

Научная статья
УДК 622,7
DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-79-90

Извлечение золота и серебра из шихты отходов горных предприятий

Лидия Владимировна Шумилова¹, Алиса Николаевна Хатькова²,
Константин Константинович Размахнин³,
Михаил Фёдорович Простакишин⁴

^{1,2,3,4}Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

¹shumilovalv@mail.ru, ²alisa1965.65@mail.ru,

³constantin-const@mail.ru, ⁴m.prostakishin@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию
12.04.2023

Одобрена после
рецензирования 01.06.2023

Принята к публикации
04.06.2023

Ключевые слова:

горнопромышленные
отходы,
криогеотехнология,
рециклинг, золото, лежалые
хвосты, забалансовая
руда, окружающая среда,
активация цианида натрия,
свинцовый глет, озон

Разработка криогеотехнологии кучного выщелачивания золота из отходов горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий с целью контроля движения минеральной массы на всех этапах жизненного цикла предприятия, является актуальной научной задачей. Цель исследования – разработка технологии круглогодичной переработки техногенных отходов горного предприятия с применением способов интенсификации. Задачи исследования: 1) химический анализ исходной шихты проб, состоящей из забалансовой руды месторождения «Талатуй» (проба ТП-1-22-3) и хвостов ЗИФ (проба ТП-2-22-Х) по классам крупности; 2) выбор оптимальной доли шихты проб ТП-1-22-3 и ТП-2-22-Х; 3) тестирование в перколяционной колонне (классический способ КВ); 4) химический анализ кеков выщелачивания шихты проб ТП-1-22-3 и ТП-2-22-Х по классам крупности; 5) разработка и апробация в лабораторных условиях технологической схемы круглогодичного извлечения золота из шихты отходов горных предприятий добычи и переработки с применением методов интенсификации. Исследования проведены в два этапа: первый этап – классический способ КВ гранул, полученных в результате окомкования забалансовой руды и лежалых хвостов (аналог для сравнения); второй этап – способ КВ гранул с применением процессов дезинтеграции сульфидных минералов с инкапсулированными включениями золота тонким измельчением и окисления. Разработана и апробирована в лабораторных условиях технологическая схема извлечения золота из шихты отходов горных предприятий добычи и переработки, состоящей из следующих операций: 1) измельчение лежалых хвостов до 90 % класса минус 0,071 мм с добавкой в качестве окислителя свинцового глета; 2) подготовка (активация) выщелачивающего раствора NaCN + озон; 3) окомкование гранул, состоящих из шихты (20 % забалансовой руды и 80 % лежалых хвостов); 4) выщелачивание золота цианированием в перколяционной колонне. Разработанная технология позволяет осуществлять выщелачивание круглогодично, увеличить извлечение золота на 9,3 % (с 75,1 до 84,4 %), постепенно снижать источники техногенной опасности и решать проблемы золотодобывающей отрасли.

Благодарность: Работа выполнена в рамках реализации проекта РНФ 22-17-00040 «Научное обоснование и разработка экологически чистых безотходных технологий переработки природного и техногенного минерального сырья» (2022–2023 гг.).

Original article

Extraction of Gold and Silver from the Charge of Mining Waste

Lidiya V. Shumilova¹, Alisa N. Khatkova²,
Konstantin K. Razmakhnin³, Mikhail F. Prostakishin⁴

^{1,2,3,4}Transbaikal State University, Chita, Russia

¹shumilovalv@mail.ru, ²alisa1965.65@mail.ru,

³constantin-const@mail.ru, ⁴m.prostakishin@gmail.com

Information about the article

Received April 12, 2023

Approved after reviewing
June 1, 2023

Accepted for publication
June 4, 2023

Keywords:

mining waste,
cryogeotechnology, recycling,
gold, stale tailings, off-balance
ore, environment, activation
of sodium cyanide, lead glet,
ozone

The development of cryogeotechnology for heap leaching of gold from waste from mining and mining processing enterprises in order to control the movement of mineral mass at all stages of the life cycle of the enterprise is an urgent scientific task. The purpose of the study is to develop a technology for year-round processing of man-made waste from a mining enterprise with the use of intensification methods. Research objectives are as follows: 1) chemical analysis of the initial sample charge consisting of off-balance ore from the "Talatuy" deposit (TP sample-1-22-H) and ZIF tails (TP test-2-22- X) by size classes; 2) selection of the optimal fraction of the charge of TP samples-1-22- Z and TP-2-22; 3) testing in a percolation column (the classic KV method); 4) chemical analysis of leaching cakes of the charge of TP samples-1-22-Z and TP-2-22-X by size classes; 5) development and testing in laboratory conditions of the technological scheme of year-round extraction of gold from the charge of mining waste mining and processing enterprises using intensive methods. The study has been carried out in two stages: the first stage is the classical method of KV granules obtained as a result of pelletizing off-balance ore and stale tailings (an analogue for comparison); the second stage is the method of KV granules, using the processes of disintegration of sulfide minerals with encapsulated inclusions of gold by fine grinding and oxidation. A technological scheme for extracting gold from the waste charge of mining and processing enterprises has been developed and tested in laboratory conditions, consisting of the following operations: grinding of stale tailings up to 90 % of class minus 0.071 mm with the addition of lead gleta as an oxidizer; 2) preparation (activation) of a leaching solution of NaCN + ozone; 3) pelletizing of granules consisting of from the charge (20 % off-balance ore and 80 % of stale tailings); 4) leaching of gold by cyanidation in a percolation column. The developed technology makes it possible to carry out leaching year-round, increase gold extraction by 9.3 % (from 75.1 to 84.4 %), gradually reduce the sources of man-made hazards and solve the problems of the gold mining industry.

