

УДК (553.43 + 549.281) : 622.765

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ФЛОТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЗОЛОТО-МЕДНО-ПОРФИРОВОЙ РУДЫ (МАЛМЫЖСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ, ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ, РОССИЯ)

© 2023 г. Член-корреспондент РАН И. Ю. Рассказов¹, М. А. Гурман^{1,*}, Л. И. Щербак¹

Поступило 08.06.2023 г.

После доработки 12.07.2023 г.

Принято к публикации 20.07.2023 г.

Вещественный состав, структурно-текстурные особенности золото-медно-порфировой руды отражают условия рудообразования и имеют определяющее значение для прогнозирования технологических свойств руды и повышения комплексности использования минерального сырья. Представлена последовательность рудообразования с выделением трех стадий: грейзеновой, сульфидной (продуктивной) и взрывных микрозон в пределах изученного интервала рудного тела. Выявлены особенности рудных и рудообразующих минералов, определяющие их флотационное поведение и свойства, влияющие на флотационную активность. Установлен комплексный состав исследуемой руды.

Ключевые слова: золото-медно-порфировая руда, халькопирит, золото, рудообразование, флотационные свойства минералов

DOI: 10.31857/S2686739723601266, **EDN:** LGLGDX

На территории Хабаровского края расположено крупнейшее в России Малмыжское месторождение золото-медно-порфировых руд, также известны рудопроявления перспективные на Au и Cu. [1, 2] (рис. 1). Детальное изучение руд Cu-порфирового типа будет способствовать расширению сырьевой базы меди, развитие которой связано с созданием эффективных технологий их переработки [3]. В ряде обзорных работ освещены вопросы временного образования и минералогическо-петрографические особенности магматических пород, состава, структуры и текстуры руд, зональности рудовмещающих метасоматитов медно-порфировых месторождений [4–7]. Понимание процессов формирования месторождений расширяет возможности прогноза и поиска новых рудных участков [8]. Важнейшие особенности минералов химический состав, структура и текстура, характер срастания определяются их генезисом. Эти свойства обуславливают активность минералов по отношению к флотационным реагентам и их поведение при флотации [9–13], которая является основным процессом обогащения руд Au–Cu-порфирового типа.

В качестве объекта исследования представлена технологическая проба весом 17 кг, отобранная из рудного интервала 343–351 м уч. Свобода Малмыжского Au–Cu-порфирового месторождения, составленная из керна скважины № ААМ-218, удаленной на 600 м к северо-востоку от восточной границы рудного поля. Петрографическое, минералогическое и минераграфическое изучение руды и продуктов обогащения выполнено с применением оптической и электронной микроскопии (стереомикроскоп Stemi 2000C, поляризационный микроскоп Amager 2m, растровый электронный микроскоп JEOL JCM-6000PLUS и VEGA TESCAN), с использованием атомно-абсорбционного (спектрофотометры AA6200, AA7000, “Shimadzu”), фотоколориметрического (спектрофотометр UV-VIS Spectrophotometer UV2600), титриметрического и гравиметрического анализа.

Исследуемая проба первичной золото-медно-порфировой руды характеризуется следующим химическим составом, %: Cu 0.4–0.41, Au 0.39–0.41 г/т, серебро 1–1.2 г/т, Fe_{общ} 4.5, S 1.9–2.1; SiO₂ 74.2; TiO₂ 0.47; Al₂O₃ 15.15; MgO 1.12; CaO 1.14; Na₂O 0.53; K₂O 0.8; W 0.08; Mn 0.04; V 0.013; Zn 0.008; Co 0.008; Cr 0.003; Ni 0.0025; Mo 0.0018; Pb 0.0016; Sn 0.0003; Bi 0.0001 [14]. Рудовмещающие породы представлены кварцевыми, альбит-кварцевыми и альбит-хлорит-кварцевыми метасоматитами. Содержание сульфидов в руде не превышает 5%, в т.ч. халькопирита – 1.3–1.5%, пирита –

¹Хабаровский Федеральный исследовательский центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Хабаровск, Россия

