

Статья поступила в редакцию: 28.07.2026

Статья принята к публикации: 07.08.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 669.213:622.775

Современные технологии извлечения серебра из медно-порфировых руд

Хасанов Абдурашид Солиевич

д-р техн. наук, проф.

Алмалыкский филиал Национального исследовательского технологического университета

«МИСус»

Республика Узбекистан, г. Алмалык

Мамаисакова Зебо Баходир кизи

базовый докторант

Алмалыкский филиал Национального исследовательского технологического университета

«МИСус»

Республика Узбекистан, г. Алмалык

E-mail: mamaisakovazebo@gmail.com

Modern technologies for silver extraction from copper-porphyry ores

Khasanov Abdurashid Solievich

doctor of Technical Sciences, Professor

Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS

Republic of Uzbekistan, Almalyk

Mamaisakova Zebo Bakhodir kizi

Basic Doctoral Student

Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS

Republic of Uzbekistan, Almalyk

Аннотация

Цель исследования — систематизировать и критически проанализировать современные технологические решения извлечения серебра, ассоциированного с медно-порфировыми рудами, с учётом специфики вещественного состава таких месторождений, где серебро преимущественно рассеяно в решётке сульфидов меди и не образует самостоятельных промышленных скоплений. Методология работы основана на анализе и обобщении отечественных и зарубежных научных публикаций 2018–2026 гг., патентных материалов, а также технологических данных действующих предприятий, в частности АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат», и сравнительном сопоставлении показателей извлечения серебра при флотационном обогащении, автоклавном (окислительном) вскрытии, гидрометаллургическом (цианидном и тиосульфатном) и биогидрометаллургическом выщелачивании, а также электролитическом рафинировании меди. В результате показано,

Библиографическое описание: Хасанов А.С., Мамаисакова З.Б. кизи Современные технологии извлечения серебра из медно-порфировых руд // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23431>

что наибольшая доля серебра из медно-порфировых руд извлекается попутно с медным концентратом уже на стадии флотации, а последующее концентрирование происходит в металлургическом переделе и завершается в цехе аффинажа при переработке анодных шламов. Установлено, что перспективными направлениями повышения комплексности извлечения серебра являются оптимизация реагентных режимов флотации, применение автоклавного окисления упорных сульфидных концентратов и внедрение бесцианидных (тиосульфатных) и биогидрометаллургических методов доизвлечения. Сделан вывод о необходимости комплексного подхода, объединяющего обогатительный и металлургический переделы. Практическая значимость работы заключается в возможности использования результатов при обосновании направлений модернизации технологических схем переработки медно-порфировых руд Узбекистана и других регионов.

Abstract

The aim of the study is to systematize and critically analyze current technological solutions for extracting silver associated with copper-porphyry ores, taking into account the specific mineralogical composition of such deposits, where silver is predominantly dispersed within the lattice of copper sulfides rather than forming independent industrial concentrations. The methodology is based on the analysis and generalization of domestic and foreign scientific publications for 2018–2026, patent materials, and technological data of operating enterprises, in particular JSC Almalyk Mining and Metallurgical Combine, together with a comparative assessment of silver recovery achieved through froth flotation, pressure (autoclave) oxidation, hydrometallurgical (cyanide and thiosulfate) leaching, bio-hydrometallurgical leaching, and electrolytic copper refining. The results show that the largest share of silver contained in copper-porphyry ores is recovered jointly with the copper concentrate already at the flotation stage, with further concentration occurring during smelting and final recovery in the refinery through processing of anode slimes. Promising directions for increasing the completeness of silver recovery include optimization of flotation reagent regimes, the use of pressure oxidation of refractory sulfide concentrates, and the introduction of non-cyanide (thiosulfate) and bio-hydrometallurgical methods of additional recovery. It is concluded that an integrated approach combining beneficiation and metallurgical stages is required. The practical significance of the study lies in the possibility of using its results to justify directions for modernizing existing processing schemes for copper-porphyry ores in Uzbekistan and other regions.

Ключевые слова: серебро, медно-порфировые руды, флотационное обогащение, автоклавное окисление, гидрометаллургия, биовыщелачивание, аффинаж.

Keywords: silver, copper-porphyry ores, froth flotation, pressure oxidation, hydrometallurgy, bioleaching, refining.