Acknowledgement: The work was carried out within the framework of the implementation of the RNF 22-17-00040 project "Scientific substantiation and development of environmentally friendly waste-free technologies for processing natural and man-made mineral raw materials" (2022–2023).

Введение. Большой объём техногенных скоплений на территории Дальневосточного федерального округа и ужесточение экологических требований по загрязнению окружающей среды, как промышленных площадок ЗИФ и горных отводов добывающих предприятий, так и близлежащих посёлков, создают благоприятные потенциальные возможности для внедрения технологий переработки отходов производства. Такая технология должна быть простой, экономически целесообразной и иметь хорошую апробацию в производственных условиях, в том числе в суровых климатических условиях [4; 5; 7; 10–11], снижать экологическую нагрузку на окружающую природную среду [1; 14–15; 17].

Кучное выщелачивание золота имеет неоспоримые преимущества перед классическими фабричными технологиями (табл. 1).

Поэтому на сегодняшний день единственной технологией, отвечающей вышеперечисленным требованиям, является кучное выщелачивание (КВ) [6–9; 12–13; 16; 18].

Кроме вышеперечисленных преимуществ, технология рециклинга по малому замкнутому циклу должна обеспечивать возможность одновременной переработки техногенных отходов как горнодобывающих, так и горноперерабатывающих предприятий, а также позволять осуществлять контроль над движением природного вещества на всех этапах жизненного цикла предприятия. При условии осуществления ряда общепринятых и запатентованных способов [2–3; 6; 8; 9], направленных на извлечение благородных металлов в течение всего календарного года, статус технологии изменяется на криогеотехнологию кучного выщелачивания.

Таблица 1 / Table 1

Сравнение основных показателей переработки золотосодержащего минерального сырья по классической фабричной технологии и КВ / Comparison of the main indicators of gold-bearing mineral raw materials processing, using classical factory technology and KV

Показатели переработки / Processing indicators	Фабричная технология / Factory technology	Метод кучного выщелачивания / Method of heap leaching
Расход электроэнергии, кВт·ч/т / Electricity consumption, kWh/t	25–32	5–7
Расход воды, м ³ /т / Water consumption, m ³ /t	0,8–1,2	0,2–0,3
Производительность труда, усл. ед. / Labor productivity, conl. units	1	8–12
Капитальные затраты, усл. ед. / Capital costs, conl. units	1	0,35–0,50
Эксплуатационные затраты, усл. ед. / Operating costs, conl. units	1	0,3–0,4
Срок окупаемости вложений в создание промышленного производства, лет / Payback period of investments in the creation of industrial production, years	Не менее 5 / At least 5	Не более 2 / At least 2

Объект исследования – шихта отходов горного предприятия ООО «Дарасунский рудник»: забалансовая руда месторождения Талатуй (проба ТП-1-22-3) хвосты ЗИФ (проба ТП-2-22-Х). **Предмет исследования** – процесс выщелачивания золота и серебра из шихты проб с применением методов интенсификации процесса выщелачивания.

Цель исследования – разработка технологии круглогодичной переработки техногенных отходов горного предприятия с применением способов интенсификации.

Задачи исследования: 1) химический анализ исходной шихты проб, состоящей из забалансовой руды месторождения Талатуй (проба ТП-1-22-3) и хвостов ЗИФ (проба ТП-2-22-Х) по классам крупности; 2) выбор оптимальной доли шихты проб ТП-1-22-3 и ТП-2-22-Х; 3) тестирование в перколяционной колонне (классический способ КВ); 4) химический анализ кеков выщелачивания шихты проб ТП-1-22-3 и ТП-2-22-Х по классам крупности; 5) разработка и апробация в лабораторных условиях технологической схемы круглогодичного извлечения золота из шихты отходов горных предприятий добычи и переработки с применением методов интенсификации.

Материалы и методы исследования. Исследовалась представительная лабораторная технологическая проба забалансовой руды месторождения «Талатуй» (рудный склад забалансовой руды, штабель № 3), (ТП-1-22-3) и лежалых хвостов ЗИФ ООО «Дарасунский рудник», керновые про-

бы рыхлого материала из хвостохранилища с глубины 5,5 м (ТП-2-22-Х). Работы проведены в лаборатории ООО «ГРК Дархан» (Забайкальский край, Оловянинский район, с. Турга) в декабре 2022 г.

Изучение вещественного состава осуществлялось с использованием следующих методов: ситовой анализ, спектральный, атомно-абсорбционный, фазовый, рентгено-фазовый, рН – метрия, пробирный анализ и др. Проведены экспериментальные исследования кучного выщелачивания на лабораторной пробе. Обработка результатов выполнена с применением методов прикладной математики, математической статистики, программ Microsoft Excel, STATISTICA.

