

УДК: 669.2:622.765

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.35

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ МЕДНО- ПОРФИРОВЫХ РУД



Аскарров Азгам Муратович

Начальник Управления международного сотрудничества и координации инвестиционных проектов и локализации Министерства горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан, Алмалык, Узбекистан
E-mail: A.Askarov@mingeo.uz
ORCID ID: 0009-0001-8116-671X
Science ID: FTV-0926-0030



Мамаисакова Зебо Баходир кизи

Базовый докторант филиала НИТУ «МИСИС» в городе Алмалык, Алмалык, Узбекистан
E-mail: mamaisakovazebo@gmail.com
ORCID ID: 0009-0004-2600-092X
Science ID: FTV-0525-0103

Аннотация. В статье рассматриваются вещественный состав и технологические свойства медно-порфировых руд на примере месторождений Центральной Азии, в частности Алмалыкского региона, месторождений «Кальмакыр» и «Ёшлик». Проанализированы механизмы потерь благородных металлов — золота и серебра — как на стадии флотационного обогащения, так и при последующей пирометаллургической переработке. На основе мирового опыта обогатительных предприятий обоснована необходимость перехода от традиционных флотационных схем, обеспечивающих непрерывное извлечение ценных компонентов, к комбинированным гравитационно-флотационным и гидрометаллургическим технологиям.

Ключевые слова: медно-порфировые руды благородные металлы флотационное обогащение извлечение золота халькопирит пиритная концентрация гравитационно-флотационная технология.

Received: 07.09.2026

Accepted: 17.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

MIS-PORFIR MINERALLARINI KOMPLEKS QAYTA ISHLASH JARAYONIDA QIMMATBAHO METALLAR YO‘QOTILISHINI KAMAYTIRISHNING TEXNOLOGIK ASOSLARI

Askarov Agzam Muratovich

O‘zbekiston Respublikasi Tog‘-kon sanoati va geologiya vazirligi,
Xalqaro hamkorlik, investitsiya loyihalarini muvofiqlashtirish va
mahalliy lashtirish boshqarmasi boshlig‘i, Olmaliq, O‘zbekiston

Mamaisakova Zebo Bahodir qizi

Tayanch doktorant, Milliy texnologik tadqiqotlar universiteti
MISISning Olmaliq shahridagi filiali, Olmaliq, O‘zbekiston

Annotatsiya. Maqolada Markaziy Osiyo konlari (xususan, Olmaliq mintaqasi Qalmoqir va “Yoshlik” koni) misolida mis-porfir rudalarining moddiy tarkibi va texnologik xususiyatlari ko‘rib chiqilgan. Flotatsion boyitish bosqichida ham, keyingi pirometallurgik qayta ishlashda ham nodir metallarning (oltin va kumush) yo‘qotilish mexanizmlari tahlil qilingan. Boyitish korxonalarining jahon tajribasi asosida qimmatbaho komponentlarni uzluksiz ajratib olishni ta‘minlaydigan an‘anaviy flotatsion

sxemalardan kombinatsiyalangan gravitatsion-flotatsion va gidrometallurgik texnologiyalarga o'tish zarurligi asoslangan.

Kalit so'zlar: *mis-porfirli rudalar nodir metallar flotatsion boyitish oltin ajratib olish xalkopirit pirit konsentratsiyasi gravitatsion-flotatsion texnologiya.*

TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS OF REDUCING LOSSES OF PRECIOUS METALS DURING COMPREHENSIVE PROCESSING OF COPPER-PORPHYRY MINERALS

Askarov Agzam Muratovich

Head of the Department for International Cooperation,
Coordination of Investment Projects and Localization, Ministry of
Mining Industry and Geology of the Republic of Uzbekistan,
Almalyk, Uzbekistan

Mamaisakova Zebo Bahodir kizi

Basic Doctoral Student, Almalyk Branch of National University of
Science and Technology "MISIS", Almalyk, Uzbekistan

