

ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПЕРВИЧНОЙ ЗОЛОТО-МЕДНО-ПОРФИРОВОЙ РУДЫ

М.А. Гурман¹, С.И. Корнеева¹

¹ Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН,
Хабаровск, Россия, e-mail: mgurman@yandex.ru

Аннотация: Выявлен комплексный состав исследуемой бедной первичной золото-медно-порфировой руды (уч. «Свобода») Малмыжского месторождения (Хабаровский край). Приведены результаты исследования по извлечению магнетита из хвостов флотационного обогащения руды. Магнетит представлен тонкозернистой и микроагрегатной вкрапленностью в кварцевых метасоматитах, образует сложные сростания с кварцем и сульфидными минералами. Выделены две генерации магнетита, различающиеся по составу и габитусу кристаллов, по наличию примесей и включений. С целью повышения комплексности использования перерабатываемой руды для извлечения магнетита разработана схема магнитной сепарации. Показана принципиальная возможность выделения магнетитовых концентратов с содержанием 63,85% и 50,31% Fe из хвостов флотационного обогащения руды крупностью минус 0,071 мм. В результате обогащения руды по флотационно-магнитной схеме извлечение железа составило 49% при содержании в немагнитной фракции 2,7% Fe. Методами сканирующей электронной микроскопии в магнетитовых концентратах установлено самородное железо в виде свободных зерен и включений в магнетите, выявлены интерметаллиды состава Fe, Cr, Ni, Ti, Mn с содержанием (отн. масс. %): Fe (60–82), Cr (0,4–20,5), Ni (3–8), Ti (0,4–1), Mn (0,5–3,5) и Ti-Co-Fe-вольфрамовый интерметаллид. В сростках магнетита с кварцем определены микровключения аргента и самородного серебра с примесью Cd.

Ключевые слова: золото-медно-порфировая руда, хвосты флотационного обогащения, магнитная сепарация, извлечение, магнетитовые концентраты, самородное железо, интерметаллиды, включения, примеси.

Для цитирования: Гурман М. А., Корнеева С. И. Перспективы комплексной переработки первичной золото-медно-порфировой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12. – С. 92–102. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_92.

Prospects of integrated processing of primary gold-bearing porphyry copper ore

M.A. Gurman¹, S.I. Korneeva¹

¹ Mining Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia, e-mail: mgurman@yandex.ru

Abstract: The composition of test low-grade primary gold-bearing ore from the Svoboda site of the Malmyzh porphyry copper deposit in the Khabarovsk Krai is revealed. The test data on extraction of magnetite from the ore flotation tailings are described. Magnetite represents a finely

grained micro-aggregate impregnation in metasomatic quartz, and forms complex concretions with quartz and sulfide minerals. Two generations of magnetite are disclosed, which differ in composition and habitus of crystals, and in impurities and foreign bodies. To improve comprehensiveness of the use of ore, a magnetic separation flowsheet is developed. It is demonstrated that it is possible to produce magnetite concentrates with the contents of 63.85% and 50.31% Fe from flotation tailings of ore -0.071 mm in size. After the use of the ore flotation-and-magnetic separation flowsheet, iron recovery reached 49% at Fe content of 2.7% in nonmagnetic fraction. The scanning electron microscopy of magnetite concentrates detected pure iron in the form of free grains and inclusions in magnetite, and revealed intermetallic compounds of Fe, Cr, Ni, Ti and Mn at the contents (%mass): Fe (60–82), Cr (0.4–20.5), Ni (3–8), Ti (0.4–1), Mn (0.5–3.5), and Ti–Co–Fe–tungsten intermetallic compound. Concretions of magnetite and quartz contain micro-shots of argentite and native silver with an impurity of Cd.

Key words: gold-bearing porphyry copper ore, flotation tailings, magnetic separation, recovery, magnetite concentrates, pure iron, intermetallic compounds, inclusions, impurities.

For citation: Gurman M. A., Korneeva S. I. Prospects of integrated processing of primary gold-bearing porphyry copper ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12):92-102. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_92.

Введение

В месторождениях медно-порфировых руд заключены большие, а иногда и гигантские запасы меди. В настоящее время более 65% мировых запасов и около 60% мировой добычи Cu приходится на эти месторождения. Кроме меди в рудах содержатся золото, серебро, элементы платиновой группы, железо, цинк, свинец, никель, редкие и рассеянные элементы (молибден, вольфрам, титан, ванадий, теллур, селен, индий, кадмий и др.), редкоземельные элементы [1–5]; все они являются важным ресурсом для развития современных высокотехнологичных отраслей [1, 6, 7]. При этом руды медно-порфирового типа характеризуются низким содержанием меди и элементов-спутников. Разрабатываются месторождения, содержащие в среднем 1,5–0,5% Cu при массовой доле Au (0,01–1,0 г/т), Ag (1–10 г/т), Mo (0,01–0,1%), Re (0,01–1,0 г/т) [1–3]. По данным государственного доклада о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 г. (Москва, 2023), в рудах гигантских мед-

но-порфировых месторождений Escondida и Collahuasi (Чили) содержание Cu составляет 0,4–1,2%; в рудах Cerro Verde и Toromocho (Перу) наряду с медью (0,55–1,29%) содержатся значительные количества Mo, Ag, Au, Re. В США основная добыча сосредоточена на месторождениях Morenci (шт. Аризона) и Bingham Canyon (шт. Юта), среднее содержание Cu в рудах которых составляет 0,37 и 0,47%, соответственно; в качестве попутных компонентов из этих руд получают Mo, из руд месторождения Bingham Canyon также Au и Ag.