*E-mail: mgurman@yandex.ru

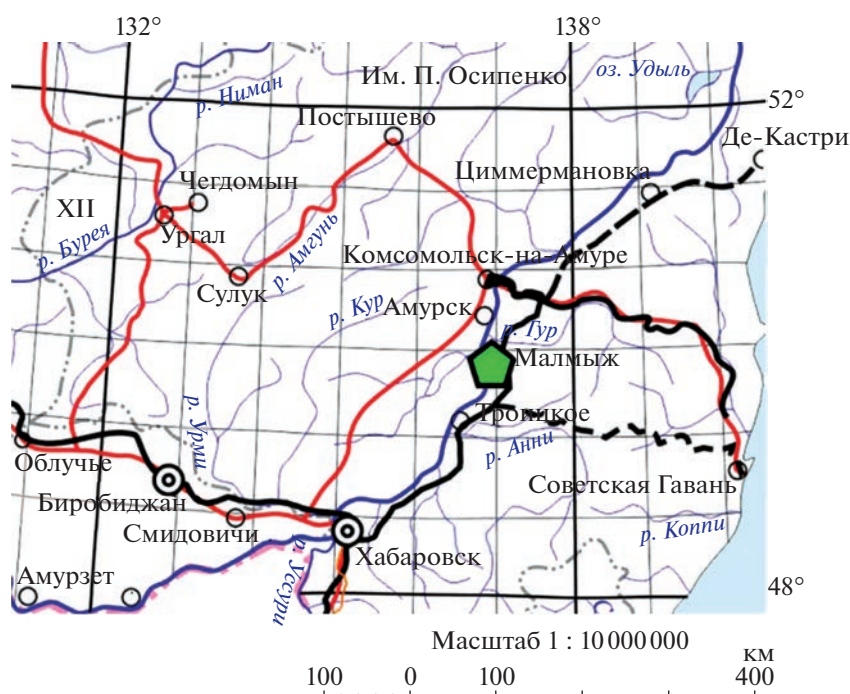


Рис. 1. Географическое положение Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения.

2.8–3%. Халькопирит является основным носителем меди, присутствует в двух генерациях. Халькопирит I – в виде тонкой и агрегатной вкрапленности (0.002–0.5 мм) в метасоматитах. Микровключения Au, минералов Pb, Mo, Bi, Te, Se, выявленные в халькопирите I, характерны и для руды других участков Малмыжского месторождения [15]. Мелкокристаллический халькопирит II (0.1–0.5 мм) наблюдается в белом гранулированном кварце. Халькопирит образует тесное сростание с пиритом, отмечаются включения и вкрапления халькопирита в пирите. Пирит – количественно преобладающий рудный минерал представлен двумя генерациями: в виде тонкокристаллической и агрегатной вкрапленности (0.1–1.5 мм) – пирит I и пентагондодекаэдрические, кубические кристаллы (0.05–1 мм) – пирит II. Включения халькопирита, магнетита, молибденита (мас. %: W 51, Ca 10.9, Fe 3.6, S 2.1, O 7.2, C 25.2), галенита, шеелита (мас. %: Mo 44.3, S 35.4, Fe 0.8, C 19.5) выявлены в пирите I. Магнетит (~1.5% в руде) образует гнездовидные обособления, прожилки тонкозернистых плотных мас. (0.2–1.5 мм мощностью), наблюдается в сростании с пиритом и халькопиритом. Магнетит содержит примесь Cr (0.2–1.7 мас. %), Ni (0.8–1.1 мас. %), Ti (0.4–1.9 мас. %), Mn (до 1.2 мас. %), V (0.15–0.3 мас. %), Cu (до 0.5 мас. %) (VEGA “TESCAN”). В микросростках магнетита выявлены: Pt, Os, циркон, пироп, кианит (рис. 2).