Разработанность темы. Классическая технология КВ изучена достаточно полно и получила широкое распространение за рубежом и в России. Разработанность темы исследований можно резюмировать в виде информации, которую компактно представил М. И. Фазлуллин, д-р техн. наук, – табл. 2 [6].

Для таких типов минерального сырья, как полностью окисленная руда или сульфидно-окисленная со степенью окисленности более 70 %, условия применения кучного выщелачивания являются весьма благоприятными и благоприятными, соответственно. А для окислено-сульфидной руды со степенью окисленности менее 70 %, и тем более, для сульфидной руды – неблагоприятными. Аналогичные выводы можно применить и к техногенным отходам.

Характеристика условий применимости кучного выщелачивания золота из рудных месторождений /
 Characteristics of the conditions of applicability of heap leaching of gold from ore deposits

Наименование признаков / Name signs	Условия применения кучного выщелачивания / Conditions of application of heap leaching		
	весьма благоприятные / very favourable	благоприятные / favourable	неблагоприятные / unfavourable
Географо-экономическое положение месторождения – объекта кучного выщелачивания / Geographical and economic position of the deposit – the object of heap leaching	Горнорудные предприятия расположены вблизи железных и государственных автомобильных дорог / Mining enterprises are located near railways and state highways	Горнорудные предприятия расположены на небольшом расстоянии от подъездных путей / Mining enterprises are located at a short distance from the access roads	Горнорудные предприятия находятся на значительном расстоянии от подъездных путей / Mining enterprises are located at a considerable distance from access roads
Климатические условия / Climatic conditions	Климат тёплый, сухой. Продолжительность периода с отрицательными температурами 2...4 месяца / The climate is warm and dry. The duration of the period with negative temperatures is 2...4 months	Климат умеренный с небольшими осадками. Продолжительность периода с отрицательными температурами 5...7 месяцев / The climate is temperate with light precipitation. The duration of the period with negative temperatures is 5...7 months	Климат резкоконтинентальный с длительными осадками. Продолжительность периода с отрицательными температурами 8...9 месяцев / The climate is sharply continental with long precipitation. The duration of the period with negative temperatures is 8...9 months
Содержание золота в исходной руде, г/т / Gold content in the initial ore, g/t	Более 2,0 / More than 2.0	1,0...2,0	Менее 1,0 / Less than 1.0
Тип руды по степени сульфидности / Ore type by degree of sulfidity	Малосульфидная / Low sulfide	Умеренно сульфидная / Moderately sulfide	Существенно сульфидная / Essentially sulfide
Содержание сульфидов, % / Content of sulfides, %	До 2,0 / Up to 2.0	2...5	5...20 и более / 5...20 and more
Тип руды по степени окисленности / Ore type by degree of oxidation	Полностью окисленная руда / Fully oxidized ore	Сульфидно-окисленная со степенью окисленности более 70 % / Sulfide-oxidized with an oxidation state of more than 70 %	Окислено-сульфидная со степенью окисленности менее 70 % / Oxidized-sulfide with an oxidation state of less than 70 %
Наличие вредных примесей (мышьяк, сурьма), органических и углеродистых веществ / The presence of harmful impurities (arsenic, antimony), organic and carbonaceous substances	Вредные примеси, углеродистые и органические вещества отсутствуют / Harmful impurities, carbonaceous and organic substances are absent	Содержание вредных примесей менее 1,0 %, углеродистых и органических веществ менее 0,2 % / The content of harmful impurities is less than 1.0 %, carbonaceous and organic substances are less than 0.2 %	Содержание вредных примесей более 1,0 %, углеродистых и органических веществ более 0,2 % / The content of harmful impurities is more than 1.0 %, carbonaceous and organic substances are more than 0.2 %
Характер рудной минерализации / The nature of ore mineralization	Прожилковая, налеты и корочки на стенках открытых трещин / Veined, deposits and crusts on the walls of open cracks	Мелкая, прожилковая, прожилково-вкрапленная / Fine, veined, veined-interspersed	Тонковкрапленная, дисперсная, равномерно вкрапленная по всей массе руды / Thinly interspersed, dispersed, evenly interspersed throughout the ore mass
Форма нахождения золота / The form of finding gold	Содержание свободного золота более 50 % и открытые сростки с другими минералами / Free gold content of more than 50 % and open accretions with other minerals	Содержание свободного золота менее 50 % и сростки с другими минералами / Free gold content of less than 50 % and accretions with other minerals	Золото в ассоциации с другими минералами, покрытое инертной пленкой / Gold in association with other minerals, coated with an inert film