Введение

Серебро остаётся одним из наиболее востребованных металлов современной промышленности: помимо традиционного ювелирного и монетарного применения, оно широко используется в электронике, фотовольтаике, каталитических системах и медицине. Специфика мирового рынка серебра состоит в том, что подавляющая его часть добывается не

на собственно серебряных месторождениях, а попутно при переработке свинцово-цинковых, медных и золотых руд. По данным The Silver Institute, в 2024 г. мировая добыча серебра из руд составила 819,7 млн унций [19], при этом, по оценкам отраслевых обзоров, от 70 до 80 % данного объёма приходится на попутное извлечение из руд иных металлов [19, 12].

Медно-порфировые месторождения занимают в этой структуре особое место. Серебро в них практически никогда не образует самостоятельных минеральных фаз и промышленных скоплений: оно рассеяно в виде изоморфных примесей и субмикроскопических включений в решётке сульфидов меди — халькопирита, борнита, теннантита, а также встречается в сростках с молибденитом, галенитом и сульфосолями свинца и сурьмы [9, 5, 14]. Данная особенность принципиально отличает медно-порфировые объекты от собственно серебряных и серебряно-полиметаллических месторождений: технология извлечения серебра здесь неотделима от общей технологической цепочки переработки медной руды — от обогащения до аффинажа.

Для Республики Узбекистан данная проблематика имеет непосредственное практическое значение. АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» (АГМК) является единственным производителем рафинированной меди в стране и одновременно обеспечивает около 90 % национального производства серебра [2, 1]. Минерально-сырьевой базой комбината служат медно-порфировые месторождения Кальмакыр и Сары-Чеку, а также вводимое в отработку месторождение Ёшлик-1, суммарные запасы которых оцениваются более чем в 45 млн т меди и свыше 5 тыс. т золота при сопоставимой значимости серебра как попутного компонента [1]. В рамках реализуемой до 2030 г. концепции развития комбината предусматривается увеличение годового производства меди почти в 3,3 раза — до 500 тыс. т — при инвестициях порядка 15 млрд долл., строительство обогатительной фабрики №3 и нового металлургического комплекса [10]. Подобная модернизация неизбежно затрагивает вопросы повышения комплексности извлечения драгоценных металлов, в том числе серебра.

Актуальность работы обусловлена, с одной стороны, стабильно высоким спросом на серебро и ограниченностью первичных сереброрудных объектов, а с другой — необходимостью повышения полноты извлечения попутных компонентов из перерабатываемого медного сырья в условиях ужесточения экологических требований и удорожания минерального сырья.

Целью настоящего исследования является систематизация и критический анализ современных технологических решений извлечения серебра из медно-порфировых руд на всех переделах — от обогащения до аффинажа, а также оценка перспектив их применения в условиях действующих и модернизируемых предприятий, в частности АО «Алмалыкский ГМК».

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: 1) проанализировать особенности вещественного состава медно-порфировых руд, определяющие поведение серебра в процессах переработки; 2) обобщить современные данные о флотационном обогащении как первичной стадии концентрирования серебра; 3) рассмотреть гидрометаллургические и биогидрометаллургические методы доизвлечения серебра, включая автоклавное окисление и бесцианидное выщелачивание; 4) описать финальные

металлургические переделы (плавка, электролитическое рафинирование, аффинаж), обеспечивающие получение товарного серебра; 5) провести сравнительный анализ рассмотренных технологий и сформулировать рекомендации для условий Узбекистана.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составил комплексный анализ и обобщение отечественных и зарубежных научных публикаций 2018–2026 гг., патентных материалов, а также открытых технологических и производственных данных действующих предприятий, в первую очередь АО «Алмалыкский ГМК» [2, 1, 10]. Поиск и отбор источников осуществлялся по базам данных КиберЛенинка, ResearchGate, ScienceDirect, MDPI, Springer, Nature, а также по материалам отраслевых организаций — The Silver Institute и Геологической службы США (USGS) [12–19].

В качестве объекта анализа рассматривались медно-порфировые руды, для которых характерна вкрапленная сульфидная минерализация — халькопирит, пирит, молибденит, борнит — с содержанием меди от 0,3 до 1,0 % и попутным содержанием серебра, как правило, не превышающим первые десятки граммов на тонну, что делает экономически оправданной лишь комплексную переработку руды с извлечением серебра совместно с медью и золотом.