Неравномерность распределения, чрезвычайно низкие концентрации золота и серебра в руде

осложняют их изучение. Поэтому для диагностирования благородных металлов требуется предварительная концентрация исходной руды после ее тонкого измельчения. Методами SEM золото выявлено во флотационных концентратах как в свободном виде (5–40 мкм), так и в ассоциации с сульфидами, преимущественно с халькопиритом: в сростаниях и включениях в халькопирите (1–20 мкм), на границе сростания зерен халькопирита и пирита (2.5–5 мкм) (рис. 3).

Свободное золото представлено: пластинчатыми частицами, по форме приближенными к кубу или октаэдру; ромбоэдрическими, редко кубическими микрокристаллами, образующими микросростки; зернами неправильной комковатой формы. Серебро присутствует как постоянная примесь в золоте (до 35 мас. %); клаусталите (1.5–16 мас. %), котунните (3–4 мас. %), в галените (1.5–2.5 мас. %), включенных в сульфиды; в виде аргентита; включений в магнетите (самородное серебро). В концентратах, по результатам SEM, диагностированы Pd и Cd в минеральной форме в виде включений в халькопирите I и In как примесь в халькопирите I и пирите I (1.6–1.9 мас. %). Элементный состав спектров (мас. %): Pd 17.9, Te 55.9, Bi 1.5, Cu 3.7, Fe 5.4, S 4.1, Si 1.8, Al 1.3, Mg 0.5, O 7.9 (котульскит), Cd 60.6, Zn 11.5, Cu 2, Fe 2.2, S 15.5, Na 0.3, Al 0.1, Si 0.3, O 3.1, C 4.4 (гринокит). Определены интерметаллиды, в составе которых Fe, Cr, Ni, Mn, Cu, Mo, Al; интерметаллид (мас. %): Be 99.18, Mo 0.82; включения Rb, бромеллита и бериллия в шеелите (мас. %):

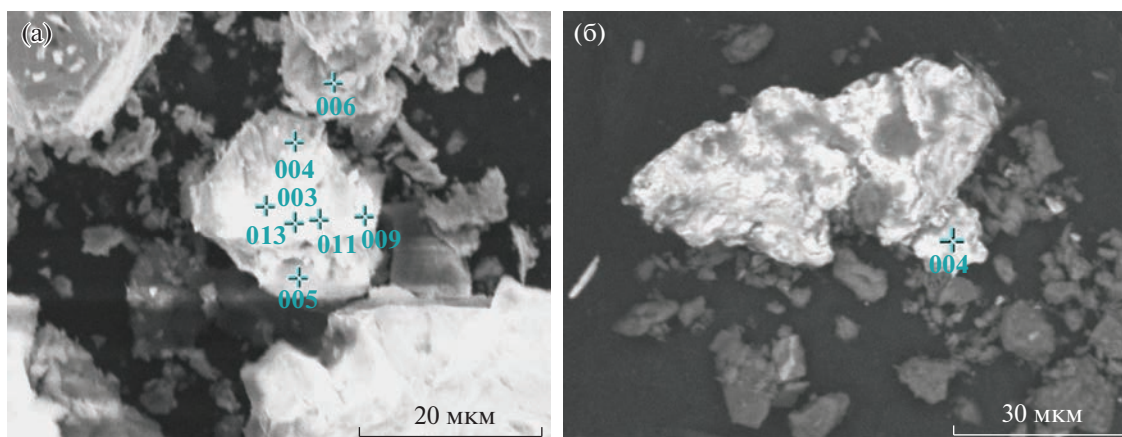


Рис. 2. Микросростки магнетита: а — кварц с магнетитом: Pt и циркон — спектр 003 (мас. %): Pt 7, Zr 25.1, Si 12.7, O 55.2 и спектр 013 (мас. %): Pt 27.3, P 15.2, Si 14.1, O 43.4; пироп и железистый пироп — спектр 009 (мас. %): Mg 10.6, Al 14.5, Si 12.6, O 62.3 и спектр 011 (мас. %): Mg 6.1, Fe 14.8, Al 8.5, Si 7.8, O 62.8; кианит — спектр 005 (мас. %): Al 16.6, Si 24.2, O 59.2; б — магнетитовая друза: магнетит II с микропрожилками кианита — спектр 004 (мас. %): Os 0.2, Fe 65, Cr 16.8, Ni 5.5, Mn 2, Ca 0.5, K 0.2, Mg 0.2, Al 2.2, Si 1.9, O 5.5 (JEOL JCM-6000PLUS).