Окончание табл. 2 / End the table 2

Наименование признаков / Name signs	Условия применения кучного выщелачивания / Conditions of application of heap leaching		
	весьма благоприятные / very favourable	благоприятные / favourable	неблагоприятные / unfavourable
Размер растворимых частиц золота, мк / The size of soluble gold particles, mk	Менее 200 / Less than 200	200...500	500...600
Минеральные типы руд и формы рудных тел / Mineral types of ores and forms of ore bodies	Золото-кварцевый тип, представленный жилами, жильными зонами и штокверками / Gold quartz type, represented by veins, vein zones and stockwork	Золото-карбонатный тип, представленный жилами, прожилками, гнездами и вкрапленностью в карбонатных толщах и метасоматитах / Gold-carbonate type, represented by veins, veins, nests and inclusions in carbonate strata and metasomatites	Золото-сульфидный тип, где золото ассоциирует с пиритом, халькопиритом, галенитом в виде вкрапленников в рудных телах / Gold-sulfide type, where gold associates with pyrite, chalcopyrite, galena in the form of inclusions in ore bodies
Перспективы прироста запасов руды / Prospects for ore reserves growth	Прогнозная оценка прироста запасов руды положительная / The forecast estimate of ore reserves growth is positive	Возможен прирост запасов / Possible increase in reserves	Вблизи месторождения прирост запасов для КВ не ожидается / Near the field, no increase in reserves for KV is expected
Источники поступления руды для кучного выщелачивания / Sources of ore intake for heap leaching	Отвалы забалансовых и бедных руд, хвосты обогатительных фабрик / Off-balance sheet and poor ore dumps, tailings of processing plants	Руда месторождений, разрабатываемых открытым способом / Ore deposits developed by the open method	Месторождения, разрабатываемые подземным способом / Deposits developed by the underground method
Производительность предприятия КВ, тыс.т/год / Enterprise productivity KV, thousand tons/year	Более 500 / More than 500	200...500	Менее 200 / Less than 200
Предварительная рудоподготовка / Preliminary ore preparation	Не требуется / Not required	Окомкование, гранулирование / Pelletizing, granulation	Предварительная кислотная обработка, обжиг / Pre-acid treatment, roasting
Степень дробления руды / Ore Crushing Degree	Крупная / Large	Средняя / Medium	Мелкая / Small

В связи с этим в большинстве случаев по экономическим и экологическим критериям такое минеральное сырьё не подлежит переработке и считается некондиционным. Однако применение процессов окисления и интенсификации позволяет считать данный тип сырья пригодным для КВ. При разработке нового решения следует учесть, что технология должна быть гибкой и оперативно перестраиваться, так как содержание золота в лежалых хвостах, взятых при опробовании с различной глубины хвостохранилища и на разных складах забалансовой руды, могут существенно отличаться по вещественному составу и содержанию благородных металлов. Это объясняется отработкой различных рудных пластов в периоды функционирования горного предприятия.

Экспериментальным путём определён оптимальный состав шихты, состоящий из

20 % забалансовой руды ТП-1-22-3 и 80 % лежалых хвостов ТП-2-22-Х.

В лабораторных условиях проведено тестирование шихты проб ТП-1-23-3 и ТП-2-22-Х в перколяционной колонне цианированием с имитацией процесса КВ. Сделан химический анализ исходных проб и кеков выщелачивания.

В связи с тем, что в исходных пробах содержание серебра составило менее предела обнаружения по методике пробирного анализа (< 5,0 г/т), анализ проводился только на золото. Результаты химического анализа исходной шихты проб ТП-1-22-3 и ТП-2-22-Х по классам крупности представлены в табл. 3.

Тестирование в перколяционной колонне проводилось на забалансовой руде крупностью минус 20 мм (ТП-1-22-3-20) массой 10 кг и хвостах ЗИФ (ТП-1-22-Х) массой 40 кг.

После проведения окомкования с расходом цемента 10 кг/т, извести 2 кг/т, шихта распределялась на 5 поддонах по 10 кг в каждом. Через 24 часа выдержки при комнатной температуре и относительной влажности шихту загружали в перколятор. Исходная высота шихты в колонне составила 1,92 м.

Для выщелачивания применялся раствор концентрацией NaCN 0,5 г/л в объёме 15 л. Насос-дозатор был настроен на производительность орошения 150 л/м²·сут. Данные оперативного контроля выщелачивания приведены в табл. 4.

По данным оперативного контроля, выщелачивание золота из шихты практически прекратилось через 15 суток. На 20 сутки подача раствора в колонну прекращена через 24 часа после остановки подачи раствора, произведена разгрузка колонны. Высота шихты в колонне перед разгрузкой составила 1,85 м. После разгрузки колонны проведено

взвешивание кека выщелачивания. Влажность кека составила 24,4 %. Расход цианида с учётом остаточного содержания в продуктивных растворах составил 0,12 кг/т. После сушки проведено деление пробы с помощью желобчатого делителя, отобрана представительная проба для проведения химического анализа кека по классам крупности и прямого определения содержания золота в кеке.

Зависимость извлечения золота от продолжительности цианирования (кинетика выщелачивания золота) представлена на рис. 1. Баланс металла по тесту приведён в табл. 5.

Извлечение золота по данным пробирного анализа составило 75,1 % при продолжительности выщелачивания в колонне в течение 21 суток.

Результаты химического анализа кека выщелачивания шихты проб TP-1-22-3 и TP-2-22-X по классам крупности представлены в табл. 6.