Сравнительный анализ технологий проводился по следующим критериям: 1) степень извлечения серебра в готовый продукт (концентрат, слиток), %; 2) селективность процесса по отношению к сопутствующим компонентам (медь, железо, мышьяк); 3) расход реагентов и энергозатраты; 4) экологическая безопасность, в частности отказ от цианидов и снижение выбросов диоксида серы; 5) применимость к упорному сульфидному сырью, в том числе к халькопиритовым концентратам, трудно поддающимся вскрытию.

Для оценки технологических показателей использовались данные лабораторных и полупромышленных испытаний, приводимые в проанализированных публикациях [3, 4–9, 17, 18, 14], а также сведения о промышленной практике аффинажного производства [2]. Метод сравнительного сопоставления дополнялся анализом временной динамики развития технологий — от традиционного цианирования до современных бесцианидных и биогидрометаллургических решений [1, 8, 13, 15, 16].

Результаты и обсуждение

Флотационное обогащение как первичная стадия концентрирования серебра

Первичное концентрирование серебра из медно-порфировых руд происходит на стадии флотационного обогащения совместно с сульфидами меди. Поскольку серебро физически ассоциировано с решёткой халькопирита и других медных сульфидов, а также частично со сфалеритом, галенитом и блёклыми рудами, повышение селективности и полноты флотации медных минералов напрямую увеличивает извлечение серебра в концентрат [4, 9].

Традиционные реагентные схемы флотации медно-порфировых руд основаны на использовании ксантогенатов в сочетании с дитиофосфатами и известью в качестве регулятора среды [14]. Применение комбинированных собирателей позволяет одновременно

повысить извлечение меди, сурьмы и серебра: при флотации медно-полиметаллической руды месторождения Асгат (Монголия) смесь собирателей ADD и Z-200 в сочетании с жидким стеклом, гуматом и сульфитом натрия обеспечила прирост извлечения серебра на 9,26 % по сравнению с одним Z-200 при снижении расхода реагентов на 12,75 % [14]. Дополнительным резервом является электрохимическая обработка пульпы: поскольку большинство сульфидных минералов являются полупроводниками, такое воздействие изменяет их поверхностные свойства, улучшая селекцию минералов и повышая извлечение ценных компонентов при сокращении расхода реагентов [9].

Важным направлением остаётся селективное разделение халькопирита и пирита без применения цианидов. Показано, что сочетание селективных собирателей (C-4132, PAX, Z11, Flomin 7240) с бесцианидными депрессорами — известью, сульфитом натрия, лигносульфонатом натрия и декстрином — позволяет получить концентрат с извлечением меди 76,4 % при содержании меди 11,18 % [18]. Такие схемы одновременно снижают экологическую нагрузку и повышают комплексность извлечения ценных компонентов, включая серебро, поскольку депрессия пирита уменьшает разубоживание концентрата инертными сульфидами. Таким образом, флотационное обогащение остаётся ключевым переделом, на котором формируется основная часть извлекаемого серебра.

Автоклавное (окислительное) вскрытие сульфидных концентратов

Часть серебра, ассоциированного с упорными сульфидами, в первую очередь с халькопиритом, не может быть эффективно доизвлечена традиционными методами без предварительного окислительного вскрытия минеральной матрицы. Наиболее технологически апробированным решением здесь является автоклавное окисление (pressure oxidation, POX) — процесс, при котором сульфидная пульпа нагревается в автоклаве до температуры 180–230°C при парциальном давлении кислорода 3–10 бар [6, 5]. Такой режим обеспечивает окисление практически всех сульфидов, включая наиболее упорный халькопирит, при существенно меньшей продолжительности процесса (10–40 мин) по сравнению с атмосферными методами [6].

По данным исследований, при переработке сульфидного золотосодержащего концентрата по схеме «автоклавное окисление — цианирование кека» степень окисления сульфидов превышает 99 %, а извлечение золота из кека достигает 97 %, серебра — 91,6 % [5]. Введение галогенсодержащих реагентов (хлоридов, бромидов, иодидов) совместно с активированным углём способствует переводу золота и частично серебра в раствор с последующей сорбцией на уголь; извлечение золота при хлорсодержащих растворителях достигает 94,7–94,8 %, при иодидах и бромидах — 98–99 % [3].