Руды медно-порфировых месторождений России – Малмыжское (Хабаровский край), Песчанка (Чукотский АО), Ак-Сугское (Республика Тыва), Томинское и Михеевское (Челябинская область) – содержат крупные запасы меди. Малмыжское месторождение является крупнейшим в стране объектом золото-медно-порфирового типа. По содержанию меди руды относятся к рядовым (0,4–0,6%) и бедным (менее 0,4%), в качестве попутных компонентов установлено золото и серебро, металлы плати-

новой группы, на месторождениях Ак-Сугское и Песчанка в рудах также выявлено присутствие Mo и Re.

Массовые доли попутных ценных компонентов в медно-порфириновых рудах варьируют, составляя в среднем для Pt+Pd — 0,0001 — 0,09 г/т; Se, Te, In, Tl, Ga, Ge, Bi, Cd, Co — 1 — 10 г/т; для Zn, Pb, Ni, Ti, V — 0,01 — 0,1% [1 — 3, 8]. В качестве акцессорного минерала в рудах медно-порфириновых месторождений широко распространен магнетит. Количество магнетита иногда превышает 10%. Магнетит из различных медно-порфириновых месторождений может иметь сходные текстурные характеристики и элементный состав, но отличаться содержанием Mg, Al, Ti, V, Mn, Co, Zn, Ga или Cu, Mn, Sn, Mo, Sc. Также отмечается, что в пределах одного месторождения магнетит может иметь разный микроэлементный состав, например, Zn, Pb, W, Ta, Mo или Ti, Ni, Cr, Sn, что определяется генетическими особенностями руды медно-порфириновых месторождений [9 — 12].

Низкие содержания металлов в рудах обуславливают создание мощных горно-обогатительных предприятий [4, 5, 8]. Все вновь вводимые в эксплуатацию объекты на медно-порфириновых месторождениях имеют мощность более 20 млн т в год. Огромные масштабы переработки руды при наличии соответствующих технологических схем позволяют извлекать и ценные элементы-спутники. По мере увеличения спроса на важнейшие элементы, необходимые для современного мира, порфириновые месторождения будут играть все более важную роль в качестве поставщиков этих металлов [1 — 3, 6 — 9].

Многокомпонентный состав предопределяет комплексное использование руд с извлечением полезных компонентов в продукты, пригодные для дальнейшей переработки [13 — 16]. Предыдущими ис-

следованиями [17, 18], с привлечением современных физико-химических методов, установлен комплексный состав первичной золото-медно-порфириновой руды Малмыжского месторождения (уч. «Свобода»), в которой наряду с медью (0,4%) присутствуют благородные металлы (Au — 0,39 г/т) и Ag — 1,12 г/т). Показана эффективность коллективно-селективной флотации для получения медных концентратов с содержанием меди — 20,24%, обогащенных золотом и серебром. В халькопирите диагностированы микровключения минералов Te, Se, Bi. В оптимальном режиме коллективная флотация обеспечивает выделение хвостов, отвальных по меди, с содержанием 0,03% Cu.

Наличие примесей титана, марганца, хрома, ванадия, никеля, выявленных в магнетите в составе флотационных хвостов, послужило основанием для выделения и исследования магнитной фракции золото-медно-порфириновой руды с целью доизвлечения железа и сопутствующих ценных элементов для возможного снижения их потерь с хвостами. Способ обогащения в данном случае определяется магнитными свойствами и характером вкрапленности магнетита [19, 20]. По магнитной восприимчивости магнетит является сильномагнитным, для его концентрации применяется слабое магнитное поле, хвосты флотации представляют собой измельченный материал.

Методы исследования

В качестве объектов исследования использованы: технологическая проба первичной золото-медно-порфириновой руды, отобранной на уч. «Свобода» Малмыжского месторождения, и хвосты коллективной флотации, полученные при обогащении исходной руды. Эксперименты по сухому разделению флотационных хвостов на магнитные и немагнитные

компоненты (фракции) осуществлялись на лабораторном электромагнитном сепараторе 138Т в слабом поле магнитной индукцией 25 мТл. Минералогическое изучение продуктов магнитной сепарации выполнено с применением оптической и электронной микроскопии (стереомикроскоп Stemi 2000С, растровый электронный микроскоп VEGA TESCAN и JEO JCM-6000PLUS (ст. инженер-минералог Л.И. Щербак, аналитики Н.С. Коновалова, В.О. Крутикова, Н.А. Лаврик)). Содержание железа в исходной руде, хвостах флотации и продуктах магнитного обогащения определено атомно-абсорбционным методом (спектрофотометр AA7000, Shimadzu (с.н.с. Т.Г. Коновалова, аспирант Т.С. Самборская)).