Таблица 3 / Table 3

Химический анализ исходной шихты проб TP-1-22-3 и TP-2-22-X по классам крупности /
Chemical analysis of the initial charge of TP samples-1-22- Z and TP-2-22- X by size classes

Класс крупности, мм / Size class, mm	Выход / Yield		Содержание Au, г/м / Au content, g/t	Распределение Au, % / Au Distribution, %
	кг / kg	%		
-20+15	0,042	0,42	0,06	0,07
-15+10	0,300	3,00	0,12	1,00
-10+5	0,834	8,34	0,15	3,48
-5+1	0,474	4,74	0,58	7,66
-1+0,4	0,3010	3,01	0,40	3,35
-0,4+0,071	6,546	65,46	0,33	60,16
-0,071	1,503	15,03	0,58	24,28
Итого: / Total:	10,000	100,00	0,36	100,00

Таблица 4 / Table 4

Данные оперативного контроля выщелачивания / Operational leaching control

Время выщ., сут / Leaching time, day	Выщелачивающий раствор / Leaching solution		Продуктивный раствор / Productive solution				Извлечено в раствор / Extracted into solution	
	Подача р-ра, л / сут / R-ra supply, l / day	Конц. NaCN р-ре, г/л / End. NaCN r-re, g/l	Объём р-ра, л / Volume r-ra, l	Содерж. Au, мг/л / Content. Au, mg/l	Содерж. NaCN, г/л / Content. NaCN, g/l	РН / Ph	Au, мг / Au, mg	Au, % / Au, %
0	0	0	0,000	0,0	-	-	0,00	0,00
5	3	0,5	8,766	0,6	0,56	12,5	5,26	29,22
10	3	0,5	13,470	0,3	0,52	12,2	9,30	51,67
15	3	0,5	14,409	0,1	0,29	12,1	10,74	59,68

Окончание табл. 4 / End the table 4

Время выщ., сут / Leaching time, day	Выщелачивающий раствор / Leaching solution		Продуктивный раствор / Productive solution				Извлечено в раствор / Extracted into solution	
	Подача р-ра, л/сут / R-ra supply, l/day	Конц. NaCN р-ре, г/л / End. NaCN r-re, g/l	Объём р-ра, л / Volume r-ra, l	Содерж. Au, мг/л / Content. Au, mg/l	Содерж. NaCN, г/л / Content. NaCN, g/l	РН / Ph	Au, мг / Au, mg	Au, % / Au, %
20	3	0,5	14,663	0,0	0,52	12,7	10,74	59,68
21	0	-	0,592	0,0	0,37	11,8	10,74	59,68

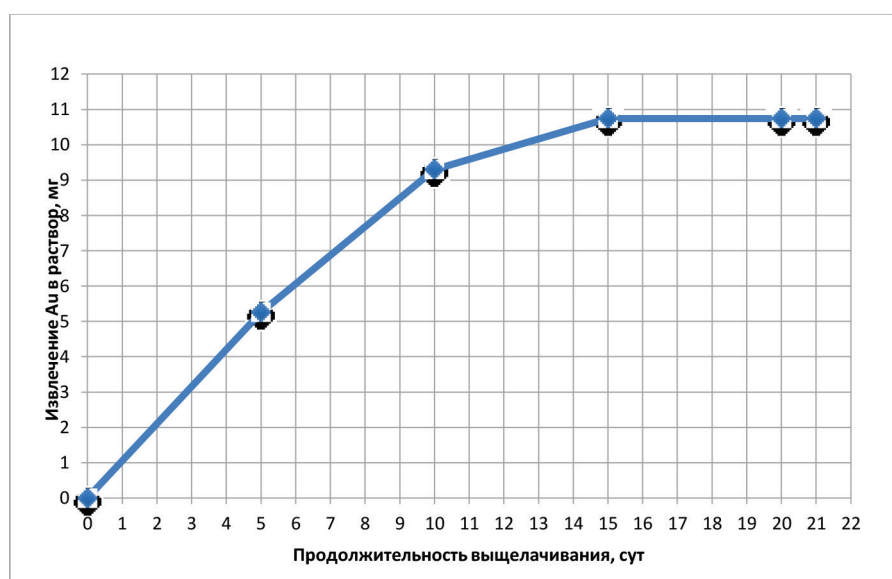


Рис. 1. Кинетика выщелачивания золота из шихты / Fig. 1. Kinetics of gold leaching from the charge

Таблица 5 / Table 5

Баланс металлов по данным пробирного анализа/ Balance of metals according to assay analysis

Продукт / Product	Выход / Output		Содержание Au, г/т / Au Content, g/t	Извлечение Au, % / Au Extraction, %
	кг / kg	%		
Продуктивный раствор / Productive solution		0,40	-	75,10
Выщелоченная шихта (кек) / Leached charge (cake)	49,802	99,60	0,09	24,90
Исходная шихта / Initial charge	50,000	100,00	0,36	100,00

Таблица 6 / Table 6

Химический анализ кека выщелачивания шихты проб ТП-1-22-З и ТП-2-22-Х по классам крупности / Chemical analysis of the leaching cake of the charge of TP samples-1-22- Z and TP-2-22- X by size classes

Класс крупности, мм / Size class, mm	Выход / Yield		Содержание Au, г/т / Au content, g/t	Распределение Au, % / Au Distribution, %
	Кг / kg	%		
-20+15	0,040	0,36	0,12	0,49
-15+10	0,272	2,47	0,30	8,30
-10+5	0,928	8,44	0,48	45,31
-5+1	0,550	5,00	0,10	5,60

Класс крупности, мм / Size class, mm	Выход / Yield		Содержание Au, г/т / Au content, g/t	Распределение Au, % / Au Distribution, %
	кг/ кг	%		
-1+0,4	0,313	2,85	0,13	4,14
-0,4+0,071	7,075	64,38	0,04	28,79
-0,071	1,812	16,49	0,04	7,37
Итого: /	10,99	100,00	0,09	100,00

