коэффициент корреляции между содержанием золота и показателем магнитной восприимчивости по БЛ 8а составляет 0,20, а по БЛ 19 – 0,22, что превышает критическое значение $r_{крит.}=0,08$. Таким образом, связь между распределением золота и показателем магнитной восприимчивости на центральных разведочных профилях значимая

и положительная. На крайних северном БЛ 7 и южном БЛ 30 разведочных профилях статистически значимая корреляционная связь между распределением содержания золота и показателем магнитной восприимчивости отсутствует.

Однако вывод о статистически значимой взаимосвязи между распределением золота и χ в породах и рудах месторождения на центральных разведочных профилях не всегда подтверждается для пород и руд, отобранных из отдельных скважин, где r может быть как положительным и отрицательным значимым, так и незначимым (табл. 4). При этом значимая корреляционная связь в породах и рудах между распределением золота и χ в большинстве скважин не выявлена. В частности, значимая отрицательная корреляционная связь в скважинах 85 ($r=-0,23$) и 86 ($r=-0,28$) объясняется самыми высокими на БЛ 8а коэффициентами вариации (327 и 308%) и средними содержаниями Au (3 и 2,2 г/т). Кроме того, независимо от характера взаимосвязи между распределением золота и χ часто наблюдается смещение относительно друг друга высококонтрастных ореолов данных показателей (рис. 4). Расхождение в пространственном распределении золотой и пирротиновой минерализации также отмечалось в работах [7, 9]. На крайних разведочных линиях (БЛ 7 и 30) взаимосвязь между поведением золота и показателем магнитной восприимчивости как на профилях в целом (см. табл. 2), так и по отдельным скважинам не установлена.

Дополнительно была построена модель пирротиновой минерализации, отражающая распределение пирротинов по генерациям и изменение магнитной восприимчивости в объёме рудной за-

2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПИРРОТИНОВ (масс. %) И РЕНТГЕНОДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Генерации пирротина	Номера образцов	Fe	S	Cu	Ni	Сумма	Формулы пирротинов по результатам рентгеноспектрального анализа	$d(102), \text{Å}$
Гексагональный пирротин								
I	84-155,3	61,57	38,20	-	0,20	99,97	$(\text{Fe}_{0,925}\text{Ni}_{0,003})\text{S}$	2,06328
I	84-67,5	61,35	38,24	-	0,35	99,94	$(\text{Fe}_{0,920}\text{Ni}_{0,005})\text{S}$	2,06063
I	194-87,2	61,45	38,07	-	0,35	99,94	$(\text{Fe}_{0,926}\text{Ni}_{0,005})\text{S}$	2,06357
I	194-147,5	60,76	38,83	0,04	0,17	99,82	$(\text{Fe}_{0,898}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,06455
I	85-74,1	61,33	38,48	-	0,13	99,94	$(\text{Fe}_{0,914}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,06180
I	194-63,0	61,57	38,20	-	0,12	99,95	$(\text{Fe}_{0,925}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,06351
II	194-83,4	61,23	38,45	-	0,10	99,78	$(\text{Fe}_{0,914}\text{Ni}_{0,001})\text{S}$	2,06680
II	85-119,7	61,42	38,14	-	0,16	99,72	$(\text{Fe}_{0,924}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,05974
II	194-178,0	61,38	38,20	-	0,21	99,79	$(\text{Fe}_{0,922}\text{Ni}_{0,003})\text{S}$	2,05936
III	83-134,7	61,56	38,33	-	0,11	99,99	$(\text{Fe}_{0,923}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,06573
III	87-132,0	61,02	38,8	-	0,15	99,97	$(\text{Fe}_{0,903}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,06234
III	83-133,3	61,27	38,49	-	0,15	99,93	$(\text{Fe}_{0,914}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,06680
Моноклинный пирротин								
I	84-155,3	60,21	39,35	-	0,13	99,69	$(\text{Fe}_{0,878}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,05298
I	194-147,5	60,46	39,14	-	0,31	99,91	$(\text{Fe}_{0,886}\text{Ni}_{0,004})\text{S}$	2,05189
I	85-74,1	60,41	39,35	-	0,20	99,96	$(\text{Fe}_{0,881}\text{Ni}_{0,003})\text{S}$	2,04630
I	194-63,0	60,21	39,35	-	0,13	99,69	$(\text{Fe}_{0,878}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,05012
II	194-83,4	60,49	39,73	0,03	0,12	100,39	$(\text{Fe}_{0,874}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,05199
II	85-119,7	60,29	39,39	-	0,28	99,96	$(\text{Fe}_{0,878}\text{Ni}_{0,003})\text{S}$	2,05172
II	194-178,0	60,43	39,77	0,03	0,02	100,25	$(\text{Fe}_{0,872}\text{Ni}_{0,003})\text{S}$	2,05183
III	83-134,7	60,31	39,6	0,03	0,11	99,94	$(\text{Fe}_{0,874}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,04874
III	87-132,0	60,4	39,44	-	0,14	99,98	$(\text{Fe}_{0,879}\text{Ni}_{0,002})\text{S}$	2,05185
III	83-133,3	60,32	40,08	0,03	0,09	100,53	$(\text{Fe}_{0,864}\text{Ni}_{0,001})\text{S}$	2,05210

