

УДК (553.43 + 549.281) : 622.765

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ РУДНОГО ТЕЛА
МАЛМЫЖСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

М. А. Гурман, Л. И. Щербак

*Институт горного дела ДВО РАН,
E-mail: mgurman@yandex.ru, ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

Представлены результаты минералого-технологических исследований первичной золото-медно-порфировой руды участка Свобода Малмыжского месторождения Хабаровского края. Выявлены ее структурно-текстурные особенности, минеральный состав, формы нахождения золота и серебра с использованием комплекса аналитических методов. Определены характеристики руды, обуславливающие трудности ее селективной флотации. Приведены показатели флотационного извлечения Cu, Au, Ag в коллективном и медном циклах и оценены причины их потерь. Полученный медный концентрат обогащен золотом и серебром, включения минералов Bi, Te, Se и примеси In, Cd в халькопирите повышают ценность концентрата. Выделенный из хвостов коллективной флотации магнетит содержит включения платины (0.5–2.0 мкм) и примеси Ti, V, Mn, Cr, Cu.

Золото-медно-порфировая руда, халькопирит, пирит, коллективная флотация, медный цикл, концентрат, извлечение, медь, золото, серебро

DOI: 10.15372/FTPRPI20230116

В настоящее время востребованными становятся месторождения бедных медно-порфиновых руд, разработка которых ранее считалась экономически нерентабельной. Руды характеризуются низким содержанием меди и попутных компонентов, однако их промышленная ценность определяется большими запасами, комплексным составом (золото, серебро, молибден, селен, теллур, рений; отмечается присутствие металлов платиновой группы) [1–5]. На территории Хабаровского края осваивается крупнейшее в России Малмыжское месторождение золото-медно-порфиновых руд с содержанием, по данным Госдоклада 2021 г., Cu — 0.41 %, Au — 0.2 г/т. Согласно проекту Президиума ДВО РАН № 18-2-015, Институтами геологии и горного дела ДВО РАН выполнены совместные исследования первичных и окисленных руд Малмыжского месторождения с позиций геохимии, минералогии, геотехнологии [6–8]. Настоящие исследования направлены на выявление вещественного состава первичной золото-медно-порфиновой руды с низким содержанием меди и золота в связи с возможностью ее флотационного обогащения. Флотация — основной метод обогащения медно-порфиновых

Исследования выполнялись на базе ЦКП “ЦИМС” ХФИЦ ДВО РАН, финансирование осуществлялось по проекту № 075-15-2021-663.

руд. Технология их переработки должна обеспечивать извлечение меди и предусматривать возможность извлечения золота и попутных компонентов [1–3, 9–11]. Реагентные режимы и схемы флотации зависят от вещественного состава руды и определяются характером вкрапленности и сростаний сульфидных минералов меди и железа, формой присутствующей меди, содержанием пирита, степенью окисленности сульфидов меди, составом вмещающих пород, влияющих на флотируемость разделяемых минералов [2, 10, 12–17]. Условия флотации Au–Cu-порфировой руды также определяются характеристикой присутствующего золота: формами нахождения Au, его крупностью, состоянием поверхности зерен или кристаллов; ассоциацией золота с сульфидами меди и железа [1–4, 11, 18].