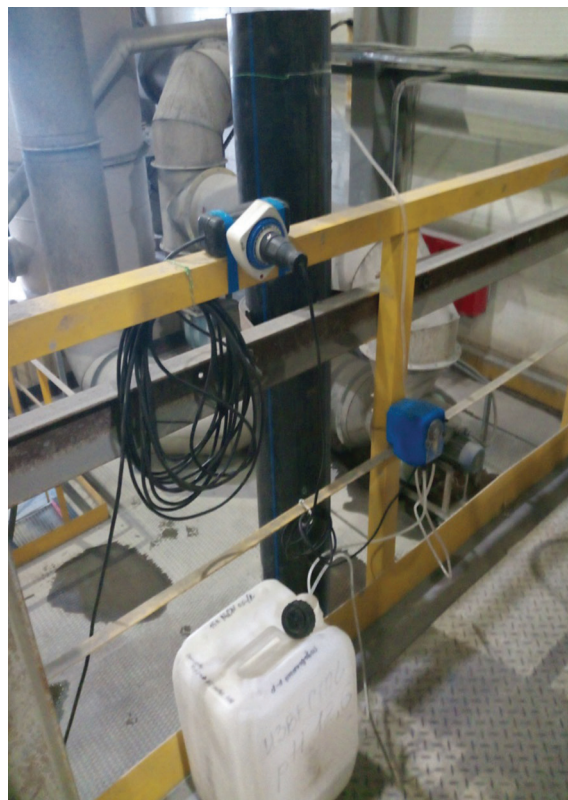
На втором этапе исследований разработана технология извлечения золота из шихты отходов горного предприятия, включающая следующие дополнительные технологические циклы: измельчение лежалых флотационных хвостов в мельнице с подачей в качестве окислителя свинцового глета (1 г/кг); соотношение Ж : Т = 1 : 1, содержание класса минус 0,071 мм – 90 %, расход NaOH – 1 г/л; совместное окомкование гранул забалансовой руды и лежалых хвостов; активация ци-

анида натрия в закрытом агитационном чане для приготовления раствора с подачей от озонатора окислителя (озон) под давлением по воздушным коллекторам, расположенным в днище ёмкости; формирование штабеля из гранул.

Общий вид перколяционной колонны, система подачи выщелачивающего раствора, система сбора продуктивного раствора установки выщелачивания при проведении тестирования показаны на рис. 2



а)



б)



в)

Рис. 2. Установка для тестирования (перколяционная колонна) шихты проб ТП-1-22-З и ТП-2-22-Х:
а) общий вид колонны;
б) система подачи выщелачивающего раствора;
в) система сбора продуктивного раствора /
Fig. 2. Installation for testing (percolation column) of TP sample charge-1-22- Z and TP-2-22- X:
a) general view of the column;
b) leaching solution supply system;
c) the system of collecting a productive solution

Применение процессов дезинтеграции сульфидных минералов с инкапсулированными включениями золота и окисления, позволили повысить качественные показатели выщелачивания: извлечение золота составило 84,4 %, что на 9,3 % больше, чем при классическом способе выщелачивания гранул шихты КВ. Дальнейший этап – проведение

исследований на укрупнённой лабораторной пробе. Некоторые сведения об объёмах золотосодержащих техногенных отходов Забайкальского края, представленные в табл. 7, свидетельствует о перспективности разработанной технологии не только для Дарасунского рудника, но и для ряда золотодобывающих предприятий.

Таблица 7 / Table 7

Объёмы техногенных золотосодержащих отходов Забайкальского края / Volumes of technogenic gold-containing waste of the Transbaikal Territory

<i>Предприятие, хвостохранилище / Enterprise, tailings storage facility</i>	<i>Масса накопленных горных пород, тыс. т / Mass of accumulated rocks, thousand tons</i>	<i>Площадь хвостохранилища, га / Area of the tailings storage facility, ha</i>
ЗАО «Уралэлектромодель-Амазар» Ключевская ОФ* № 1	13 572,0	68,0
Давендинская ОФ № 2 / Uralelectromodel-Amazar CJSC Klyuchevskaya OF No. 1 Davendinskaya OF No. 2	358,1	21,2
ОАО «Забайкалзолото» Дарасунская ОФ	2 750,0	18,6
ОФ рудника Любовь / JSC «Zabaikalzoloto» Darasunskaya OF OF the mine Love	235,0	6,8

Окончание табл. 7 / End the table 7

<i>Предприятие, хвостохранилище / Enterprise, tailings storage facility</i>	<i>Масса накопленных горных пород, тыс. т / Mass of accumulated rocks, thousand tons</i>	<i>Площадь хвостохранилища, га / Area of the tailings storage facility, ha</i>
ОАО «Балейзолото» Балейская ЗИФ** № 1 Тасеевская ЗИФ № 2 / JSC «Balezoloto» Baleysskaya ZIF No. 1 Tas- eevskaya ZIF No. 2	10 000,0	54,0
	23 833,7	46,0
Итого: / Total:	50 748,8	214,6
<i>Примечания: * ОФ – обогатительная фабрика; **ЗИФ – золотоизвлекательная фабрика.</i>		

Выводы. Разработана и апробирована в лабораторных условиях технологическая схема извлечения золота из шихты отходов горных предприятий добычи и переработки, состоящей из следующих операций: 1) измельчение лежалых хвостов до 90 % класса минус 0,071 мм с добавкой в качестве окислителя свинцового глета; 2) подготовка (активация) выщелачивающего раствора NaCN с подачей озона; 3) окомкование гранул, состоящих из шихты (20 % забалансовой руды и 80 % лежалых хвостов); 4) выщелачивание

золота в штабелях цианированием круглого-дично.