Примечание. «-» – элемент не определен.

3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЗОЛОТА И ПОКАЗАТЕЛЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ В ПОРОДАХ И РУДАХ ПО РАЗВЕДОЧНЫМ ПРОФИЛЯМ

Статистические показатели	БЛ 7		БЛ 8а		БЛ 19		БЛ 30	
	$n=280$		$n=694$		$n=756$		$n=240$	
	Au, г/т	$\chi, n \cdot 10^{-5}$	Au, г/т	$\chi, n \cdot 10^{-5}$	Au, г/т	$\chi, n \cdot 10^{-5}$	Au, г/т	$\chi, n \cdot 10^{-5}$
min	0,00	-15	0,00	3	0,00	0,9	0,00	6
max	7,86	1225	57,95	1316	311,35	1013	5,58	1307
x_{cp}	0,22	138	1,14	169	0,87	103	0,09	154
S	0,55	117	3,45	150	11,39	127	0,41	128
$V, \%$	244	84	300	89	1295	122	445	82
r	-0,05		0,20		0,22		-0,10	

Примечание. n – число проб, min – минимальное, max – максимальное, x_{cp} – среднее значения, S – стандартное отклонение, V – коэффициент вариации, r – ранговый коэффициент корреляции; жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляционной связи.

4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЗОЛОТА И ПОКАЗАТЕЛЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ В ПОРОДАХ И РУДАХ ПО СКВАЖИНАМ БЛ 8А

Статистические показатели		Номера скважин									
		80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
n		60	83	80	78	79	88	62	64	49	51
r		0,06	0,24	0,14	0,12	0,02	-0,23	-0,28	-0,07	0,11	0,45
Au	$x_{cp}, \text{г/т}$	0,35	0,62	0,81	0,96	0,99	3,00	2,23	1,12	0,45	0,27
χ	$x_{cp}, n \cdot 10^{-5}$	54	97	95	170	147	197	313	301	182	170
Au	$V, \%$	195,6	273,7	138,1	119,6	113,9	327,2	307,8	145,2	134,0	265,2
χ	$V, \%$	105,4	102,7	93,0	108,9	69,7	48,9	56,5	62,7	80,9	60,4

Примечание. Усл. обозн. см. табл. 3.

лежи (рис. 5). Пирротин I генерации наиболее распространён и относительно равномерно развит во всём метасоматическом ореоле месторождения. В центральной части (БЛ 8а, 19), наряду с пирротином I генерации, существенный объём занимает пирротин II и III генераций, пространственно связанный с золотой минерализацией.