В связи с низким содержанием в руде основных ценных компонентов меди и золота и неравномерностью их распределения изучение вещественного состава золото-медно-порфировой руды и продуктов обогащения предполагает использование комплекса современных физико-химических методов. Исследованиями [19, 20] показано, что идентификация тонко вкрапленных сульфидных минералов, выявление их сростаний и включений, элементов-примесей, распознавание золота (серебра) и его носителей может осуществляться только при большом увеличении методами сканирующей электронной микроскопии (SEM). благородные металлы можно определить только после предварительной концентрации тонкоизмельченной руды: флотационными методами — золото и серебро, магнитными — платину. О наличии платины и палладия (до 0.2 г/т) в рудах Малмыжского золото-медно-порфинового месторождения изложено в [6], данные о минеральных формах палладия сообщены в [21], при исследовании руды зоны окисления в ИГД ДВО РАН платина выделена в виде свободных зерен (0.2–0.15 мм) [7]. Определение форм нахождения золота, серебра, металлов платиновой группы в бедной Au–Cu-порфировой руде имеет важное значение для повышения комплексности использования сырья и понимания причин технологических потерь.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование вещественного состава и структурно-текстурных особенностей руды Малмыжского золото-медно-порфинового месторождения выполнялось на малой технологической пробе, отобранной из керна скважины 218 (рудный интервал — 343–351 м участка Свобода), удаленной на 600 м к северо-востоку от границы рудного поля. Петрографическое, минералогическое и минераграфическое изучение руды, рудовмещающих пород и продуктов обогащения осуществлялось с применением оптической и электронной микроскопии. Использовались стереомикроскопы Stemi 2000C, Stemi DV4; поляризационный микроскоп Amager 2m; растровый электронный микроскоп JEO1 JCM-6000PLUS (ИГД ДВО РАН), VEGA TESCAN (ИТиГ ДВО РАН). Технологические исследования проводились на лабораторном оборудовании: планетарная мельница “Пульверизетте-5”; флотомашины с объемом камер 0.25, 0.5, 1 л. Реагентный режим коллективно-селективной флотации: жидкое стекло — 150 г/т ($t_{агит}$ — 2 мин), диизобутилдитиофосфат натрия (ДТФ) в основной флотации — 20 г/т ($t_{агит}$ — 1 мин), контрольной — 5 г/т; сосновое масло — 10 г/т ($t_{агит}$ — 0.5 мин); активированный уголь — 200 г/т ($t_{агит}$ — 10 мин), динатрийфосфат — 150 г/т ($t_{агит}$ — 5 мин); время флотаций — 10 мин. Содержание Cu, Au, Ag в исходной руде и продуктах обогащения определялось с использованием следующих методов анализа: атомно-абсорбционного и фотоколориметрического (спектрофотометры AA6200, AA7000 Shimadzu и UV-VIS Spectrophotometer UV2600), титриметрического и гравиметрического, рентгенофлуоресцентного (Mobilab X-50, InnovXSystems), атомно-эмиссионного (спектрометр “Гранд” GR 15050).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основными химическими элементами руды являются: Cu — 0.44–0.5 %, Au — 0.39–0.44 г/т, Ag — 1.13–1.64 г/т, Fe_{общ} — 4.5 %; S — 1.94 %. Медь присутствует в сульфидной форме, содержание окисленной меди составляет 0.014 %. Выявлена неравномерность распределения основных ценных компонентов меди, золота, серебра в исходной руде; концентрация Cu, Au, Ag наблюдается в тонких классах [22]. Доля оксидов в руде, %: SiO₂ — 74.2; TiO₂ — 0.47; Al₂O₃ — 15.15; MgO — 1.12; CaO — 1.14; Na₂O — 0.53; K₂O — 0.8. Попутные элементы присутствуют в малых количествах, %: Bi — 0.0001; Co — 0.008; Cr — 0.003; Mn — 0.04; Mo — 0.0018; Ni — 0.0025; Sn — 0.0003; V — 0.013; W — 0.08; Zn — 0.008, Pb — 0.0016.

В составе исходной руды преобладают рудовмещающие метасоматиты: кварцевые, альбит-калишпат-кварцевые, амфибол-калишпат-кварцевые и хлорит-альбит-кварцевые. Основной минерал — кварц неравномерно зернистый (0.01–0.2 мм); подчиненные минералы: калишпат, альбит (0.01–0.5 мм), актинолит, хлорит (0.01–0.2 мм). По рудовмещающим метасоматитам развиваются в небольшом количестве (0.5–1.5 %) монтмориллонит, каолинит, гидрослюда.

Структура руды неравномерно зернистая, тонко- и микрзернистая, пойкилитовая, эвтектоидная (распада твердого раствора). Текстура вкрапленная, поровая, с рассеянным распределением зерен и агрегатов рудных минералов в метасоматитах, иногда микротрещиноватая и микробрекчиевая.

Основным минералом меди является халькопирит; отмечается присутствие борнита, ковеллина, халькозина. Содержание халькопирита в исходной руде составляет 1.3–1.5 %. Выделено две его генерации. Халькопирит I образует редкую мелкозернистую, поровую вкрапленность (0.005–0.1 мм), тонкие прожилки в метасоматитах (0.01–0.2 мм) (рис. 1а), тонкозернистые агрегаты и редкие кристаллы (0.5–1 мм) тетраэдрической формы. Халькопирит II наблюдается в виде кристаллов (0.1–0.5 мм) тетраэдрического облика, светло-бурой окраски с сильным металлическим блеском, нередко с четкой штриховкой на гранях, без вторичных изменений, встречается включенным в белый гранулированный кварц.