Полученные результаты

Исследуемая руда характеризуется тонкозернистой, пойкилитовой, эвтектоидной структурой; тонковкрапленной текстурой с рассеянным распределением зерен и агрегатов рудных минералов в метасоматитах. Основными рудными минералами являются пирит, халькопирит, магнетит [17]. Содержание $Fe_{\text{общ}}$ в исходной руде составляет 4,6–4,9%. Согласно данным гранулометрического анализа руды, измельченной до крупности 70,47% кл. минус 0,071 мм, повышенная концентрация железа наблюдается

в классах крупности менее 0,071 мм (табл. 1).

Магнетит представлен тонкозернистой и микроагрегатной вкрапленностью, прожилками в кварцевых метасоматитах, образует сложные сростания с кварцем, пиритом, халькопиритом. По наличию примесей и включений, различных по составу и габитусу кристаллов, магнетит разделен на две генерации. Магнетит I имеет кубическую форму кристаллов и содержит примеси Ti, Mn, Cr, V, Ni. В магнетите II часто преобладают ромбоэдрические кристаллы. Электронно-микроскопические изображения (SEM-изображения) магнетита I и II генерации со спектрами и элементным составом представлены на рис. 1.

В процессе флотационного обогащения золото-медно-порфировой руды большая часть магнетита остается в камерном продукте коллективной сульфидной флотации, однако вследствие тесного сростания магнетита с сульфидными минералами некоторое его количество может переходить в пенный продукт.

В составе флотационных хвостов преобладают минералы рудовмещающих метасоматитов, в основном кварц; минералы железа представлены преимущественно магнетитом. По расчетным данным, доля пирита и халькопирита в хвостах коллективного цикла флотации

Таблица 1

Гранулометрический состав золото-медно-порфировой руды крупностью 70,47% класса 0,071 мм

Particle size distribution of Porphyry Copper-Gold ore fineness 70.47% class 0.071 mm

Класс крупности, мм	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Распределение Fe, %
+0,16	1,70	3,55	1,29
-0,16+0,071	27,83	3,82	22,89
-0,071+0,04	23,83	4,66	20,43
-0,04+0,015	24,15	7,05	35,00
-0,015	22,48	4,11	20,38
Итого	100,00	4,86	100,00

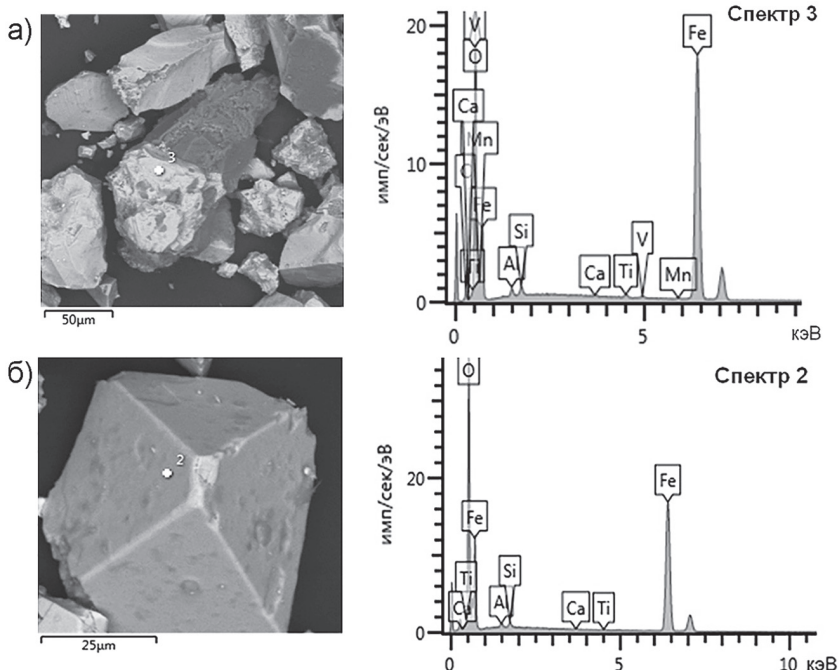


Рис. 1. SEM — изображения, спектры и элементный состав кристаллов магнетита: магнетит I генерации, спектр 3 (масс. %): Fe 67,1, Ti 0,4, Mn 0,2, V 0,1, Al 0,7, C 3,5, Si 0,6, O 27,2 (a); магнетит II генерации, спектр 2 (масс. %): Fe 61,9, Ti 0,2, Al 0,6, Ca 0,1, Si 0,7, O 36,6 (б)
 Fig. 1. SEM images, spectra and elemental composition of magnetite crystals: magnetite of the first generation, spectrum 3 (wt.%): Fe 67.1, Ti 0.4, Mn 0.2, V 0.1, Al 0.7, C 3.5, Si 0.6, O 27.2 (a); magnetite of the second generation, spectrum 2 (wt.%): Fe 61.9, Ti 0.2, Al 0.6, Ca 0.1, Si 0.7, O 36.6 (b)