Обсуждение результатов. Как известно, в природе пирротин встречается в нескольких структурных модификациях, среди которых наиболее распространены гексагональный, моноклинный пирротины и троилит. Они отличаются по химическому составу, магнитным свойствам и структурным характеристикам. Содержание Fe в моноклинном пирротине составляет 46,5...46,9 ат. %, гексагональном – 47,0...48,3 ат. %, троилите – 49,8...50,2 ат. %. Многие исследователи отмечают, что в гидротермальных рудных месторождениях преимущественно развит моноклинный пирротин [4, 9, 11, 19–21, 25]. Результаты изучения химического состава пирротинов месторождения Чёртово Корыто показали присутствие в рудах минералов моноклинной и гексагональной модификаций, причём обе они сосуществуют во всех генерациях. В раннем пирротине число определений, соответствующих моноклинной и гексагональной модификациям, соответственно равно 29 и 71%, в пирротине II – 40 и 60%, пирротине III – 68 и 32% (см. табл. 1). То есть количество моноклинного пирротина увеличивается от ранней генерации к поздней.

Набор элементов-примесей в природных пирротинах весьма ограничен. Характерно присутствие никеля, кобальта и меди в различных коли-

чественных соотношениях. Наиболее богаты примесями пирротины медно-никелевых месторождений. В них содержание этих элементов может достигать 1 масс. % [4]. В золоторудных месторождениях пирротин обычно содержит до 0,5 масс. % Ni и Cu. Кобальт встречается редко. Пирротины месторождения Чёртово Корыто содержат от 0,00 до 0,04 масс. % Cu и от 0,00 до 1,44 масс. % Ni, причём медь фиксируется всего в 13 определениях, а никель почти в каждой пробе. Максимальное его количество отмечается в пирротине II, который ассоциирует с собственным минералом никеля – ульманитом (NiSbS). Небольшой набор примесей в пирротине, возможно, связан со спецификой функционирующих в системе растворов, не богатых кобальтом, медью и др., что подтверждает

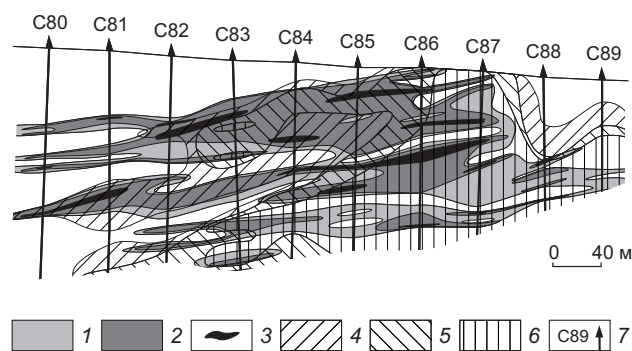


Рис. 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛОТА И ПОКАЗАТЕЛЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПО БЛ 8А:

содержание Au, г/т: 1 – 0,5...1, 2 – 1...3, 3 – >3; значения магнитной восприимчивости, $n \cdot 10^{-5}$ ед. СИ: 4 – 100...150, 5 – 150...200, 6 – >200; 7 – буровые скважины, их номера