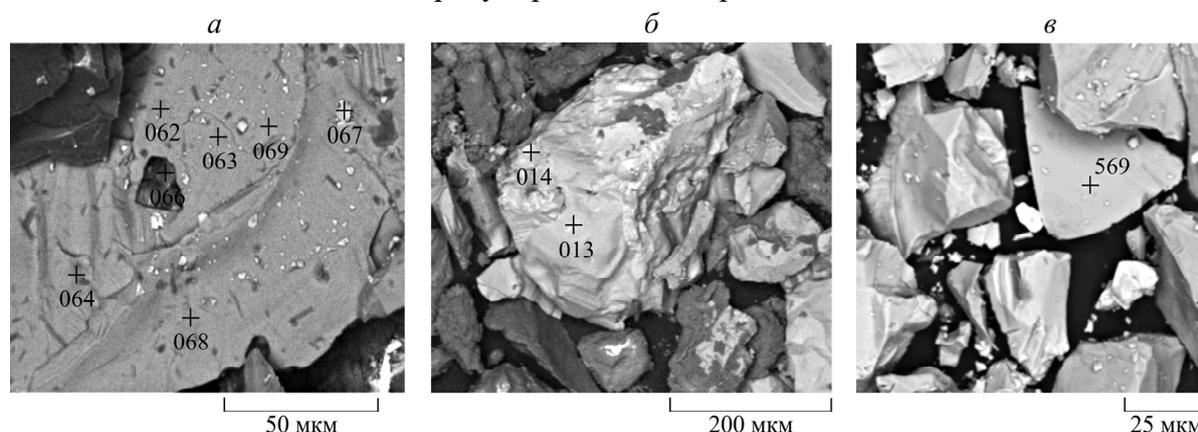


Рис. 1. Структурно-текстурные особенности рудных минералов: а — микрзернистая поровая вкрапленность халькопирита в метасоматите (спектры 062–069); б — микрослоистое срастание пирита и халькопирита, масс. %: Fe — 31, S — 69 (спектр 013); Cu — 19, Fe — 34, S — 45, Al — 1, Si — 1 (спектр 014), часть зерна интенсивно трещиноватая; в — микровключения халькопирита в пирите, масс. %: Cu — 33.3, Fe — 26.4, S — 22.2, O — 4.5, C — 13.1 (спектр 569)

Нередко отмечается халькопирит в тесном срастании с пиритом, с которым образует неравномерную вкрапленность, агрегатные обособления, микро- и тонкие прожилки 0.01–0.2 мм в метасоматитах. Обнаружена слоистость с чередованием микропрослоев халькопирита и пирита, а также микротрещиноватость (рис. 1б, в). В халькопирите I выявлены микровключения

золота, минералов свинца, молибдена, висмута, теллура, селена. Слабые вторичные изменения выражены бурой побелостью на плоскостях кристаллов и лимонитизацией по трещинкам, иногда халькопирит частично замещен черным халькозином.

Пирит — преобладающий рудный минерал с содержанием в исходной руде 2.8–3% наблюдается в двух генерациях. Пирит I представляет тонкокристаллическую, агрегатную, реже гнездовидную вкрапленность (0.1–1.5 мм) с преобладанием пентагондодекаэдрических кристаллов. В пирите I фиксируются включения магнетита с примесью никеля, хрома, марганца, титана, меди. Вторичные изменения проявлены иногда в виде бурых пленок лимонита на плоскостях и по трещинам. Пирит II характеризуется пентагондодекаэдрическими, реже кубическими кристаллами (0.05–1 мм) иногда со штриховкой на гранях, которые образуют четкую вкрапленность в белом гранулированном кварце. Вторичных изменений не наблюдается.

Содержание магнетита в исходной руде не превышает 1.5%. Он представлен мелкими гнездовидными обособлениями и редкими прожилками тонкозернистых плотных масс (0.2–1.5 мм), наблюдается в сростании с пиритом и халькопиритом.

Золото выявлено в тонкоизмельченных флотационных концентратах [20] в свободном виде (5–40 мкм), в сростаниях и включениях в халькопирите (1–20 мкм) и на границе зерен халькопирита и пирита (4–5 мкм) (рис. 2). Свободное золото представлено ромбоэдрическими, редко кубическими микрокристаллами, образующими микросростки; сростания и включения золота в халькопирите также представлены микрокристаллами. Серебро постоянно присутствует в виде примеси в золоте (2–33% Ag), клаусталите (PbSe), во включениях в галените, редко в пирите.