Существенным преимуществом автоклавного окисления является отсутствие выбросов диоксида серы, характерных для традиционного окислительного обжига, поскольку сера окисляется преимущественно до сульфатной формы непосредственно в водной среде автоклава [6], что делает технологию привлекательной в условиях ужесточения природоохранных нормативов. Вместе с тем автоклавные методы требуют значительных капитальных затрат и тонкого измельчения концентрата, однако опыт зарубежных

предприятий, применяющих POX и его модификации NiPOX и ACTIVOX, подтверждает промышленную зрелость технологии для упорных золото-серебросодержащих концентратов [6].

Гидрометаллургические методы доизвлечения серебра

Классическим методом извлечения серебра из руд и концентратов остаётся цианидное выщелачивание, обеспечивающее до 80–90 % извлечения металла из руд коренных месторождений [1]. Однако применительно к медьсодержащему сырью цианирование сопряжено с существенным недостатком: цианистые растворы способны растворять не только золото и серебро, но и медь, что резко увеличивает расход реагента и снижает экономическую эффективность процесса [8].

В связи с этим активно исследуются бесцианидные, в частности тиосульфатные, методы выщелачивания. Их интенсификация достигается введением в пульпу аммиака и катализирующих ионов меди (Cu^{2+}), а также заменой тиосульфата натрия на тиосульфат аммония [1]. Преимуществом тиосульфатной системы является отсутствие осаждения золота и серебра на активированный уголь, что открывает возможность её применения для переработки углистых и сорбционно активных концентратов, цианирование которых малоэффективно [7]. Сдерживающими факторами остаются повышенные энергозатраты на подогрев пульпы и расход тиосульфата вследствие термохимического разложения; частичным решением служит выщелачивание при пониженной температуре с разбавлением пульпы и переходом на сорбционное выщелачивание [1].

Отдельного внимания заслуживают исследования по извлечению золота и серебра непосредственно из медьсодержащих цианистых растворов, образующихся при переработке медно-колчеданных руд. Установлено, что при использовании ионообменных смол — слабо- и сильноосновных, в частности Purogold S992 и Purogold A194, — вместо активированного угля увеличение концентрации цианида натрия снижает сорбцию меди и одновременно повышает сорбцию золота и, в меньшей степени, серебра; проведение выщелачивания до контакта пульпы с сорбентом увеличивает степень и скорость сорбции благородных металлов [11]. Подобные приёмы применимы и к медно-порфировому сырью, где серебро также сопутствует растворённой меди.

Биогидрометаллургическое выщелачивание

Биогидрометаллургические методы, основанные на использовании ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов родов *Acidithiobacillus* и *Leptospirillum*, рассматриваются как экологически более щадящая и энергетически менее затратная альтернатива традиционным гидрометаллургическим схемам [13, 15]. Бактериальное окисление сульфидных минералов протекает за счёт генерации ионов Fe^{3+} и серной кислоты, что приводит к переводу металлов в раствор в форме сульфатов [15].

Кучное и чановое бактериальное выщелачивание успешно применяется для извлечения меди из низкосортных руд и одновременно рассматривается как способ попутного извлечения серебра: бактериальное и химическое выщелачивание медьсодержащих руд с последующим цианированием кека позволяет доизвлечь остаточное серебро из

низкосортного сырья [13]. Развитие биовыщелачивания сдерживается изменением минералогии перерабатываемых руд в сторону труднообогатимого халькопирита на больших глубинах порфировых месторождений, а также дефицитом воды, вынуждающим переходить на солоноватые и морские воды [16]. Рассматривается и применение биовыщелачивания непосредственно в недрах (in situ biomining) для доработки целиков, остающихся при панельном обрушении на крупных порфировых месторождениях [16]. Ограничениями метода остаются низкая скорость процесса, чувствительность микроорганизмов к условиям среды и затруднённое окисление халькопирита [15, 16]; тем не менее в сочетании с автоклавным окислением биовыщелачивание может служить дополнительным источником извлечения серебра из бедного и забалансового сырья.

Пирометаллургическая переработка и аффинаж

Полученный на стадии флотации медный концентрат в дальнейшем подвергается плавке на штейн с последующим конвертированием и огневым рафинированием, в ходе которых серебро практически полностью концентрируется в черновой, а затем анодной меди [2]. Электролитическое рафинирование анодной меди обеспечивает финальную стадию концентрирования серебра: благородные металлы, включая серебро, золото, селен и теллур, не растворяются в электролите и накапливаются в шламе, оседающем на дне электролизных ванн [2].