Abstract. *The article examines the material composition and technological characteristics of copper-porphyry ores using the Central Asian deposits—specifically, the Kalmakyr and "Yoshlik" deposits in the Almalyk region—as examples. The mechanisms of rare-metal (gold and silver) losses were analyzed both at the flotation-enrichment stage and during subsequent pyrometallurgical processing. Based on the global experience of processing enterprises, the need to transition from traditional flotation schemes, which ensure the continuous recovery of valuable components, to combined gravity-flotation and hydrometallurgical technologies has been substantiated.*

Keywords: *copper-porphyry ores noble metals flotation enrichment gold extraction chalcopyrite pyrite concentration gravity-flotation technology.*

Введение. Минерально-сырьевая база цветной металлургии в значительной степени опирается на переработку полиметаллических руд сложного вещественного состава. Среди них доминирующее положение занимают руды медно-порфирового типа, обеспечивающие более 65% мировой добычи меди и значительную долю попутного золота и молибдена. Характерной особенностью данных месторождений является штокверковый тип оруденения, огромные объемы рудных тел и относительно невысокое содержание полезных компонентов, что предопределяет необходимость переработки больших объемов горной массы [1].

В условиях Республики Узбекистан (в частности, при освоении крупного месторождения «Ёшлик I») комплексное извлечение попутных благородных металлов является приоритетной экономической и технологической задачей. Традиционные монотехнологии, ориентированные исключительно на флотационное выделение сульфидов меди, достигают своего технологического предела, оставляя существенную часть золота в отвалных продуктах [1,3-4].

Минералого-технологическая характеристика руд и формы нахождения золота. Эффективность обогащения полиметаллических медных руд, прежде всего, зависит от их минералогического состава, характера сростания минералов и характера вкрапленности ценных компонентов. В первичных рудах основными рудными минералами меди являются халькопирит (CuFeS_2) и борнит (Cu_5FeS_4), а молибден представлен молибденитом (MoS_2). Вмещающие породы преимущественно состоят из кварца и силикатов, доля которых достигает 88,5 % [2].

Руда характеризуется прожилково-вкрапленной текстурой. Рудные минералы встречаются в кварц-полевошпатовой матрице в виде гнездовых скоплений, тонких прожилков и относительно равномерной вкрапленности.

Количественный минеральный состав руды был рассчитан методом площадей и подтвержден результатами рентгенофазового анализа (РФА). Химический состав и модальный минеральный состав исследованной пробы приведены в таблицах ниже.

Таблица 1.

Химический состав технологической пробы руды

Компонент	Содержание	Метод определения	Технологическое значение
Cu	0,61 %	Йодометрия	Основной извлекаемый компонент
Mo	0,014 %	Колориметрия	Попутный компонент, требует селекции
Au	0,82 г/т	Пробирно-ААС	Критический попутный компонент
Ag	3,60 г/т	Атомно-абсорбционный	Попутный компонент
SiO ₂	62,40 %	Гравиметрия	Абразивность и твердость
Al ₂ O ₃	14,80 %	Комплексонометрия	Шламообразование
Fe	5,10 %	Титриметрия	Связано с пиритом и магнетитом
S	4,25 %	Гравиметрия	Расход коллектора и регулирование pH
CaO	1,90 %	Атомно-эмиссионный	Влияние на расход извести
As	0,003 %	Атомно-эмиссионный	Экологический фактор
Sb	<0,001 %	Атомно-эмиссионный	—

Таблица 2.