Рис. 2. Схема эксперимента по флотационно-магнитному обогащению золото-медно-порфировой руды
 Fig. 2. Simplified experimental flowsheet showing flotation and magnetic separation of Porphyry Copper-Gold ore

Таблица 2

Результаты магнитной сепарации флотационных хвостов
Results of magnetic separation of tailings flotation

Продукты магнитной сепарации	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение Fe, %
Концентрат магнитной фракции 1	0,64	63,85	11,23
Концентрат магнитной фракции 2	1,15	50,31	15,90
Немагнитная фракция	98,21	2,7	72,87
Итого хвосты флотации	100	3,64	100

в виде зерен и сростаний составляет 0,6% и 0,1%, соответственно. С целью выделения магнетита хвосты коллективной флотации крупностью 70,47% класса минус 0,071 мм, содержащие 3,64% железа, подвергали магнитной сепарации.

Схема обогащения включала коллективную сульфидную флотацию с выде-

лением S концентрата, магнитную сепарацию флотационных хвостов, перераспределения магнитных фракций с получением концентрата 1, контрольные сепарации и перераспределения объединенных промежуточных продуктов с получением концентрата 2, немагнитная фракция представляет хвосты обогащения. Схема эксперимента приведена на рис. 2.

Таблица 3

Показатели извлечения железа по схеме флотация–магнитная сепарация и минеральный состав продуктов обогащения
Iron recovery rates on flotation–magnetic separation flowsheet and mineral composition of processing products

Продукты обогащения	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение Fe, %	Минеральный состав, отн. %
Коллективная флотация				
Концентрат S флотации	6,27	23,10	29,80	Сульфиды — 50—55 (ру — 30—35, сру — 20), кв; кв с включениями сульфидов
Хвосты флотации	93,73	3,64	70,20	Кв ~ 93; п.шпат, альбит ~ 4-5; мг ~ 2,5-2,8; ру — 0,6; сру — 0,1(*)
Магнитная сепарация хвостов флотации (25 мТл)				
Концентрат магнитной фракции 1	0,6	63,85	7,88	Мг — 80—85; агрегатные скопления мг до 1 мм, включения мг в кв, самородное железо, интерметаллиды
Концентрат магнитной фракции 2	1,08	50,31	11,18	Мг — 65—70; кв с включениями и прожилковыми обособлениями; мг — 25—30; самородное железо, интерметаллиды
Немагнитная фракция	92,05	2,7	51,14	Кв — 95; п.шпат — 3,5; слюдястые минералы — 1; зерна кв с включениями мг, сростки кв с мг и ру
Руда	100,00	4,86	100,00	Сру~1,5; ру~3; мг~3(*); кв, п.шпат, альбит ~ 90
Примечание. Сокращения в таблице: мг — магнетит; кв — кварц; ру — пирит; сру — халькопирит; п.шпат — полевой шпат; (*) — расчетные данные				

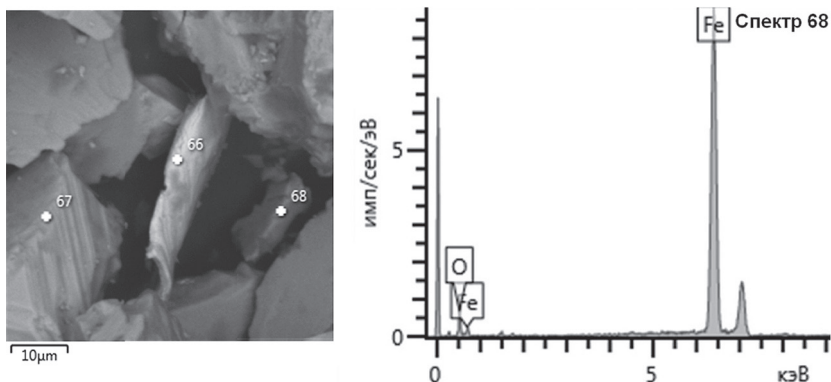


Рис. 3. SEM-изображения, спектры и элементный состав включений самородного железа в магнетите: спектр 68 (масс. %): Fe 97,2, O 2,8 — без примесей; спектр 67 (масс. %): Fe 95,7, Ti 0,3, Si 2,9, Al 1, O 4,7 — с примесью титана и шламовым покрытием; спектр 66 (масс. %): Fe 53,6, Ni 36,9, Mg 0,3, Ca 0,2, Si 0,8, Al 1,7, O 6,5 — сплав никеля и железа со шламами

Fig. 3. EM images, spectra and elemental composition of native iron inclusions in magnetite: spectrum 68 (wt.%): Fe 97.2, O 2.8 — without impurities; spectrum 67 (wt.%): Fe 95.7, Ti 0.3, Si 2.9, Al 1, O 4.7 — with titanium impurity and sludge coating; spectrum 66 (wt.%): Fe 53.6, Ni 36.9, Mg 0.3, Ca 0.2, Si 0.8, Al 1.7, O 6.5 — nickel-iron alloy with sludge

В результате магнитной сепарации из флотационных хвостов выделены концентраты магнитной фракции 1 и 2 с содержанием железа 63,85% и 50,31%, при извлечении 11,23% и 15,9%, соответственно (табл. 2).