Дезинтеграция «минерала-хозяина» обеспечила доступ активных выщелачивающих растворов к инкапсулированным включениям золота в сульфидных минералах (пирит, арсенопирит), дробная подача окислителей – свинцовый глет в измельчение и озон при активации раствора NaCN, позволили повысить извлечение благородного металла КВ на 9,3 % (с 75,1 % до 84,4 %) по сравнению с аналогом (классический способ) в течение 21 суток.

Список литературы

1. Крупская Л. Т., Мелконян Р. Г., Зверева В. П., Раганина Н. К., Голубев Д. А., Филатова М. Ю. Опасность отходов, накопленных горными предприятиями в Дальневосточном федеральном округе, для окружающей среды и рекомендации по снижению риска экологических катастроф // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 12. С. 102–112.
2. Патент № 2350665 Российская Федерация, МПК C22B 3/18 (2006.01) C22B 11/08 (2006.01). Способ кюветно-кучного выщелачивания металлов из минеральной массы: № 2007118333/03 (019956): заявл. 16.05.2007; опубл. 27.03.09. / Секисов А. Г., Резник Ю. Н., Зыков Н. В., Лавров А. Ю., Манзырев Д. В., Климов С. С., Королев В. С., Конарева Т. Г. 5 с.
3. Патент № 2707459 Российская Федерация, МПК C22B 11/00 (2006.01). Способ кучного выщелачивания золота из техногенного минерального сырья: № 2019117482: заявл. 06.04.2019; опубл. 26.11.2019 / Мязин В. П., Шумилова Л. В., Соколова Е. С. 5 с.
4. Рассказов И. Ю., Литвинцев В. С., Мирзеханов Г. С., Банщикова Т. С. Приоритетные направления освоения техногенных комплексов рудно-россыпных месторождений // Недропользование. XXI век. 2016. № 1. С. 46–55.
5. Секисов А. Г., Лавров А. Ю., Рассказова А. В. Фотохимические и электрохимические процессы в геотехнологии. Чита: ЗабГУ, 2019. 306 с.
6. Фазлуллин М. И. Кучное выщелачивание благородных металлов. М.: Академия горных наук, 2001. 646 с.
7. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследования обогатимости сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 218–227.
8. Физико-химическая геотехнология / под общ. ред. В. Ж. Аренса. М.: Горная книга, 2021. 816 с.
9. Шумилова Л. В. Научное обоснование инновационной технологии извлечения золота (разработка, апробация в условиях Забайкалья). London: Palmarium Academic Publ., 2014. 362 с.
10. Яковлев В. Л., Корнилков С. В., Соколов И. В. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2018. 360 с.
11. Яницкий Е. Б., Игнатенко И. М. Горнодобывающая отрасль Белгородской области: наука и производство // Горный журнал. 2020. № 7. С. 44–50.
12. Anderson C. G. Alkaline sulfide gold leaching kinetics // Minerals Engineering. 2016. Vol. 92. P. 248–256.
13. Bobadilla-Fazzini R., Perez A. G., Gautier V., Jordan H., Parada P. Primary copper sulfides bioleaching vs. chloride leaching: advantages and drawbacks // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 168. P. 26–31.

14. Bubnova M. B., Ozaryan Y. A. Integrated assessment of the environmental impact of mining // *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52, no 2. P. 401–409.
15. Hatje V., R. M. A. Pedreira, de Rezende C. E., Augusto C., Schettini F. de Souza G. C., Marin D. C., Hackspacher P. C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide // *Scientific reports*. 2017. Vol. 7. P. 111–117. DOI: 10.1038/s41598-017-11143-x.
16. Naumov V. A., Naumova O. B., Osovetskiy B. M. Transforming the leaching of gold ore // *Modern Problems of Science and Education*. 2013. No. 6. P. 32–43.
17. Rosenfeld C. E., Chaney R. L., Martinez C. E. Soil geochemical factors regulate Cd accumulation by metal hyperaccumulating *Noccaea caerulescens* (J. Presl & C. Presl) FK Mey in field-contaminated soils // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 616. P. 279–287.
18. Velasquez-Yevenes L., Torres D., Toro N. Leaching of chalcopryrite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods // *Hydrometallurgy*. 2018. No. 181. P. 215–220.