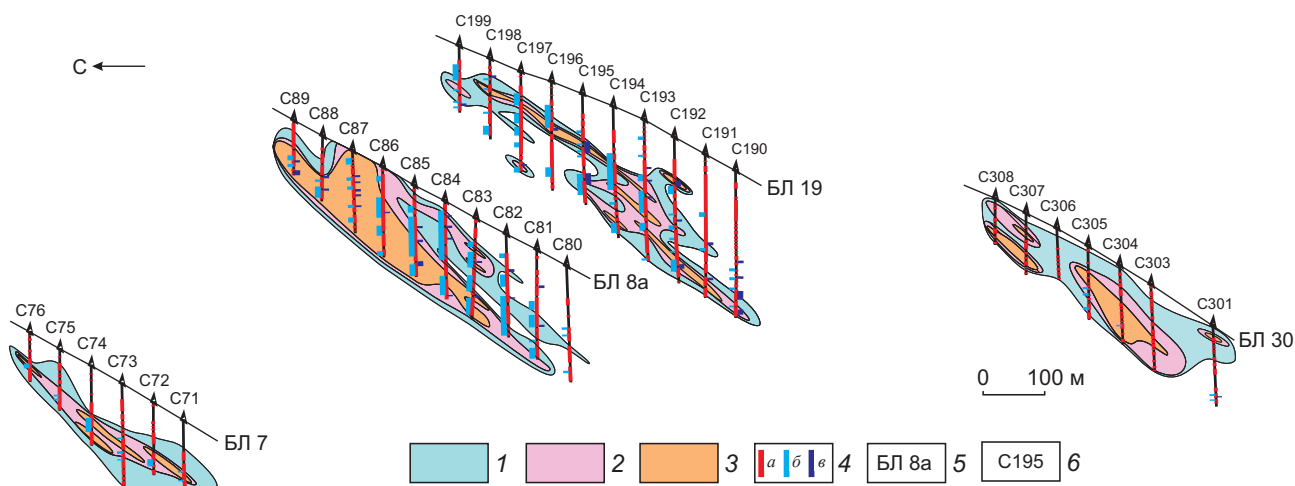


Рис. 5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ И ГЕНЕРАЦИЙ ПИРРОТИНОВ В ПОПЕРЕЧНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РАЗРЕЗАХ:

значения магнитной восприимчивости, $n \cdot 10^{-5}$ ед. СИ: 1 – 100...150, 2 – 150...200, 3 – >200 ; 4 – генерации пирротинов (а – пирротин I, б – пирротин II, в – пирротин III); 5 – буровые линии, их номера; 6 – скважины, их номера

ся отсутствием собственных минералов этих элементов.

Согласно исследованиям структуры природных пирротинов методом порошковой дифрактометрии, моноклинный и гексагональный пирротины различаются расщеплением рентгеновского импульса от плоскости d (102). На дифрактограммах гексагонального пирротина отражение представлено одним пиком, а моноклинного – двумя. Изученные рентгенограммы пирротинов различных месторождений группируются в три типа. Два типа соответствуют гексагональной и моноклинной модификациям, один – смеси гексагонального и моноклинного пирротинов. Рентгенограммы, отвечающие смеси гексагонального и моноклинного пирротинов, описаны многими исследователями [16–18, 24, 25]. Они характерны для пирротинов медно-никелевых, колчеданных, а также гидротермальных золоторудных месторождений.

Рентгенограммы пирротиновых проб месторождения Чёртово Корыто разделяются на два типа. Первый тип рентгенограмм, соответствующий гексагональной модификации (две пробы), зафиксирован в пирротине I, второй, отвечающий смеси гексагонального и моноклинного пирротинов (10 проб), – в пирротине I, II и III. Проб с чистым моноклинным пирротинном не обнаружено.

Следует отметить, что сравнение составов различных модификаций пирротинов всех трёх гене-

раций, полученных рентгеноспектральным и рентгенодифрактометрическим методами, показывает их удовлетворительную сходимость (см. табл. 2).

Таким образом, при изучении элементного состава и структурных характеристик пирротинов выявлено, что пирротин трёх генераций представляет собой смесь гексагональной и моноклинной структурных модификаций. Причём в первом комплексе преобладает гексагональный пирротин, в четвёртом – моноклинный. Преобладание моноклинного пирротина в поздних минеральных комплексах отмечается для Олимпиадинского, Дарасунского и Майского золоторудных месторождений [4, 9].

О присутствии в каждой генерации пирротина двух структурных модификаций также свидетельствуют ранее изученные авторами доменные структуры и микротвёрдость [13]. Для раннего пирротина I характерны слабо выраженные доменные структуры (осаждение магнитной суспензии происходит медленно и незначительно), позднего пирротина III – ярко выраженные (равномерное и быстрое осаждение порошка по всей поверхности). Микротвёрдость пирротинов изменяется в интервале 210,24...409,12 кгс/мм². Для раннего пирротина характерно преобладание низких значений твёрдости, для позднего – высоких, что обусловлено различным соотношением модификаций.

Об увеличении количества моноклинного пирротина от ранней генерации к поздней свидетельствует изменение магнитной восприимчивости в объёме рудной залежи (см. рис. 4). Как известно, моноклинный пирротин является ферримагнетиком [4]. Поэтому повышенная магнитная восприимчивость фиксируется только в местах наличия моноклинного пирротина, причём максимальные значения параметра χ ($>200 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) отмечаются в областях распространения пирротина II и III генераций, где моноклинный пирротин преобладает (см. рис. 4, БЛ 8а, 19). Магнитная восприимчивость, изменяющаяся в интервале $100 \dots 150 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, фиксируется в областях преобладания пирротина I, в которых моноклинный пирротин практически отсутствует (см. рис. 4, БЛ 7, 30).