Согласно данным электронно-микроскопических исследований, в составе концентратов преобладает магнетит (65—

85%) в виде свободных зерен и агрегатных скоплений, включений, прожилковых обособлений в кварце.

Немагнитная фракция (хвосты обогащения) представлена кварцем, полевым шпатом, слюдястыми минералами; выявлены зерна кварца с включениями магнетита, сложные сростания кварца с магнетитом и пиритом. Потери магне-

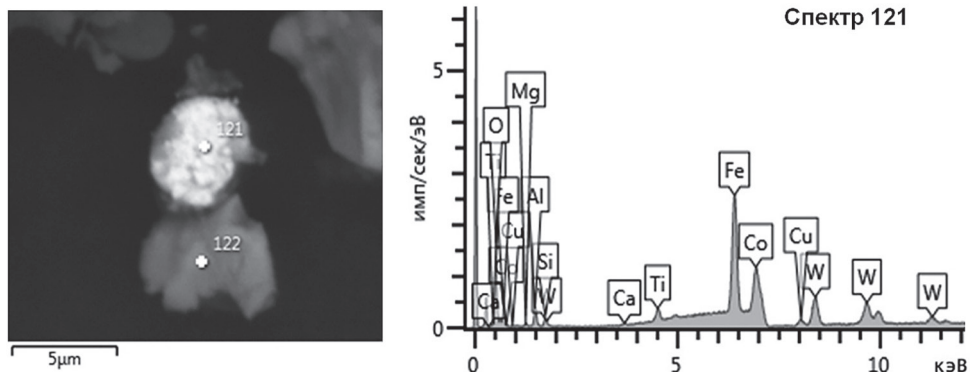


Рис. 4. SEM-изображение, спектры и элементный состав Ti-Co-Fe-вольфрамового интерметаллида и включения самородного железа в магнетите, спектр 121 (масс. %): W 44,1, Fe 28,4, Co 9,5, Cu 2,3, Ti 1,6, Al 1,2, Si 0,6, Mg 0,2, O 12,1 и спектр 122 (масс. %): Fe 90,9, Ti 0,6, V 0,3, Mn 0,4, Al 1, O 6,2

Fig. 4. SEM image, spectra and elemental composition of Ti-Co-Fe-tungsten intermetallic and native iron inclusion in magnetite, spectrum 121 (wt%): W 44.1, Fe 28.4, Co 9.5, Cu 2.3, Ti 1.6, Al 1.2, Si 0.6, Mg 0.2, O 12.1 and spectrum 122 (wt%): Fe 90.9, Ti 0.6, V 0.3, Mn 0.4, Al 1, O 6.2

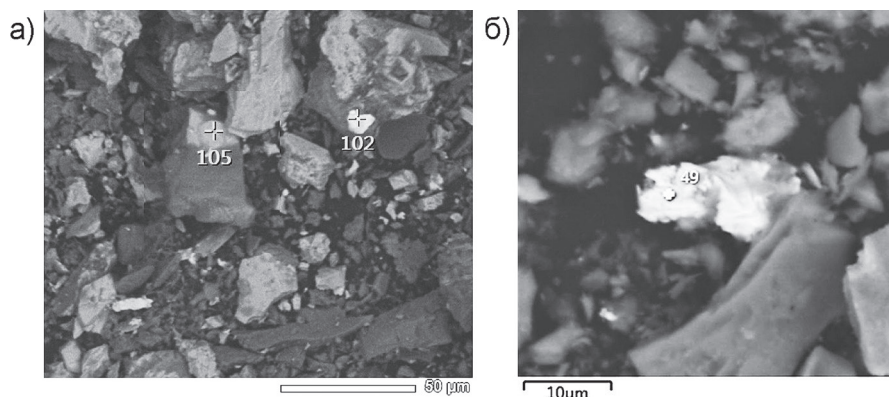


Рис. 5. Магнетитовый концентрат: магнетит с микровключениями самородного серебра (с примесью кадмия) и самородного железа, спектр 102 (масс. %): Ag 22,8, Cd 4,1, Fe 3,2, Ca 1,3, Si 8,8, Al 4,7, O 55,1, спектр 105 (масс. %): Fe 90,3, Si 0,5, Al 7,9, O 1,3 (а); интерметаллид со шламовым налетом, спектр 49 (масс. %): Fe 65,3, Cr 15,3, Ni 7,6, Mn 1,6, Cu 0,9, Si 2,9, Al 1, Na 0,7, O 4,7 (б)