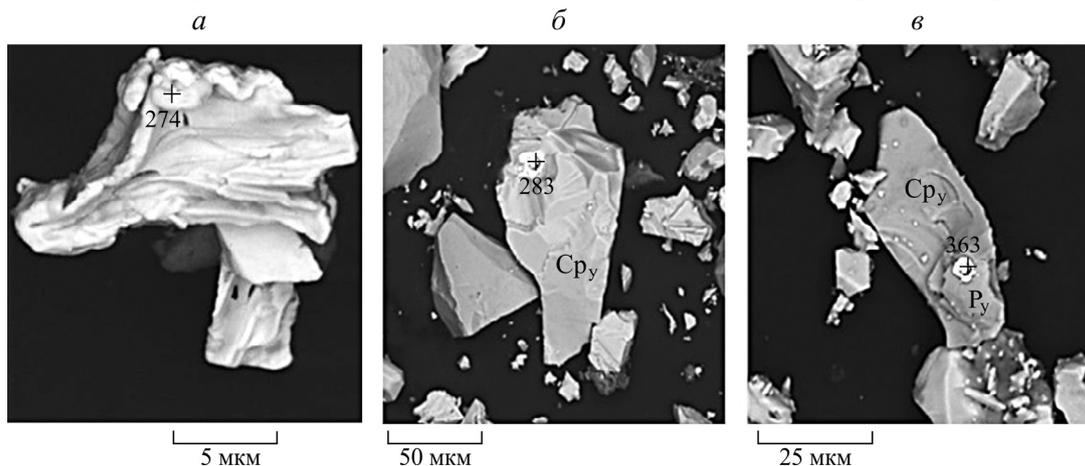


Рис. 2. Золото из медных концентратов первичной золото-медно-порфировой руды в виде: *а* — свободных зерен, масс. %: Au — 56.7, Ag — 20.6, Cu — 5.5, Fe — 2.8, C — 10.1, O — 4.2 (спектр 274); *б* — включений в халькопирите, масс. %: Au — 60.9, Ag — 21.5, Cu — 1.3, Fe — 1.1, Al — 0.6, C — 7.3, O — 7.3 (спектр 283); *в* — включений на границе зерен халькопирита и пирита, масс. %: Au — 59.6, Ag — 29, Cu — 1.3, Fe — 2.3, C — 6.6, O — 1.2 (спектр 363)

Характерными особенностями исследуемой Au–Cu-порфировой руды, обуславливающими трудность ее селективной флотации, являются:

— тесное сростание части халькопирита с пиритом в виде неравномерной вкрапленности и агрегатных обособлений, микропрослоев в метасоматитах; количественное преобладание пирита над халькопиритом ($P_y/C_{py} \sim 2.0–2.2$ — в исходной руде, $P_y/C_{py} \sim 2.7–1.7$ — в сульфидных концентратах) и более крупной размерностью пирита;

— присутствие двух генераций халькопирита и пирита, отличающихся формой и размером зерен, неоднородностью поверхности, присутствием элементов-примесей и тонких включений минералов Ag, Pb, W, Mo, Bi, Te, Se;

— наличие тонкодисперсного золота в халькопирите и серебра в галените, ассоциированных с пиритом, и локализация золота на границе зерен халькопирита и пирита.

Исследованиями по флотации диизобутилдитиофосфатом натрия в открытом цикле установлено, что для более полного раскрытия ассоциаций сульфидных минералов требуется тонкое измельчение руды, оптимальная крупность питания составила 85–87 % кл. – 0.071 мм [22]. На измельченной до крупности 87.1 % кл. – 0.071 мм (или 66 % кл. – 0.044 мм) руде в условиях, принятых отдельными опытами, выполнялась серия экспериментов в замкнутом цикле по схеме коллективной флотации с последующим разделением коллективного концентрата [18, 23] при pH 6.8–7.2 — в коллективной флотации, pH 8.74–8.94 — в медной селекции.

Схема включает: измельчение, коллективную сульфидную флотацию, контрольную флотацию хвостов и перечистку объединенного сульфидного концентрата; сульфидный промпродукт возвращается в измельчение. Перед медной селекцией осуществлялось перемешивание коллективного концентрата (и одновременной аэрацией) с активным углем, затем с динатрийфосфатом. Медный цикл состоял из основной, контрольной медной флотации, двух перечисток медного концентрата; промпродукт I перечистки Cu концентрата объединялся с концентратом контрольной медной флотации и возвращался на основную медную флотацию; промпродукт II перечистки Cu концентрата — на перечистку I. Пенный продукт второй перечистки является медным концентратом; хвосты контрольной флотации — медные хвосты. Перемешивание пульпы перед медной селекцией с использованием активного угля проводилось для удаления избытка собирателя из жидкой фазы пульпы и частичной десорбции собирателя с поверхности сульфидных минералов [18, 23, 24], аэрация — для окисления и понижения флотиремости пирита [1, 2, 9, 10] в слабощелочной среде (добавка динатрийфосфата).

Согласно полученным данным, коллективная флотация с ДТФ при крупности питания 87.1 % кл. – 0.071 мм при pH 6.8–7.2 обеспечивает выделение концентрата с извлечением Cu 91.3 % и содержанием Cu 5.8 % (рис. 3) и хвостов флотации с содержанием Cu 0.03 %.

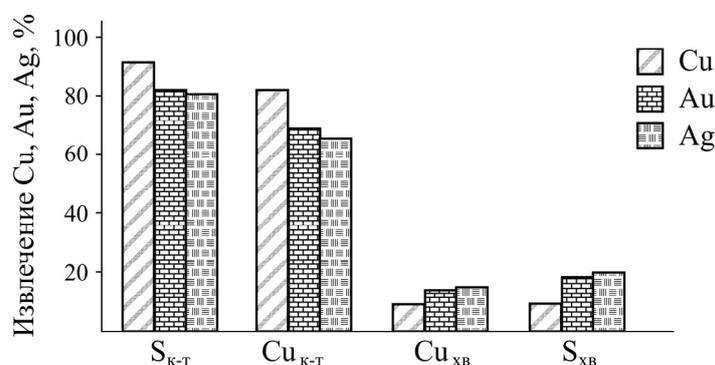


Рис. 3. Извлечение меди, золота, серебра в продукты коллективно-селективной флотации: $S_{к-т}$ и $S_{хв}$ — концентрат и хвосты коллективного цикла флотации; $Cu_{к-т}$ и $Cu_{хв}$ — концентрат и хвосты медного цикла