Модальный минеральный состав исследуемой пробы

Группа	Минерал	Формула	Массовая доля, %	Примечание
Сульфиды	Пирит		6,50	Основной концентрат упорного Au
	Халькопирит		1,72	Основной минерал меди (90 % Cu)
	Борнит		0,08	Вторичный минерал
	Халькозин/Ковеллин		0,05	Зона окисления
	Молибденит		0,02	Чешуйчатые агрегаты
Нерудные	Магнетит/Гематит		1,50	Оксидные фазы железа
	Кварц		45,30	Основная масса породы
	Полевые шпаты	(K,Na) AlSi ₃ O ₈	26,10	Ортоклаз, плагиоклаз
	Слюды (серицит)		12,50	Источник вторичных шламов
	Карбонаты		2,80	Доломит
	Глинистые (каолинит)		3,43	Сорбенты реагентов
	Итого		100,0	

Согласно данным таблицы 2, основным

сульфидным минералом является пирит, содержание которого составляет 6,50%. Пирит представлен двумя генерациями:

Крупнокристаллический (0,5–2,0 мм) — трещиноватый, представляет собой благоприятную основу для нарастания халькопирита [2-4].

Мелкозернистый (менее 0,05 мм) — часто содержит эмульсионную вкрапленность золота и халькопирита и трудно раскрывается в процессе измельчения.

Основным носителем меди является халькопирит, содержание которого составляет 1,72%. Он образует плотные сростания с пиритом, поэтому для получения кондиционного концентрата требуется тонкое измельчение (до 80–90 % класса –0,074 мм). Молибденит встречается в виде изогнутых чешуек размером 0,01–0,1 мм и часто связан с трещинами в кварце. Это облегчает его раскрытие, однако из-за мягкости создает риск переизмельчения («намазывания») [2].

Такое взаимосвязанное нахождение минералов, особенно распределение золота в различных минеральных ассоциациях, имеет важное значение при выборе схемы обогащения. Поэтому необходимо отдельно рассмотреть формы нахождения золота. В медно-порфировых рудах золото распределено по следующим основным ассоциациям [5-6]:

Свободное золото — около 35 %;

Сростания с халькопиритом — 25 %;

Включения в пирите (упорное золото) — 30 %;

Включения в кварце — 10 %.

Приведенные минералогические особенности показывают, что для данного типа сырья характерна крайне неравномерная и тонкая вкрапленность. Размер сульфидных зерен часто составляет менее 10–20 мкм, поэтому для их полного раскрытия требуется тонкое измельчение руды. Как показано технологическими зависимостями, при увеличении содержания класса –0,074 мм в питании флотации до 80–90 % достигается максимальное извлечение меди (около 89 %) и золота (около 78 %) [6].

Вместе с тем при оценке технологических свойств руды необходимо учитывать, с какими минералами ассоциированы благородные метал-

лы. В медно-порфировых рудах золото и серебро могут находиться как в свободной форме (самородное золото, электрум), так и в «упорной», связанной форме (тонкодисперсные включения в сульфидах). Исследования месторождений Центральной Азии, включая Алмалыкский регион, показывают тесную связь благородных металлов с пиритом и халькопиритом.

Минеральный состав типичной медно-порфировой руды, характерной для месторождений медно-порфирового типа, приведен на рисунке 1.



Рис.1. Средний минеральный состав сульфидной медно-порфировой руды.

Технологические свойства руды непосредственно связаны с описанной выше минералогической структурой и характером вкрапленности ценных компонентов. Для полиметаллических руд, содержащих благородные металлы, характерна крайне неравномерная и тонкая вкрапленность. Размер сульфидных зерен часто изменяется от десятых долей миллиметра до микроскопических включений размером менее 10–20 мкм. Это требует применения сложных схем рудоподготовки для достижения необходимой степени раскрытия минералов перед флотацией.

Анализ форм нахождения золота показывает, что его значительная часть связана с сульфидными минералами. На рисунке 2 приведена диаграмма распределения форм нахождения золота в зависимости от минерал-носителя, что является важным фактором при выборе схемы обогащения.

Как видно из диаграммы, значительная доля золота связана с пиритом. Это создает технологические трудности при получении

кондиционного медного концентрата. Если в процессе флотации не применять специальные реагентные режимы или дополнительные схемы извлечения, часть золота, связанного с пиритом, будет теряться с хвостами.