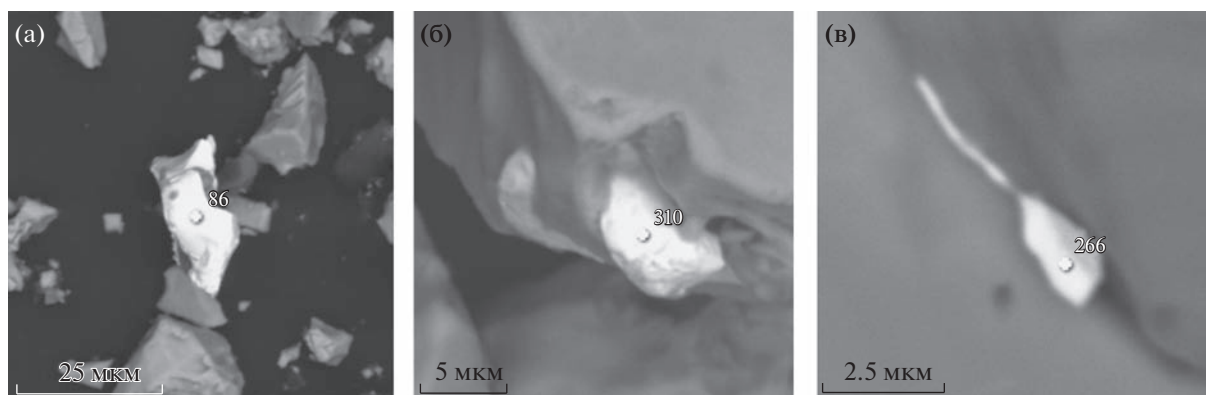


Рис. 3. Формы нахождения золота: а — свободные зерна (30 мкм), спектр 86 (мас. %): Au 70.6, Ag 20.8, Cu 0.7, Fe 0.6, S 0.4, O 0.9; б — включения в халькопирите (15 мкм), спектр 310 (мас. %): Au 61.9, Ag 32.6, Cu 3, Fe 2.5; в — включения на границе сростания зерен халькопирита (2.5–5 мкм), спектр 266 (мас. %): Au 62, Ag 18.5, Cu 0.8, Fe 6, S 7.7.

(Be 85.8, Ca 1.5, W 10.3, O 1.4, Cu 0.3, Fe 0.1, S 0.1) и кварце. Клаусталит, тетрадимит, теллуриовисмутит, селенсодержащий цумоит ((мас. %): Bi 59.9, Te 14.5, Se 1.6, Br 0.8, Cu 0.8, Fe 0.3, S 2.3, Si 0.9, O 8.8, Cl 0.2) выявлены в виде включений в халькопирите I и пирите I. Разнообразие селенидов и теллуридов, установленных в различных Au–Cu–порфировых системах, свидетельствует об их важном генетическом значении [16]. Во взрывных зонах микротрещиноватости и микробрекчирования по кварцу при повышении давления образуется коэсит с необычными оплавленными, трубчатыми, воронковидными формами. В халькопирите и пирите происходят не менее динамичные изменения, в частности, развальцевание, разлистование, закручивание, заполнение трещин пиропом (рис. 4), цементирование обломков

халькопирита кианитом, что может усложнять разделение сульфидов железа и меди.