Анализ распределения золота и показателя магнитной восприимчивости в породах и рудах месторождения показал, что отсутствие корреляционной связи между ними на северном (БЛ 7) и южном (БЛ 30) флангах связано с распространением кварц-рутил-апатит-пирит-пирротинового (первого) комплекса на периферии минерализованной зоны и практически полным отсутствием минеральных комплексов, содержащих золотую минерализацию. Соответственно, значимая положительная связь между распределением золота и показателем магнитной восприимчивости в центральной части месторождения (БЛ 8а, 19) обусловлена наличием кварц-пирит-арсенопирит-пирротинового с золотом (второго) и кварц-полиметаллического с золотом (четвёртого) комплексов. На всех четырёх изученных профилях между распределением содержания золота и показателем магнитной восприимчивости устанавливается незначительная пространственная разобщённость.

Положительная корреляционная зависимость между распределением золота и показателем магнитной восприимчивости по центральным разведочным профилям говорит об их тесной пространственной взаимосвязи, что может быть учтено при проведении прогнозно-поисковых работ.

Таким образом, в ходе исследований установлено, что пирротин месторождения Чёртова Корыто представлен тремя генерациями, в составе которых сосуществуют гексагональная (Fe_8S_9 , Fe_9S_{10}) и моноклинная (Fe_7S_8) структурные модификации. Отмечено увеличение количества моноклинного пирротина от ранней генерации к поздней. Из элементов-примесей в сульфиде диагностированы ни-

кель и медь. Магнитная восприимчивость в объёме минерализованной зоны связана с моноклинным (ферримагнитным) пирротинном. Показатель магнитной восприимчивости проявляет устойчивую пространственную взаимосвязь с распределением золота. Проведённые исследования позволяют использовать типоморфные свойства пирротина для решения геологических задач, направленных на выделение рудных интервалов и минеральных комплексов, содержащих золото.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагина Е.А. Минеральные комплексы руд и генезис золоторудного месторождения Чёртова Корыто (Патомское нагорье) // Изв. Томского политехн. ун-та. 2012. Т. 321. № 1. С. 63–69.
2. Ворошин С.В., Шарафутдинов В.М., Тюкова Е.Э. Аномалии петромагнитных параметров, обусловленные сульфидной минерализацией, и прогноз оруденения в Яно-Колымском золотоносном поясе // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19. № 5. С. 91–104.
3. Гаврилов Р.Ю., Синкина Е.А., Мицых С.Н. Метод каппа-метрии как прогнозно-поисковый критерий золоторуденения // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 3. С. 106–116.
4. Генкин А.Д., Логинов В.П., Органова Н.И. О взаимоотношениях и особенностях размещения гексагональных и моноклинных пирротинов в рудах // Геология рудных месторождений. 1965. № 3. С. 3–24.
5. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Геофизические и петрофизические исследования малосульфидных кварцевых месторождений золота Сибири // Геофизика. 2014. № 3. С. 55–60.
6. Колмаков Ю.В., Соколов С.В., Гусев Е.В. Геодинамические условия образования месторождений золота в Патомском нагорье, Восточная Сибирь: факторы их проявления в аномалиях магнитного поля // Отечественная геология. 2010. № 4. С. 8–14.
7. Колмаков Ю.В. Золото-сульфидное месторождение Благодатное (Енисейский край, Россия): природа геофизических аномалий, последовательность и причины образования петрофизической зональности // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 11. С. 1667–1681.
8. Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верховин А.В. Структурно-динамическая модель золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ч. 2. Месторож-