На АО «Алмалыкский ГМК» переработка анодных шламов и получение товарных слитков золота и серебра осуществляется в цехе аффинажа, включающем отделение переработки шламов и отделение аффинажа золота, где сырьём служат аноды сплава серебристо-золотистого металла [2]. Основное требование передела — максимально полное извлечение золота, серебра, селена и теллура [2]. Здесь завершается цепочка, начатая флотацией: серебро, потерянное в хвостах обогащения, шлаках плавки и отвальных продуктах, уже не может быть восполнено на аффинаже, что подчёркивает значимость каждого предыдущего передела.

Сравнительный анализ технологий и перспективы для условий Узбекистана

Обобщение рассмотренных технологий показывает, что не существует единого универсального решения: каждый метод решает задачу на определённом переделе и для определённого типа сырья. Флотация обеспечивает извлечение основной массы серебра при относительно невысоких затратах, но её эффективность зависит от селективности реагентного режима и степени раскрытия сульфидов [18, 14]. Автоклавное окисление и биовыщелачивание востребованы для упорных концентратов и бедных, забалансовых руд, где традиционные методы малоэффективны [6, 5, 15, 16]. Бесцианидные, в частности тиосульфатные, методы выщелачивания — экологическая альтернатива цианированию, но пока уступают ему по экономике в промышленном масштабе [1, 7]. Финальное концентрирование серебра неизбежно происходит при плавке, конвертировании и электролитическом рафинировании меди, что делает аффинажное производство критически важным звеном всей цепи извлечения [2].

Применительно к условиям АО «Алмалыкский ГМК», реализующего программу модернизации с увеличением производства меди почти в 3,3 раза к 2031 г. [10], целесообразны следующие направления: оптимизация реагентных режимов флотации с использованием комбинированных собирателей и депрессоров нового поколения; внедрение автоклавного окисления упорных промпродуктов и пиритных хвостов с повышенным содержанием благородных металлов; изучение бесцианидных и биогидрометаллургических методов доизвлечения серебра из бедных руд месторождений Кальмакыр, Сары-Чеку и Ёшлик-1; модернизация аффинажного производства для минимизации потерь серебра на всех переделах.

Заключение

Проведённый анализ современных технологий извлечения серебра из медно-порфировых руд позволяет сформулировать следующие выводы.

Во-первых, специфика вещественного состава медно-порфировых руд, при которой серебро рассеяно в решётке медных сульфидов и практически не образует самостоятельных минеральных форм, обуславливает неразрывную связь технологии извлечения серебра с общей схемой переработки медного сырья — от флотационного обогащения до электролитического аффинажа.

Во-вторых, основная часть серебра извлекается уже на стадии флотационного обогащения совместно с медным концентратом, поэтому оптимизация реагентных режимов флотации — применение комбинированных собирателей, бесцианидных депрессоров пирита, электрохимической обработки пульпы — представляет собой наиболее экономически доступный резерв повышения комплексности извлечения.

В-третьих, для переработки упорного сульфидного сырья и доизвлечения серебра из бедных руд перспективны автоклавное окисление, а также бесцианидные (тиосульфатные) и биогидрометаллургические методы выщелачивания, обеспечивающие снижение экологической нагрузки при сопоставимых или более высоких показателях извлечения по сравнению с традиционным цианированием.

В-четвёртых, окончательное концентрирование и получение товарного серебра происходит на металлургическом переделе — при плавке, конвертировании и электролитическом рафинировании меди с последующей переработкой анодных шламов в цехе аффинажа, что делает данный передел ключевым звеном, определяющим итоговый показатель комплексного извлечения металла.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования систематизированных данных для обоснования направлений модернизации технологических схем переработки медно-порфировых руд, в частности для АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат», реализующего программу масштабного расширения производства до 2030–2031 гг. Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальное изучение поведения серебра при комбинировании автоклавного окисления с бесцианидным выщелачиванием применительно к конкретным типам руд месторождений Кальмакыр и Ёшлик-1, а также на технико-экономическую оценку внедрения предложенных решений в действующую технологическую схему комбината.