При этом извлечение халькопирита и пирита в сульфидный концентрат по расчетным данным составляет ~91 и 78 % соответственно (рис. 4). Более высокое извлечение халькопирита обусловлено большей селективностью ДТФ по отношению к пириту, неодинаковой флотиремостью пирита I и II генераций [2, 10], сростанием пирита с магнетитом. При данной крупности измельчения из-за неравномерной вкрапленности сульфидных минералов во вмещающих метасоматитах потери в хвостах могут происходить как за счет недостаточного измельчения крупных зерен, так и переизмельчения мелких частиц. Извлечение золота и серебра в коллективный кон-

центрат составляет 81.7 и 80 % при содержании 5 г/т Au и 14.3 г/т Ag соответственно. Вероятными причинами потерь золота в коллективном цикле могут являться тонкодисперсность свободного золота, наличие шламовых покрытий на его поверхности, срастание золотосодержащего халькопирита с пиритом, тонкая вкрапленность сульфидов во вмещающих породах.

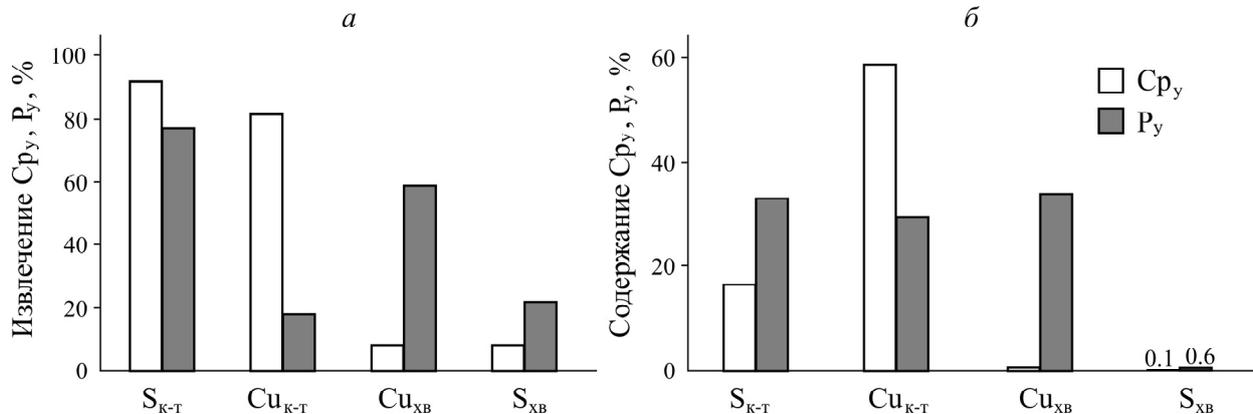


Рис. 4. Извлечение (а) и содержание (б) халькопирита (C_{py}) и пирита (P_y) в продуктах коллективно-селективной флотации первичной золото-медно-порфировой руды

Результаты флотации коллективного сульфидного концентрата в медном цикле в слабощелочной среде при pH 8.74–8.94 свидетельствуют о возможности выделения суммарного медного концентрата с содержанием Cu 20.2 % при извлечении 81.9 % соответственно (рис. 3).

По расчетным данным, извлечение халькопирита в медный концентрат составило 82 %, пирита — 18 % при содержании халькопирита 60 %, пирита — 30 % (рис. 4). Несмотря на подавление пирита в медном цикле, часть его переходит в концентрат из-за тесных срастаний с халькопиритом, наличия включений халькопирита и примесей меди (пирит I), повышающих его флотационную активность.

Извлечение золота и серебра в медный концентрат составляет 67.5 и 65.2 % при содержании Au 16.2 и Ag 45 г/т соответственно. Идентифицированное методами SEM извлеченное золото представлено свободными зернами и в виде срастаний и включений в халькопирите. Полученные данные свидетельствуют об эффективности используемого собирателя ДТФ как для флотации халькопирита, содержащего золото и серебро, так и для частиц тонкого свободного золота. Микровключения минералов Bi, Te, Se и примеси In, Cd, выявленные в халькопирите, повышают ценность медного концентрата.

Выход хвостов в медном цикле флотации составляет 4.65 % при содержании Cu — 0.8 %, Au — 1.2 г/т, Ag — 3.6 г/т, в них остается, %: Cu — 9.3; Au — 14.2; Ag — 14.8. Извлечение пирита в медные хвосты — 60 % при содержании 34 % P_y, извлечение халькопирита — 9 % при содержании 3 % C_{py}. Потери Cu в медном цикле связаны: с недоизмельчением руды, часть халькопирита остается в сростках с вмещающими минералами (рис. 5а); со сложным срастанием разделяемых минералов — при депрессии пирита, ассоциированные с ним зерна халькопирита переходят в хвосты; с присутствием двух генераций халькопирита, которые могут отличаться флотационной активностью из-за размеров зерен, неоднородности поверхности, тонких включений магнетита, шеелита.