Структура руды неравномернотонкозернистая, тонко- и микрозернистая, пойкилитовая, взаимных границ, эвтектоидная (распада твердого раствора), последняя характерна для смесей халькопирита I и пирита I, кубанита и пирита I. В смеси кубанит-пирит распад твердого раствора фиксируется по изменению химического состава в пределах одного зерна — скрытомозаичная структура, указывающая на одновременную кристаллизацию халькопирита и пирита, пирита и кубанита, что определяет близость их флотационных свойств. Наличие пластинчатых, микро-слоистых форм халькопирита [14] свидетельствует об изменениях физико-химического состояния рудного расплава в процессе рудоотложения. Струк-

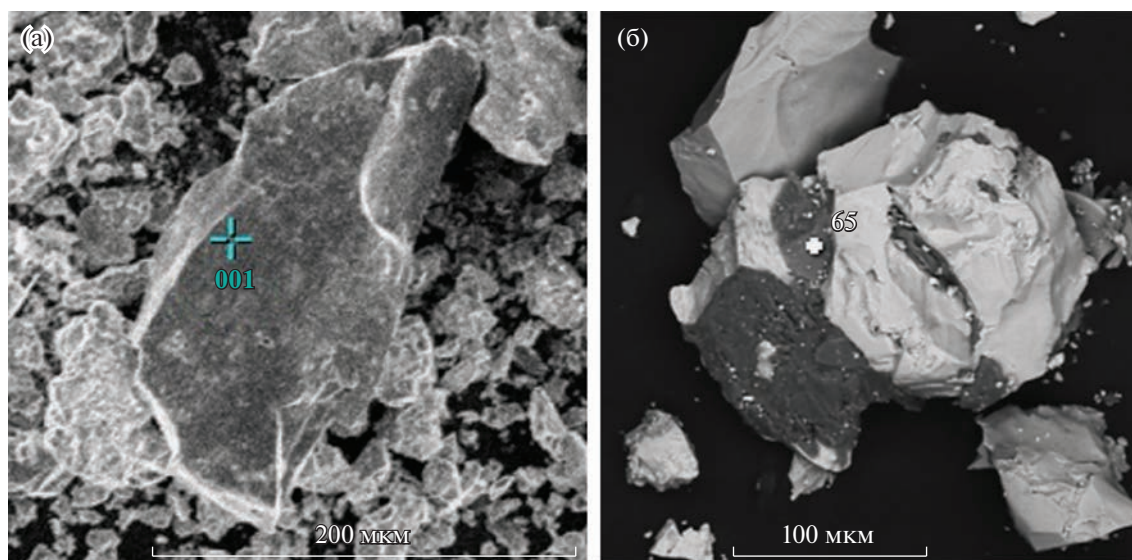


Рис. 4. Изменения пирита и халькопирита в микровзрывных зонах: а — развальцованный кристалл пирита, спектр 001 (мас. %): Fe 40.8, S 59.2; б — трещины в халькопирите, залеченные железистым пиропом, спектр 65 (мас. %): Mg 8.6, Al 12.1, Si 12, Mn 0.5, Cu 0.9, Fe 17, S 0.6, O 48.3

тура взаимных границ указывает на одновременную кристаллизацию в гипогенных условиях.

В изученном интервале рудного тела наблюдается следующая последовательность рудообразования: грейзеновая, сульфидная (продуктивная) и взрывных микрозон. Грейзеновая характеризуется высокотемпературными процессами с проявлением ассоциаций: Be–Rb–Al–F–Si и Fe–Cr–Ni–Mn–V; сульфидная: Mo–W–Bi–Pb–Te–Se–Cd–Zn–In–Au–Ag–Fe–Cu; взрывных микрозон: Pt–Zr–Mg–Al–Fe–Si–Ca–C–N–Cl–I–F. Последовательное выделение сульфидов при охлаждении расплава позволяет судить об относительных изменениях температуры и давления при минералообразовании, что помогает объяснить различия во флотационных свойствах минералов в связи с условиями их генезиса.

Следует отметить, что продуктивная рудная стадия на Малмыжском месторождении формировалась в длительном временном интервале. В постсульфидный этап в связи с активизацией глубинного разлома образовались взрывные микрозоны трещиноватости, которые фиксируются в халькопирите I, пирите I и кварце по изменению физических свойств, а также привнесу микропорций высокотемпературных флюидов, отложенных в виде платины, магнетита, циркона, пирропа и кианита. Выполнение микротрещин в халькопирите и пирите пиропом и кианитом, скопление в кианите обломков халькопирита, в халькопирите обломков галенита, галеновисмута, висмутита и др. связано с повторными разрывными процессами и внутрирудным углеродным метасоматозом. С микрозонами взрывной

трещиноватости усматривается прямая связь алмазности.