Список литературы

1. «Алмалыкский ГМК» имеет на своих месторождениях более 5 тысяч тонн золота. // РИА Новости / Прайм. Золото: [сайт]. – 2026. (дата обращения: 20.09.2026).
2. Акционерное общество «Алмалыкский горно-металлургический комбинат»: официальный сайт. URL:.. (дата обращения: 21.09.2026).
3. Болдырев А.В., Баликов С.В., Гудков С.С., Богородский А.В., Емельянов Ю.Е. Автоклавное окисление упорных золотосодержащих концентратов с использованием галогенсодержащих растворителей и сорбента // Цветные металлы. – 2015. – № 11. – С. 29–33. – DOI: 10.17580/tsm.2015.11.04.
4. Болдырев А.В., Баликов С.В., Гудков С.С., Емельянов Ю.Е., Богородский А.В. Оптимизация процесса автоклавно-сорбционного окисления упорных золотосодержащих концентратов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 12 (95). – С. 191–195.
5. Епифоров А.В., Баликов С.В., Шипнигов А.А. Поведение основных элементов при автоклавном окислении полиметаллического сульфидного флотоконцентрата, содержащего вольфрам и молибден // iPolytech Journal. – 2024. – Т. 28, № 3. – С. 538–546. – DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-538-546.
6. Зайцев П.В., Кравченко Н.А. Гидрометаллургическое извлечение меди и серебра из концентратов флотации смешанной руды // Цветные металлы. – 2020. – № 9 (933). – DOI: 10.17580/tsm.2020.09.07.
7. Лодейщиков В.В. Возможности и перспективы промышленного использования нецианистых растворителей золота и серебра // Золотодобыча. – 2012. – № 166. – С. 8–13.
8. Определены условия эффективного извлечения золота и серебра из низкосортных руд. // Уральский федеральный университет: официальный сайт. – 2023. (дата обращения: 19.09.2026).
9. Прохоров К.В., Копылова А.Е. Перспективные способы интенсификации процесса флотации медно-порфировых и золото-серебряных руд путем применения электрохимической обработки // Проблемы недропользования. – 2020. – № 2 (25). – С. 96–106. – DOI: 10.25635/2313–1586.2020.02.096.
10. Узбекский АГМК к 2031 г увеличит выпуск меди в 3,3 раза. // РИА Новости / Прайм. Золото: [сайт]. – 2024. (дата обращения: 22.09.2026).
11. Учёные придумали, как эффективно получать благородные металлы из медно-колчеданной руды. // Naked Science: [сайт]. – 2023. (дата обращения: 22.09.2026).
12. A.M. Hartingh. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2025: Silver. (дата обращения: 22.09.2026).
13. Abraham A., Schopf S. Bioleaching as a biotechnological tool for metal recovery: from sewage to space mining // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2025. – Т. 13. – Art. 1712157. – DOI: 10.3389/fbioe.2025.1712157.

14. Bian Z., Yan B., Liu Y., Jia X., Enkhtur O., Tumendelger A. Synergistic Recovery of Copper, Antimony, and Silver Refractory Sulfide Minerals Using an ADD/Z-200 Mixed Collector System // *Minerals*. – 2025. – Т. 15, № 11. – Art. 1219. – DOI: 10.3390/min15111219.
15. Biomining: A sustainable approach for metal recovery in low-grade ores. // *ScienceDirect*: [сайт]. – 2026. (дата обращения: 22.09.2026).
16. Brierley C.L., Brierley J.A. Progress in bioleaching: part B, applications of microbial processes by the minerals industries // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2022. – Т. 106. – P. 5913–5928. – DOI: 10.1007/s00253-022-12085-9.
17. Park I., Hong S., Jeon S., Ito M., Hiroyoshi N. A Review of Recent Advances in Depression Techniques for Flotation Separation of Cu–Mo Sulfides in Porphyry Copper Deposits // *Metals*. – 2020. – Т. 10, № 9. – Art. 1269. – DOI: 10.3390/met10091269.
18. Soltani F., Darabi H., Khodabandehlou F., Parvaneh A., Salehi H. Selective flotation of chalcopyrite over pyrite in a low-grade copper sulfide ore using selective collectors and non-cyanide depressants // *Scientific Reports*. – 2026. – DOI: 10.1038/s41598-026-49274-9.
19. The Silver Institute. World Silver Survey 2025: Silver Supply & Demand. – The Silver Institute, 2025. URL:.. (дата обращения: 22.09.2026).