- дение Чертово Корыто (Патомское нагорье) // Изв. Томского политехн. ун-та. 2008. Т. 314. № 1. С. 23–38.
9. Некрасова Н.А. Вариации состава пирротина в минерализованной зоне Олимпиадинского золоторудного месторождения // Тр. XVIII Междунар. науч. симпозиума им. академика М.А.Усова «Проблемы геологии и освоения недр». Томск, 2014. С. 224–225.
 10. Пахомов М.И., Пахомов В.И. Петрофизический метод выделения и оценки метасоматитов. – М.: Недра, 1988.
 11. Пирротины золотосодержащих руд: состав, точечные дефекты, магнитные свойства, распределение золота / А.М.Сазонов, В.В.Онуфриенко, Ю.В.Колмаков и др. // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2014. № 6. С. 717–737.
 12. Рудерман Е.Н. К созданию системы обнаружения золоторудных метасоматитов геофизическими и геохимическими методами // Геология и разведка. 1990. № 5. С. 122–128.
 13. Синкина Е.А., Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю. Типоморфизм пирротинов золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2017. № 1. С. 58–65.
 14. Соколов С.В. Петрофизика золотосульфидного оруднения в углеродистых толщах на примере месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье): дисс... канд. геол.-минер. наук. – Томск, 2011.
 15. Airo M.-L. Aeromagnetic and aeroradiometric response to hydrothermal alteration // Surveys in Geophysics. 2002. Vol. 23 (4). P. 273–302.
 16. Arnold R.G. Equilibrium relation between pyrrhotite and pyrite from 325° to 743°C // Economic Geology. 1962. Vol. 57. № 1. P. 72–90.
 17. Arnold R.G. Mixture of hexagonal and monoclinic pyrrhotite and the measurement of the metal content of pyrrhotite by X-ray diffraction // American Mineralogist. 1966. Vol. 51. P. 1221–1227.
 18. Ferrow E., Adetunji J., Nkoma J. Characterization of pyrrhotite in Cu-Ni-ore bodies from mines in Botswana by Mossbauer spectroscopy, X-ray diffraction, and thermomagnetometry // European Journal Mineralogy. 2006. Vol. 18. P. 653–664.
 19. Gold deposits of the Ukrainian shield (Ukraine) / V.B.Koval', Yu.M.Koptyukh, M.A.Yaroshchuk et al. // Geology of Ore Deposits. 2004. Vol. 39 (3). P. 194–208.
 20. Grönholm S., Voipio T. The Palokallio gold occurrence at Huittinen, southern Finland // Special Paper of the Geological Survey of Finland. 2012. Vol. 52. P. 91–99.
 21. Kontoniemi O., Johanson B., Kojonen K., Pakkanen L. Ore mineralogy of the Osikonmaki gold deposits, Rantasalmi, Southeastern Finland // Geological Survey of Finland. 1991. Vol. 12. P. 81–89.
 22. Mertanen S., Karell F. Palaeomagnetic and AMS studies on Satulinmäki and Kojjärvi fault and shear zones // Special Paper of the Geological Survey of Finland. 2012. Vol. 52. P. 195–226.
 23. Mertanen S., Karell F. Rock magnetic investigations constraining relative timing for gold deposits in Finland // Bulletin of the Geological Society of Finland. 2011. Vol. 83 (2). P. 75–94.
 24. Morimoto N., Nakazawa H., Nishiguchi K., Tokonami M. Pyrrhotites: stoichiometric compounds with composition $Fe_{n-1}S_n$ // Science. 1970. Vol. 168. P. 964–966.
 25. Wall Rock Alterations and Physicochemical Conditions of the Sovetsk Gold Deposit Formation (Enisei Ridge) / O.V.Rusinova, V.L.Rusinov, S.S.Abramov et al. // Geology of Ore Deposits. 1999. Vol. 41 (4). P. 276–294.

3-D MODEL OF CHERTOVO KORYTO GOLD DEPOSIT PYRRHOTITE MINERALIZATION, PATOM HIGHLAND

E.A.Sinkina, R.Yu.Gavrilov (Institute of Natural Resources, National Research Tomsk State University)

Study results of Chertovo Koryto deposit pyrrhotite mineralization are given. Analysis was carried out for chemical composition and X-ray structural characteristics of pyrrhotites. It was proved that the sulfide is represented by three generations consisting of hexagonal (Fe_8S_9 , Fe_9S_{10}) and monoclinic (Fe_7S_8) structural modifications. Distribution of pyrrhotites of various generations in an ore deposit is shown as well as magnetic susceptibility index caused by presence of ferromagnetic pyrrhotite. Stable spatial connection between gold distribution and magnetic susceptibility index is established.

Keywords: gold deposit, pyrrhotite, structural modifications, magnetic susceptibility.