Fig. 5. Magnetite concentrate: magnetite with microinclusions of native silver (with cadmium impurity) and native iron, spectrum 102 (wt.%): Ag 22.8, Cd 4.1, Fe 3.2, Ca 1.3, Si 8.8, Al 4.7, O 55.1, spectrum 105 (wt.%): Fe 90.3, Si 0.5, Al 7.9, O 1.3 (a); intermetallic with sludge coating, spectrum 49 (wt.%): Fe 65.3, Cr 15.3, Ni 7.6, Mn 1.6, Cu 0.9, Si 2.9, Al 1, Na 0.7, O 4.7 (b)

тита с немагнитной фракцией обусловлены:

- тонкой и весьма тонкой его вкрапленностью в минералы рудовмещающих пород и, как следствие, пониженными магнитными свойствами;
- сложным сростанием с сульфидными минералами, в частности с пиритом, большая часть которого в условиях коллективно-селективной флотации переходит в хвосты медного цикла.

Технологические показатели по флотационно-магнитной схеме и минеральный состав продуктов обогащения представлены в табл. 3.

Методами SEM в составе концентратов магнитной фракции в магнетите определены примеси (масс. %): Cr — 0,2–1,7; Ni — 0,8–1,1; Ti — 0,4–1,9; Mn — 0,2–1,2; V — 0,15–0,3; Cu — 0,1–0,5.

В магнетитовых концентратах выявлено самородное железо в виде свободных зерен и включений в магнетите (отн. масс. %): 86,2–96 (см. рис. 3).

В концентратах магнитной фракции определены интерметаллиды, в соста-

ве которых Fe, Cr, Ni, Ti, Mn с содержанием (отн. масс. %): Fe (60–82), Cr (0,4–20,5), Ni (3–8), Ti (0,4–1), Mn (0,5–3,5); идентифицирован Ti-Co-Fe-вольфрамовый интерметаллид (см. рис. 4).

В сложных сростаниях магнетита с кварцем определены включения аргентита и самородного серебра размером 2–12 мкм. Во включениях самородного серебра идентифицирована примесь кадмия (рис. 5).

Выводы

1. С целью повышения комплексности использования перерабатываемой Au-Cu-порфировой руды для извлечения магнетита, содержащего примеси Ti, Mn, Cr, V, Ni, предложена схема магнитной сепарации.

2. Полученные результаты свидетельствуют о возможности выделения магнетитовых концентратов с содержанием 63,85% и 50,31% Fe из хвостов флотационного обогащения руды крупностью 70,47% класса минус 0,071 мм. В результате обогащения руды по флотаци-

онно-магнитной схеме извлечение железа составило 49% при содержании в немагнитной фракции 2,7% Fe.

3. Методами сканирующей электронной микроскопии в магнетитовых концентратах установлено самородное железо в виде свободных зерен и включений в магнетите, выявлены интерметаллиды состава Fe, Cr, Ni, Ti, Mn с содержанием (отн. масс. %): Fe (60–82), Cr (0,4–20,5), Ni (3–8), Ti (0,4–1), Mn

(0,5–3,5), и Ti-Co-Fe-вольфрамовый интерметаллид. В сростках магнетита с кварцем определены микровключения аргентита и самородного серебра с примесью кадмия.

Исследования выполнялись с использованием оборудования и приборов Центра коллективного пользования «ЦИМС» ИГД ДВО РАН и электронных микроскопов ИТиГ ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L., Vikent'ev I. V., Aristov V. V., Lalomov A. V., Murashov K. Y.* Mineral resources of high-tech metals in Russia: State of the art and outlook // *Geology of Ore Deposits*. 2016, vol. 58, no. 2, pp. 83–103. DOI: 10.7868/S0016777016020027.

2. *John D. A., Taylor R. D.* By-products of porphyry copper and molybdenum deposits // *Reviews in Economic Geology*. 2016, vol. 18, no. 7, pp. 137–164. DOI: 10.5382/Rev.18.07.

3. *Sillitoe R. H.* Porphyry copper systems // *Economic Geology*. 2010, vol. 105, no. 1, pp. 3–41. DOI: 10.2113/gsecongeo.105.1.3.

4. *Плаксин И. Н.* Избранные труды. Обогащение полезных ископаемых. — М.: Наука, 1970. — 311 с.

5. *Седельникова Г. В., Романчук А. И., Богомолов В. А., Ибрагимов Н. В., Владыкин А. Ю.* Сырьевая база, состояние и перспективы переработки медно-порфировых руд за рубежом и в России / Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке. Плаксинские чтения — 2019: Международная конференция. — Иркутск, 2019. — 468 с.

6. *Brodbeck M., McClenaghan S., Kamber B. S., Redmond P.* Energy critical element and precious metal department in Cu-(Fe-) sulphides from the bingham canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit / 22nd EGU General Assembly, 2020. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-22017.

7. *Волков А. В., Сидоров А. А.* Недра российской Арктики — кладовая металлов для «зеленых» технологий // *Вестник Российской академии наук*. — 2020. — Т. 90. — № 1. — С. 56–62. DOI: 10.31857/S0869587320010144.