References

1. «Almalykskii GMK» imeet na svoikh mestorozhdeniyakh bolee 5 tysyach tonn zolota [«Almalyk MMC» holds more than 5,000 tonnes of gold at its deposits]. RIA Novosti/Prime. Zoloto [Gold], 2026, March 16. RIA Novosti, 2026. (In Russ.)
2. Aktsionernoe obshchestvo «Almalykskii gorno-metallurgicheskii kombinat»: ofitsialnyi sait [JSC Almalyk Mining and Metallurgical Combine: official website]. (In Russ.)
3. Avtoklavnoe okislenie upornykh zolotosoderzhashchikh kontsentratorov s ispolzovaniem galogensoderzhashchikh rastvoritelei i sorbenta [Autoclave oxidation of refractory gold-bearing concentrates using halogen-containing solvents and a sorbent]. Tsvetnye Metally [Non-Ferrous Metals]. (In Russ.)
4. Optimizatsiya protsessa avtoklavno-sorbtsionnogo okisleniya upornykh zolotosoderzhashchikh kontsentratorov [Optimization of the autoclave-sorption oxidation process for refractory gold-bearing concentrates]. CyberLeninka. (In Russ.)
5. Povedenie osnovnykh elementov pri avtoklavnom okislenii polimetallichesкого sulfidnogo flotokontsentrata, sodержashchego volfram i molibden [Behavior of the main elements during autoclave oxidation of a polymetallic sulfide flotation concentrate containing tungsten and molybdenum]. CyberLeninka. // CyberLeninka. (In Russ.)
6. Gidrometallurgicheskoe izvlechenie medi i serebra iz kontsentratorov flotatsii smeshannoi rudy [Hydrometallurgical recovery of copper and silver from flotation concentrates of mixed ore]. Tsvetnye Metally [Non-Ferrous Metals]. (In Russ.)
7. Vozmozhnosti i perspektivy promyshlennogo ispolzovaniya netsianistykh rastvoritelei zolota i serebra [Prospects for the industrial use of non-cyanide solvents for gold and silver]. Zolotodobycha [Gold Mining]. (In Russ.)

8. Opredeleyeny usloviya effektivnogo izvlecheniya zolota i serebra iz nizkosortnykh rud [Conditions for efficient recovery of gold and silver from low-grade ores determined]. Uralskii federalnyi universitet: ofitsialnyi sait [Ural Federal University: official website]. Ural Federal University. (In Russ.)
9. Perspektivnye sposoby intensivifikatsii protsessa flotatsii medno-porfirovykh i zoloto-serebryanykh rud putem primeneniya elektrokhimicheskoi obrabotki [Promising ways to intensify flotation of copper-porphyry and gold-silver ores using electrochemical treatment]. CyberLeninka. (In Russ.)
10. Uzbekskii AGMK k 2031 g uvelichit vypusk medi v 3,3 raza [By 2031, Uzbekistan's Almalyk MMC to increase copper output 3.3-fold]. RIA Novosti/Prime. Zoloto [Gold], 2024, June 28. RIA Novosti, 2024. (In Russ.)
11. Uchenye pridumali, kak effektivno poluchat blagorodnye metally iz medno-kolchedannoi rudy [Scientists have found a way to efficiently recover precious metals from copper-pyrite ore]. Naked Science, 2023. (In Russ.)
12. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2025: Silver / A.M. Hartingh. Reston, VA, USGS, 2025.
13. Bioleaching as a biotechnological tool for metal recovery: from sewage to space mining. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2025.
14. Synergistic Recovery of Copper, Antimony, and Silver Refractory Sulfide Minerals Using an ADD/Z-200 Mixed Collector System. Minerals, 2025, vol. 15, ar // Minerals. – 2025. – Vol. 1219, No. 11. – Art. 1219. – DOI: 10.3390/min15111219.
15. Biomining: A sustainable approach for metal recovery in low-grade ores. ScienceDirect. – 2026.
16. Progress in bioleaching: part B, applications of microbial processes by the minerals industries. PMC (National Library of Medicine), 2022. PMC (National Library of Medicine), 2022.
17. A Review of Recent Advances in Depression Techniques for Flotation Separation of Cu–Mo Sulfides in Porphyry Copper Deposits. Metals, 2020, vol. 10, ar // Metals. – 2020. – Vol. 1269, No. 9. – Art. 1269. – DOI: 10.3390/met10091269.
18. Selective flotation of chalcopyrite over pyrite in a low-grade copper sulfide ore using selective collectors and non-cyanide depressants. Scientific Reports. – 2026. – DOI: 10.1038/s41598-026-49274-9.
19. The Silver Institute. World Silver Survey 2025: Silver Supply & Demand. 2025. The Silver Institute, 2025.