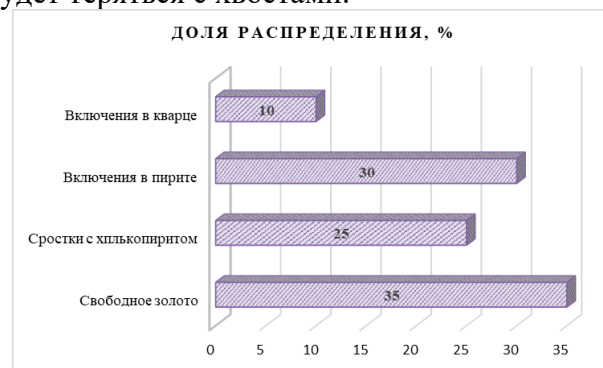


Рис.2. Распределение форм нахождения золота по минеральным ассоциациям в полиметаллических рудах.

Анализ ограничений базовых схем обогащения. В современной практике переработки медно-порфировых руд доминирует метод коллективно-селективной флотации. При базовом режиме обогащения показатели распределения металлов выглядят следующим образом:

Таблица 3.

Базовые технологические показатели обогащения медно-порфировой руды

Продукт обогащения	Выход, %	Содержание Cu, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Cu, %	Извлечение Au, %
Медный концентрат	2,8	24,5	18,4	85,1	62,3
Молибденовый промпродукт	0,45	1,2	5,6	0,65	3,1
Пиритный концентрат	6,5	0,35	2,1	2,8	16,5
Отвальные хвосты	90,25	0,1	0,1	11,45	18,1
Исходная руда	100	0,81	0,83	100	100

Данные таблицы свидетельствуют о невысоком сквозном извлечении золота (всего 62,3%). Основные потери благородного металла происходят с пиритным концентратом (16,5%) и отвальными хвостами (18,1%). Ключевой причиной этого является депрессия пирита известью (CaO) при повышении pH среды до 11–12, что необходимо для получения кондиционного медного концентрата, но неизбежно уводит ассоциированное с пиритом золото в хвосты. Кроме того, чрезмерное повышение щелочности (pH>10,5) негативно сказывается на флотируемости самого золота.

Потери на стадии обогащения

(отвальные хвосты). Общие потери золота в хвостах флотации классифицируются по трем направлениям:

Инкапсулированное в силикатах золото (38%): механические потери, обусловленные микронными включениями ценного компонента в кварцевой матрице, которые не раскрываются при стандартном помоле.

Связанное с пиритом упорное золото (32%): физико-химические потери, вызванные тонкодисперсной вкрапленностью или твердым раствором золота в депрессируемом железистом сульфиде.

Свободное тонкое золото и шламы менее 20 мкм (20%): гидродинамические потери мелких частиц, обладающих низкой кинетикой флотации. Ситуация усугубляется «эффектом натирания» в мельницах, когда поверхность золотин покрывается гидрофильными пленками шламов и оксидов, пассивируя их активность.

Пассивированное золото, покрытое оксидными пленками (10%).

Потери при металлургическом переделе. На этапе пирометаллургической плавки медных концентратов (в печах Ванюкова или взвешенной плавки) благородные металлы переходят в штейн, однако часть из них безвозвратно теряется с отвальными шлаками.

Установлено, что растворимость золота в силикатных расплавах крайне низка. Коэффициент распределения золота между штейном и шлаком при промышленных параметрах плавки достигает значений 25. Следовательно, потери носят преимущественно механический характер и вызваны захватом мельчайших капель (корольков) богатого штейна вязкой шлаковой средой. Существует прямая линейная корреляция между остаточным содержанием меди и золота в отвальных шлаках, что позволяет использовать содержание меди в качестве индикатора потерь благородных металлов.

Интеграция комбинированных технологических решений. Для преодоления физических ограничений флотации и минимизации сквозных потерь рекомендуется переход к разветвленной комбинированной схеме, интегрирующей гравитационные, флотационные и гидрометаллургические циклы.