В медных хвостах присутствуют сростки пирита с кварцем и магнетитом (с примесью Cr, Ni, V, Ti, Mn, Cu); установлены включения шеелита, молибденита, галенита в пирите. Выявленное золото имеет покрытия и тонкие шламовые налеты гидроокислов железа и алюмосиликатов на поверхности, что затрудняет его флотацию (рис. 5б).

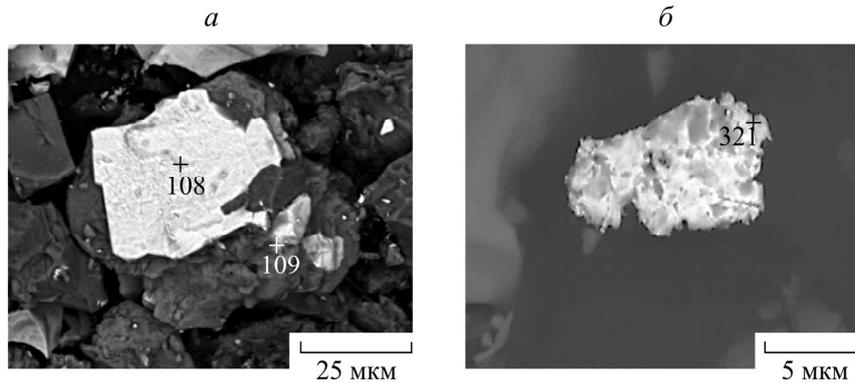


Рис. 5. Халькопирит и золото в хвостах медной флотации: *а* — зерна халькопирита (10–40 мкм) в сростаниях с кварцем, не вскрытые измельчением, масс. %: Cu — 38.1, Fe — 33.7, S — 28.2 (спектр 108); Cu — 32.7, Fe — 30.3, S — 37.0 (спектр 109); *б* — тонкопластинчатое зерно золота (5×10 мкм) с налетом гидроокислов железа и алюмосиликатов на поверхности, масс. %: Au — 36.6, Ag — 7.4, Cu — 6.6, Fe — 17.0, Mn — 1.3, Ti — 3.6, Si — 2.1, Al — 1.5, C — 14.7, O — 9.2 (спектр 321)

Платина выявлена методами SEM в составе медного концентрата и в магнитных фракциях, выделенных в питании флотации и из хвостов коллективного цикла. В медном концентрате платина идентифицирована как примесь в золоте, в питании флотации — в виде примеси в микросростке кварца с магнетитом (рис. 6*а*). В хвостах коллективного цикла микровключения платины размером 0.5–2.0 мкм установлены в магнетите, где присутствуют и примеси Sr, Ni, V, Ti, Mn, Cu. Для повышения полноты извлечения ценных компонентов целесообразно выделение магнетита из хвостов коллективной флотации магнитной сепарацией [25].