Выявленные особенности рудных минералов золото-медно-порфировой руды позволяют прогнозировать технологические свойства руды, определить факторы, затрудняющие флотационное обогащение, и понять причины технологических потерь. Наличие меди в сульфидной форме в виде халькопирита и отсутствие окисленной меди следует считать благоприятными факторами флотации. При этом сложный характер вкрапленности предусматривает стадийность флотационного обогащения. Варьирование размеров вкраплений халькопирита от 2 до 100 мкм будет существенно влиять на результаты флотации, поскольку тонкие частицы обладают пониженной флотуруемостью, снижается вероятность их извлечения в концентрат.

Тесное срастание халькопирита и пирита предполагает тонкое измельчение для раскрытия минеральных зерен, при этом разделение слоистых срастаний при измельчении весьма затруднительно. Наличие пойкилитовых структур сильнее всего затрудняет флотационное разделение минералов, т.к. требуется очень тонкое измельчение, при этом может оставаться большое количество мелких “невывсвобожденных” зерен. Сложные срастания сульфидов меди и железа с магнетитом также могут являться причиной потерь халькопирита и пирита в коллективном цикле флотации. Мозаичная структура кристаллов является одним из примеров объемной и поверхностной неоднородности минерала [11], которая может приводить к неравномерному покрытию

минеральной поверхности реагентами, что будет оказывать существенное влияние на результаты флотации. Количественное преобладание пирита над халькопиритом в руде и более крупная размерность пирита затрудняют селективность их флотационного разделения.

Халькопирит и пирит I и II генераций могут проявлять различную флотационную активность. Наличие примесей оказывает существенное влияние на флотационные свойства минералов, например, примеси меди (0,7–7%) в пирите [14] осложняют его депрессию при разделении сульфидов меди и железа. При этом включения минералов Bi, Te, Se, Cd и примесь In значительно повышают ценность халькопирита и предъявляют требования к его высокому извлечению. Установленные в пирите включения галенита (с примесью Ag) и магнетита (с примесью Cr, Mn, Ti, V, Ni); сростания пирита с золотоносным халькопиритом, молибденитом, шеелитом предполагают концентрацию и переработку пиритового продукта.

Золото-медно-порфировые руды являются важным источником получения благородных металлов [3, 5, 6]. Флотируемость золота зависит от его величины и формы, состава минеральных зерен или кристаллов, состояния их поверхности и деформации в процессе измельчения, характера ассоциации золота с рудными минералами [12]. Формы нахождения Au в руде будут определять условия его извлечения [9]. Поскольку идентифицированное золото представлено свободными зёрнами и в виде сростаний и включений в халькопирите, извлечение Au во флотационный концентрат будет определяться извлечением золото-содержащего халькопирита и свободного золота, вскрытого измельчением. Тонкие частицы свободного золота могут являться причиной потерь со шламами. Покрывания и налеты сульфидов и гидроокислов железа, алюмосиликатов на поверхности золота затрудняют его флотацию [14]. Сростания золотосодержащего халькопирита с пиритом, присутствие золота на границе сростания халькопирита и пирита или в интерстициях этих минералов (рис. 3) могут являться причиной снижения извлечения золота (и меди) в медные концентраты.