Основные элементы концептуальной схемы:

Центробежная концентрация в цикле измельчения: Использование высокоэффективных центробежных концентраторов (типа Knelson или Falcon) при факторе разделения 60–100 G позволяет извлекать свободное крупное золото на ранних стадиях («в голове процесса»). Это предотвращает его переизмельчение, деформацию и ошламование.

Скоростная флотация (Flash Flotation): Установка флотомашин на песках гидроциклонов позволяет оперативно выводить крупные, уже раскрытые зерна халькопирита и ассоциированного золота, снижая циркуляционную нагрузку на мельницы.

Химико-металлургическая переработка упорного пиритного продукта: Выделенный в отдельный поток золотосодержащий пиритный концентрат должен подвергаться деструкции одним из современных методов: биоокислением (BIOX), автоклавным окислением (POX) или ультратонким помолом (Albion Process) с последующим интенсивным выщелачиванием.

Модификация реагентного режима: Замена чистых ксантогенатов на сочетания дитиофосфатов и тионокарбаматов повышает селективность флотации золота в присутствии пирита.

Закключение. Медно-порфировые руды месторождения «Ёшлик I» представляют собой сложную многокомпонентную систему, где золото имеет полигенный характер и тесно ассоциировано как со свободными фракциями, так и с сульфидами железа и меди [5–10].

Базовые флотационные схемы, нацеленные исключительно на извлечение меди, приводят к потере до 35–40% золота с отвальными хвостами и шлаками металлургического передела.

Единственным экономически и технологически оправданным направлением модернизации производства является внедрение комбинированных схем. Включение центробежной гравитации в замкнутый цикл измельчения позволяет вывести 15–25% золота в товарный продукт до начала флотации, а гидрометаллургическое вскрытие пиритного промпродукта обеспечивает извлечение

упорных субмикроскопических форм золота. Согласно мировому опыту, внедрение подобного разветвленного подхода обеспе-

чивает прирост сквозного извлечения металлов на 4–8%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Стратегия развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы: Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60. (2022).
- [2] Постановление Президента Республики Узбекистан «О мерах по расширению производственных мощностей АО «Алмалыкский ГМК» на базе месторождения «Ёшлик I» от 1 марта 2017 года № ПП-2807. (2017).
- [3] ГОСТ 14180-80. Руды и концентраты цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения влаги. (2010). Москва: Стандартинформ.
- [4] ГОСТ 32221-2013. Концентраты медные. Методы анализа. (2014). Москва: Стандартинформ.
- [5] Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». (2018). СТП НИТУ МИСиС 02-2018. Общие требования к построению, изложению и оформлению диссертаций и авторефератов диссертаций. Москва: НИТУ «МИСиС».
- [6] Абрамов, А. А. (2008). Флотационные методы обогащения: Учебник для вузов (3-е изд., перераб. и доп., Т. 4). Москва: Изд-во МГГУ.
- [7] Абрамов, А. А. (2010). Собрание сочинений. Т. 8: Флотация. Физико-химическое моделирование процессов. Москва: Горная книга.
- [8] Андреев, Е. Е., & Тихонов, О. Н. (2007). Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: Учебник. Санкт-Петербург: СППГИ.
- [9] Бочаров, В. А., Игнаткина, В. А., & Абдрахимова, И. Р. (2011). Технология переработки золотосодержащего сырья. Москва: Издательский дом МИСиС.
- [10] Бочаров, В. А., & Игнаткина, В. А. (2007). Технология обогащения полезных ископаемых. Том 1: Обогащение руд цветных металлов. Москва: Издательский дом «Руда и Металлы».

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Аскаров, А. М., & Мамайсакова, З. Б. (2026). Технологические основы снижения потерь благородных металлов при комплексной переработке медно-порфировых руд. Цифровые технологии в промышленности, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.35>