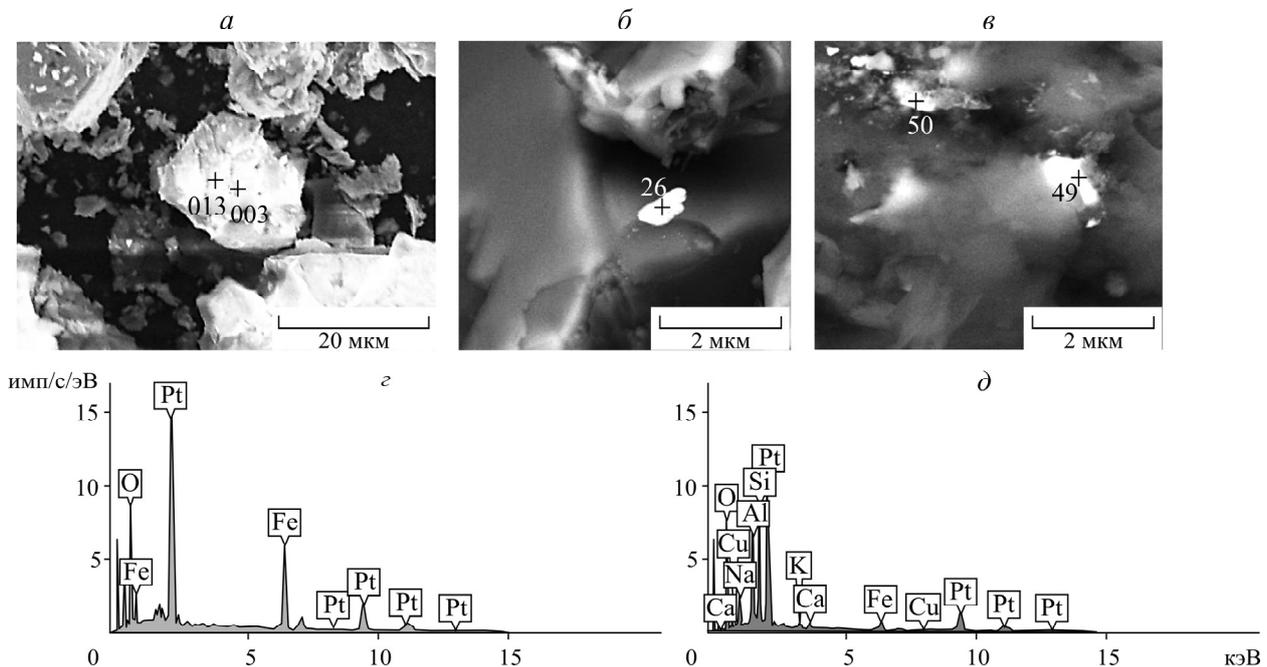


Рис. 6. Примеси и микровключения платины в составе магнитной фракции: *а* — микросросток кварца с магнетитом, содержащим примесь платины, масс. %: Pt — 7.0, Zr — 25.1, Si — 12.7, O — 55.2 (спектр 003); Pt — 27.3, P — 15.2, Si — 14.1, O — 43.4 (спектр 013); *б, в* — включения платины в магнетите, масс. %: Pt — 52.1, Fe — 25.2, O — 22.7 (спектр 26); Pt — 42.7, Fe — 3.8, Cu — 0.4, Si — 11.9, Al — 9.0, K — 0.5, Ca — 1.7, Na — 3.1, O — 26.9 (спектр 49); Pt — 18.3, Fe — 3.5, Cu — 0.4, Ti — 0.2, Si — 18.8, Al — 12.1, K — 0.5, Ca — 2.2, Na — 5, O — 38.7 (спектр 50); *г, д* — микровключения платины в магнитной фракции спектров 26 и 49 соответственно

Согласно полученным результатам, дальнейшее повышение извлечения меди и попутных золота и серебра может осуществляться за счет: применения дополнительного сильного собирателя в коллективном цикле флотации с целью доизвлечения пирита и связанного с ним халькопирита, в том числе золотосодержащего; включения операции доизмельчения коллективного концентрата; переработки хвостов медной флотации.

ВЫВОДЫ

Выявлены структурно-текстурные особенности и минеральный состав золото-медно-порфировой руды, характеризующейся очень низким содержанием ценных компонентов. Определен рассеянный, поровый и агрегатный характер вкрапленности (2–100 мкм) в метасоматитах основного минерала меди — халькопирита, его сложные сростания с пиритом, для раскрытия которых требуется тонкое измельчение.

Идентифицированы формы нахождения золота, серебра, платины в руде: Au — свободные зерна (5–40 мкм), сростания и включения в халькопирите (1–20 мкм) и на границе зерен халькопирита и пирита; Ag — постоянная примесь в золоте (2–33 % Ag) и во включениях (1–7 мкм) галенита в сульфидах; Pt — как примесь в золоте в составе медного концентрата и в виде включений в магнетите размером 0.5–2.0 мкм.

Из руды с содержанием меди — 0.4 %, золота — 0.39 г/т, серебра — 1.12 г/т в коллективном цикле извлекается 91.3 % Cu, 81.7 % Au, 80 % Ag; извлечение в медный концентрат, % — 81.9 Cu, 67.5 Au, 65.1 Ag при содержании меди 20.24 %, концентрат обогащен золотом 16.25 г/т и серебром 45 г/т; включения минералов Bi, Te, Se и примеси In, Cd придают дополнительную ценность медному концентрату.

Показана эффективность использования селективного к пириту собирателя диизобутилдитиофосфата натрия для флотации халькопирита и свободного золота. В концентратах выявлено золото свободное и ассоциированное с халькопиритом. Для улучшения условий разделения коллективных концентратов перед селективной флотацией применялись методы десорбции собирателя активным углем и аэрации в слабощелочной среде. Включения Pt, примеси Cr, Ni, Co, V, Ti, Mn, установленные в магнетите, предопределяют целесообразность магнитной сепарации для повышения полноты извлечения ценных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Плаксин И. Н.** Избранные труды. Обогащение полезных ископаемых. — М.: Наука, 1970. — 311 с.
2. **Абрамов А. А.** Технологии переработки и обогащения руд цветных металлов. Кн. 2. — М.: МГГУ, 2005. — 575 с.
3. **Bulatovic S. M., Wyslouzil D. M., and Kant C.** Operating practices in the beneficiation of major porphyry copper/molybdenum plants from Chile: Innovated technology and opportunities, a review, *Miner. Eng.*, 1998, Vol. 11, Issue 4. — P. 313–331.
4. **Chryssoulis S.** Using mineralogy to optimize gold recovery by flotation, *JOM*, 2001, Vol. 53, No. 12. — P. 48–50.
5. **Алтушкин И. А., Левин В. В., Сизиков А. В., Король Ю. А.** Опыт освоения месторождений медно-порфирового типа на Урале // *Зап. ГИ.* — 2017. — Т. 228. — С. 641–648.
6. **Иванов В. В., Кононов В. В., Игнатъев Е. К.** Минералого-геохимические особенности рудной минерализации в метасоматитах золотомедного рудного поля Малмыж (Нижнее Приамурье) // *Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии: VIII Косыгинские чтения.* — Владивосток, 2013. — С. 258–261.