Выявленный в составе руды магнетит с примесями Pt, Os, Cr, Ni, Ti, Mn, V, Cu представляет резерв для повышения комплексности использования перерабатываемой руды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за оказанное содействие и участие в выполнении электронно-микроскопических исследований Н.В. Бердникову, Н.С. Коноваловой, В.О. Крутиковой.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госзадания ХФИЦ ДВО РАН № 122042900003-1. Исследования выполнялись с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием “Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук”, финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075-15-2021-663.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Читалин А.Ф., Ефимов А.А., Воскресенский К.И., Игнатьев Е.К., Колесников А.Г. Малмыж – новая крупная золотомедно-порфировая система мирового класса на Сихотэ-Алине // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 3. С. 65–69.
2. Петров О.В., Ханчук А.И., Иванов В.В., Киселев Е.А., Шатов В.В., Змиевский Ю.П., Молчанов А.В., Терехов А.В., Сергеев С.А. U-Pb SIMS геохронология рудоносных магматических пород золото-медно-порфировых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье) // Региональная геология и металлогения. 2020. № 83. С. 41–56.
3. 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.
4. Ханчук А.И., Иванов В.В., Игнатьев Е.К., Коваленко С.В., Семенова Д.В. Альб-сеноманский гранитоидный магматизм и медный рудогенез Сихотэ-Алиня // ДАН. 2019. Т. 488. № 3. С. 298–302.
5. Sinclair W.D. Porphyry deposits // Geological Association of Canada // Mineral Dep. Division. Spec. publ. 2007. V. 5. P. 223–243.
6. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems // Econ. Geol. 2010. V. 105. № 1. P. 3–41.
7. Крюков В.Г. Геолого-структурные особенности медно-порфирового оруденения Малмыжского рудного узла (Хабаровский край) // Региональные проблемы. 2022. Т. 25. № 3. С. 69–71.
8. Плечов П.Ю., Некрылов Н.А., Бланди Д. Сравнение одно- и двустадийной моделей формирования медно-порфировых месторождений // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2017. № 4. С. 31–38.
9. Александрова Т.Н., Гурман М.А., Кондратьев С.А. Проблемы извлечения золота из упорных руд Дальневосточного региона России и некоторые пути их решения // ФТПРПИ. 2011. № 5. С. 124–135.
10. Чантурия В.А., Шадрунова И.В. Технология обогащения медных и медно-цинковых руд Урала. М.: Наука, 2016. 386 с.
11. Глембоцкий В.А., Дмитриева Г.М. Влияние генезиса минералов на их флотационные свойства. М.: Наука, 1965. 112 с.

12. *Абрамов А.А.* Флотационные методы обогащения. М.: МГГУ, Горная книга, Мир горной книги, 2008. 710 с.
13. *Гурман М.А., Щербак Л.И.* Флотация в схемах переработки упорных золотосодержащих руд // Горный журнал. 2018. № 10. С. 57–62.
14. *Gurman M.A., Shcherbak L.I.* Process Mineralogy of the Malmyzh Deposit // Journal of Mining Science. 2023. V. 59. № 1. P. 148–156.
15. *Буханова Д.С.* Минералого-геохимические особенности Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения, Хабаровский край / Автореф. дисс... канд. геол.-минерал. наук. Петропавловск-Камчатский. 2020. 25 с. URL: <http://www.kscnet.ru>
16. *Николаев Ю.Н., Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю., Нагорная Е.В., Марущенко Л.И., Сидорина Ю.Н., Читалин А.Ф., Калько И.А.* Au-Ag минерализация порфирово-эпитермальных систем Баймской зоны (Западная Чукотка, Россия) // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 4. С. 319–345.

GENETIC FEATURES AND FLOTATION PROPERTIES OF THE PORPHYRY COPPER–GOLD ORE (MALMYZH DEPOSIT, Khabarovsk DISTRICT, RUSSIA)

Corresponded Member of the RAS I. Yu. Rasskazov^a, M. A. Gurman^{a, #}, and L. I. Shcherbak^a

^a*Mining Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: mgurman@yandex.ru*

The material composition, structural and textural features of porphyry-copper-gold ore reflect the conditions of ore formation and are of decisive importance for predicting the technological properties of ore and increasing the complexity of the use of mineral raw materials. The sequence of ore formation with three stages identified: greisen, sulfide (productive) and explosive microzones within the studied interval of the ore body is presented. Features of ore and rock-forming minerals that determine their flotation behavior and properties that hinder the selectivity of flotation were revealed. The complex composition of the studied ore was established.

Keywords: porphyry copper–gold ore, chalcopyrite, gold, ore formation, flotation properties of minerals