8. *Алтушкин И. А., Левин В. В., Сизиков А. В., Король Ю. А.* Опыт освоения месторождений медно-порфирового типа на Урале // *Записки горного института*. — 2017. — Т. 228. — С. 641–648. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.641.

9. *Canil D., Grondahl C., Lacourse T., Pisiak L. K.* Trace elements in magnetite from porphyry Cu-Mo-Au deposits in British Columbia, Canada // *Ore Geology Reviews*. 2016, vol. 72, part 1, pp. 1116–1128. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.007.

10. *Zarasvandi A., Rezaei M., Raith J. G., Taheri M., Asadi S., Heidari M.* Magnetite chemistry of the Sarkuh Porphyry Cu deposit, Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. A record of deviation from the path sulfide mineralization in the porphyry copper systems // *Journal of Geochemical Exploration*. 2023, vol. 249, no. 5–6, article 107213. DOI: 10.1016/j.gexplo.2023.107213.

11. *Mavrogenatos C., Voudouris P., Berndt J., Klemme S., Zaccarini F., Spry P. G., Melfos V., Taranatola A., Keith M., Klemm R., Haase K.* Trace elements in magnetite from the Pagoni Rachi porphyry prospect, NE Greece: Implications for ore genesis and exploration // *Minerals*. 2019, vol. 9, article 725. DOI: 10.3390/min9120725.

12. *Guo J.-H., Leng C.-B., Zhang X.-C., Zafar T., Chen W. T., Zhang W., Tian Z.-D., Tian F., Lai C.-K.* Textural and chemical variations of magnetite from porphyry Cu-Au and Cu skarn deposits in the Zhongdian region, northwestern Yunnan, SW China // *Ore Geology Reviews*. 2020, vol. 116, article 103245. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.103245.

13. Чантурия В. А., Бочаров В. А. Современное состояние и основные направления развития комплексной переработки руд цветных металлов // Цветные металлы. — 2016. — № 11. — С. 11–18. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01.
14. Баранов В. Ф. Проекты новых действующих медных фабрик — типы схем, выбор оборудования, отраслевые тенденции // Обогащение руд. — 2021. — № 1. — С. 44–52. DOI: 10.17580/or.2021.01.08.
15. Кузнецова И. А., Максимов И. И. Разработка технологии обогащения медно-порфировых руд Томинского месторождения // Обогащение руд. — 2021. — № 2. — С. 9–14. DOI: 10.17580/or.2021.02.02.
16. Секисов А. Г., Рассказова А. В., Конарева Т. Г. Кучное выщелачивание первичных и смешанных комплексных медных руд с использованием активационного предоокисления // Горный журнал. — 2024. — № 6. — С. 71–76. DOI: 10.17580/gzh.2024.06.11.
17. Gurman M. A., Shcherbak L. I. Process mineralogy of the Malmyzh deposit // Journal of Mining Science. 2023, vol. 59(1), pp. 148–156. DOI: 10.1134/S1062739123010167.
18. Rasskazov I. Yu., Gurman M. A., Shcherbak L. I. The genetic features and flotation properties of porphyry-copper-gold ore (Malmyzh Deposit, Khabarovsk Krai, Russia) // Doklady Earth Sciences, 2023, vol. 531. DOI: 10.1134/S1028334X23601748.
19. Пелевин А. Е. Оценка целесообразности дообогащения отвальных хвостов переработки руд Гусевгорского месторождения // Обогащение руд. — 2023. — № 1. — С. 38–45. DOI: 10.17580/or.2023.01.06.
20. Gurman M. A., Shcherbak L. I. Process mineralogy and pre-treatment of the poperechny deposit magnetite ore // Journal of Mining Science. 2018, vol. 54(3), pp. 497–506. DOI: 10.1134/S1062739118033918.  