7. **Крюков В. Г., Лаврик Н. А., Литвинова Н. М., Степанова В. Ф.** Типоморфные минералы зоны окисления золото-медно-порфировых руд Малмыжского месторождения (участок Свобода) // Гео-ресурсы. — Т. 21. — № 3. — 2019. — С. 91–98.
8. **Sekisov A. G. and Rasskazova A. V.** Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit, *Miner.*, 2021, Vol. 11, No. 1.
9. **Годэн А. М.** Флотация. — М: ГНТИ, 1959. — 655 с.
10. **Глембоцкий В. А., Классен В. И.** Флотационные методы обогащения. — М.: Недра, 1981. — 304 с.
11. **Матвеева Т. Н., Громова Н. К., Ланцова Л. Б.** Экспериментальное обоснование применения собирателей класса циклических и алифатических дитиокарбаматов для извлечения золотоносных сульфидов из комплексных руд // ФТПРПИ. — 2021. — № 1. — С. 137–145.
12. **Изоитко В. М.** Технологическая минералогия и оценка руд. — СПб.: Наука, 1997. — 532 с.
13. **Игнаткина В. А., Бочаров В. А., Макавецкас А. Р., Каюмов А. А., Аксенова Д. Д., Хачатрян Л. С., Фищенко Ю. Ю.** Рациональная переработка упорных медьсодержащих руд // Цв. металлургия. — 2018. — № 3. — С. 6–18.
14. **Yushina T. I., Purev B., D'Elia Yanes K. S., and Malofeeva P. R.** Improvement of porphyry copper flotation efficiency with auxiliary collectors based on acetylene alcohols, *Eurasian Min.*, 2019, No. 1. — P. 25–30.
15. **Кондратьев С. А.** Собирательная сила и избирательность флотационного реагента // ФТПРПИ. — 2021. — № 3. — С. 133–147.
16. **Naumov D., Stamenov L., Gaydardzhiev S., and Bouzahzah H.** Coupling mineralogy with physicochemical parameters in view copper flotation efficiency improvement, *Physicochem. Probl. Miner. Process*, 2019, Vol. 55, No. 3. — P. 701–710.
17. **Lazic P., Niksic D., Tomanec R., Vucinic D., and Cveticanin L.** Chalcopyrite floatability in flotation plant of the Rudnik mine, *J. Min. Sci.*, 2020, Vol. 56. — P. 119–125.
18. **Саматова Л. А., Рябой В. И., Шепета Е. Д.** Повышение извлечения цветных и благородных металлов с использованием аэрофлотов при флотации шеелит-сульфидных руд // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 151–157.
19. **Гурман М. А., Щербак Л. И.** Формы проявления золота в первичной золото-медно-порфировой руде Малмыжского месторождения // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения). — 2020. — С. 77–79.
20. **Gurman M. and Ashimbayev A.** Active carbons for selective flotation of primary gold-copper-porphyry ore, *Environment, Energy and Earth Sci. (E3S), Web of Conf.*, 2020. Vol. 192. — P. 02004.
21. **Буханова Д. С., Кутырев А. В., Сидоров Е. Г., Чубаров В. М.** Первая находка минералов платиновой группы в рудах Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения, Хабаровский край, Россия // Зап. РМО. — 2020. — Т. 149. — № 2. — С. 12–21.
22. **Гурман М. А., Шепета Е. Д., Полтарецкая А. Е., Васянович Ю. А.** Результаты флотации золото-содержащей медно-порфировой руды // ГИАБ. — 2019. — № 8. — Спец вып. 30. — С. 42–49.
23. **Рябой В. И., Голиков В. В., Шендерович В. А., Стрельцын В. Г.** Селективный собиратель на основе диизобутилдитиофосфата натрия для сульфидно-мышьяковистых руд // Обогащение руд. — 1997. — № 3. — С. 12–14.
24. **Богданов О. С., Еропкин Ю. И., Поднек А. К.** Исследование действия флотационных реагентов. — Ленинград: Механобр, 1965. — С. 43–53.
25. **Гурман М. А., Щербак Л. И.** Технологическая минералогия и первичное обогащение магнетитовой руды месторождения Поперечного // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 157–167.

Поступила в редакцию 08/IV 2022

После доработки 18/X 2022

Принята к публикации 19/I 2023