REFERENCES

1. Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L., Vikent'ev I. V., Aristov V. V., Lalomov A. V., Murashov K. Y. Mineral resources of high-tech metals in Russia: State of the art and outlook. *Geology of Ore Deposits*. 2016, vol. 58, no. 2, pp. 83–103. DOI: 10.7868/S0016777016020027.
2. John D. A., Taylor R. D. By-products of porphyry copper and molybdenum deposits. *Reviews in Economic Geology*. 2016, vol. 18, no. 7, pp. 137–164. DOI: 10.5382/Rev.18.07.
3. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems. *Economic Geology*. 2010, vol. 105, no. 1, pp. 3–41. DOI: 10.2113/gsecongeo.105.1.3.
4. Plaksin I. N. *Izbrannyye trudy. Obogashchenie poleznykh iskopaemykh* [Selected works. Mineral processing], Moscow, Nauka, 1970, 311 p.
5. Sedel'nikova G. V., Romanchuk A. I., Bogomolov V. A., Ibragimova N. V., Vladykin A. Yu. Raw material base, state and prospects for processing copper porphyry ores abroad and in Russia. *Problemy i perspektivy effektivnoy pererabotki mineral'nogo syr'ya v 21 veke. Plakinskie chteniya – 2019: Mezhdunarodnaya konferentsiya* [Problems and prospects for efficient processing of mineral raw materials in the 21st century. Plaksin Readings – 2019: International Conference], Irkutsk, 2019, 468 p. [In Russ].
6. Brodbeck M., McClenaghan S., Kamber B. S., Redmond P. Energy critical element and precious metal deportment in Cu-(Fe-) sulphides from the bingham canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit. *22nd EGU General Assembly*, 2020. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-22017.
7. Volkov A. V., Sidorov A. A. The depths of the Russian Arctic are a storehouse of metals for «green» technologies. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. 2020, vol. 90, no. 1, pp. 56–62. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0869587320010144.
8. Altushkin I. A., Levin V. V., Sizikov A. V., Korol Yu. A. Experience of development of Porphyry Copper type deposits in the Urals. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 228, pp. 641–648. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.641.
9. Canil D., Grondahl C., Lacourse T., Pisiak L. K. Trace elements in magnetite from porphyry Cu-Mo-Au deposits in British Columbia, Canada. *Ore Geology Reviews*. 2016, vol. 72, part 1, pp. 1116–1128. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.007.
10. Zarasvandi A., Rezaei M., Raith J. G., Taheri M., Asadi S., Heidari M. Magnetite chemistry of the Sarkuh Porphyry Cu deposit, Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. A record of deviation from the path sulfide mineralization in the porphyry copper systems. *Journal of Geochemical Exploration*. 2023, vol. 249, no. 5–6, article 107213. DOI: 10.1016/j.gexplo.2023.107213.

11. Mavrogonatos C., Voudouris P., Berndt J., Klemme S., Zaccarini F., Spry P. G., Melfos V., Tarantola A., Keith M., Klemm R., Haase K. Trace elements in magnetite from the Pagoni Rachi porphyry prospect, NE Greece: Implications for ore genesis and exploration. *Minerals*. 2019, vol. 9, article 725. DOI: 10.3390/min9120725.

12. Guo J.-H., Leng C.-B., Zhang X.-C., Zafar T., Chen W. T., Zhang W., Tian Z.-D., Tian F., Lai C.-K. Textural and chemical variations of magnetite from porphyry Cu–Au and Cu skarn deposits in the Zhongdian region, northwestern Yunnan, SW China. *Ore Geology Reviews*. 2020, vol. 116, article 103245. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.103245.

13. Chanturiya V. A., Bocharov V. A. Current state and main trends in the development of complex processing of non-ferrous metal ores. *Tsvetnye Metally*. 2016, no. 11, pp. 11 – 18. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01.

14. Baranov V. F. Projects of new operating copper factories — types of circuits, equipment selection, industry trends. *Obogashchenie Rud*. 2021, no. 1, pp. 44 – 52. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.01.08.

15. Kuznecova I. A., Maksimov I. I. Development of Copper Porphyry ores processing of the Tominsky deposit. *Obogashchenie Rud*. 2021, no. 2, pp. 9 – 14. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.02.02.

16. Sekisov A. G., Rasskazova A. V., Konareva T. G. Heap leaching of primary and mixed complex copper ores using activation preoxidation. *Gornyi Zhurnal*. 2024, no. 6, pp. 71 – 76. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2024.06.11.

17. Gurman M. A., Shcherbak L. I. Process mineralogy of the Malmyzh deposit. *Journal of Mining Science*. 2023, vol. 59(1), pp. 148 – 156. DOI: 10.1134/S1062739123010167.

18. Rasskazov I. Yu., Gurman M. A., Shcherbak L. I. The genetic features and flotation properties of porphyry–copper–gold ore (Malmyzh Deposit, Khabarovsk Krai, Russia). *Doklady Earth Sciences*, 2023, vol. 531. DOI: 10.1134/S1028334X23601748.

19. Pelevin A. E. Assessment of the feasibility of additional processing of tailings obtained in the processing of ores of the Gusevogorskoye deposit. *Obogashchenie Rud*. 2023, no. 1, pp. 38 – 45. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2023.01.06.

20. Gurman M. A., Shcherbak L. I. Process mineralogy and pre-treatment of the poperechny deposit magnetite ore. *Journal of Mining Science*. 2018, vol. 54(3), pp. 497 – 506. DOI: 10.1134/S1062739118033918.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гурман Маргарита Анатольевна¹ — канд. техн. наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: mgurman@yandex.ru,

Корнеева Светлана Ивановна¹ — канд. техн. наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: s_korneeva@mail.ru,

¹ Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН.

Для контактов: Гурман М.А., e-mail: mgurman@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Gurman¹, Cand. Sci. (Eng),

Leading Researcher,

e-mail: mgurman@yandex.ru,

S.I. Korneeva¹, Cand. Sci. (Eng),

Leading Researcher, e-mail: s_korneeva@mail.ru,

¹ Mining Institute, Far East Branch,

Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia.

Corresponding author: M.A. Gurman, e-mail: mgurman@yandex.ru.

Получена редакцией 12.09.2024; получена после рецензии 10.10.2024; принята к печати 10.11.2024.

Received by the editors 12.09.2024; received after the review 10.10.2024; accepted for printing 10.11.2024.