References

1. Krupskaya L. T., Melkonyan R. G., Zvereva V. P., Rastanina N. K., Golubev D. A., Filatova M. Yu. The danger of waste accumulated by mining enterprises in the Far Eastern Federal District for the environment and recommendations for reducing the risk of environmental disasters. *Mining information and Analytical Bulletin*, no. 12, pp. 102–112, 2018. (In Rus.).
2. Patent No. 2350665 Russian Federation. IPC C22B 3/18 (2006.01). C22B 11/08 (2006.01). Method of cuvette-heap leaching of metals from mineral mass: No. 2007118333/03 (019956): application 16.05.2007; publ. 27.03.09. Sekisov A. G., Reznik Yu. N., Zykov N. V., Lavrov A. Yu., Manzyrev D. V., Klimov S. S., Korolev V. S., Konareva T. G. (In Rus.).
3. Patent No. 2707459 Russian Federation, IPC C22B 11/00 (2006.01). Method of heap leaching of gold from technogenic mineral raw materials. No. 2019117482. Application 06.04.2019. Publ. 26.11.2019. Myazin V. P., Shumilova L. V. Sokolova E. S. (In Rus.).
4. Rasskazov I. Yu., Litvintsev V. S., Mirzekhanov G. S., Banschikova T. S. Priority directions of development of technogenic complexes of ore-placer deposits // *Subsurface use. XXI century*, no. 1, pp. 46–55, 2016. (In Rus.).
5. Sekisov A. G., Lavrov A. Yu., Rasskazova A. V. Photochemical and electrochemical processes in geotechnology. Chita: Transbaikal State University Publ., 2019. (In Rus.).
6. Fazlullin M. I. Heap leaching of precious metals. Moscow: Academy of Mining Sciences, 2001. (In Rus.).
7. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Studies of the enrichment of sulfide and oxidized ores of gold deposits of the Aldan shield. *Notes of the Mining Institute*, vol. 242, pp. 218–227, 2020. (In Rus.).
8. *Physico-chemical geotechnology*. Under the general editorship of V. Zh. Arens. Moscow: Mining Book, 2021. (In Rus.).
9. Shumilova L. V. Scientific substantiation of innovative gold extraction technology (development, testing in the conditions of Transbaikalia). London: Palmarium Academic Publishing House, 2014. (In Rus.).
10. Yakovlev V. L., Kornilkov S. V., Sokolov I. V. Innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018. (In Rus.).
11. Yanitsky E. B., Ignatenko I. M. Mining industry of the Belgorod region: science and production. *Mining Journal*, no. 7, pp. 44–50, 2020. (In Rus.).
12. Anderson K. G. Kinetics of alkaline sulfide leaching of gold. *Mineral engineering*, vol. 92, pp. 248–256, 2016. (In Eng.).
13. Bobadilla-Fuzzini R., Perez A. G., Gauthier V., Jordan H., Parada P. Primary biological leaching of copper sulfides compared with chloride leaching: advantages and disadvantages. *Hydrometallurgy*, vol. 168, pp. 26–31, 2017. (In Eng.).
14. Bubnova M. B., Ozaryan Yu. A. Complex assessment of the impact of mining on the environment. *Journal of Mining Sciences*, vol. 52, no. 2, pp. 401–409, 2016. (In Eng.).
15. Hatje V., R. M. A. Pedreira, de Resende S. E., Augusto S., Schettini F., de Souza G. S., Marin D. S., Hackspacher P. S. Environmental impact of one of the largest tailings dams in the world. *Scientific Reports*, vol. 7, pp. 111–117, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-11143-x. (In Eng.).
16. Naumov V. A., Naumova O. B., Osovetsky B. M. Transformation of the gold ore leaching process. *Modern problems of science and education*, no. 6, pp. 32–43, 2013. (In Eng.).
17. Rosenfeld S. E., Cheney R. L., Martinez S. E. Soil geochemical factors regulate the accumulation of Cd by hyperaccumulating metal *Noccaea caerulescens* (J. Presl & C. Presl) FK Mey in soils polluted in the field. *Science of the environment as a whole*, vol. 616, pp. 279–287, 2018. (In Eng.).
18. Velasquez-Yevenes L., Torres D., Toro N. Leaching of agglomerated chalcopryrite ore with a high concentration of chlorides and long curing periods. *Hydrometallurgy*, no. 181, pp. 215–220, 2018. (In Eng.).

Информация об авторах

Шумилова Лидия Владимировна, д-р техн. наук, доцент, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; shumilovalv@mail.ru. Область научных интересов: геоэкология, обогащение полезных ископаемых, физико-химическая геотехнология, инновационные технологии, экоинженерия.

Хатькова Алиса Николаевна, д-р техн. наук, профессор, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; alisa1965.65@mail.ru. Область научных интересов: минералого-технологическая оценка неметаллических полезных ископаемых, обоснование методов обогащения и разработка современных технологий переработки нетрадиционных видов минерального сырья для расширения сфер их практического применения.

Размахнин Константин Константинович, д-р техн. наук, доцент, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; constantin-const@mail.ru. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, геоэкология, сорбционные технологии, гидрометаллургия.

Простакишин Михаил Федорович, исполнитель проекта РНФ 22-17-00040, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; m.prostakishin@gmail.com. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, гидрометаллургия, инновационные технологии, экоинженерия.

Information about the author

Shumilova Lidiya V., doctor of technical sciences, associate professor, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia; shumilovalv@mail.ru. Research interests: geoecology, mineral processing, physical and chemical geotechnology, innovative technologies, eco-engineering.

Khatkova Alisa N., doctor of technical sciences, professor, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia; alisa1965.65@mail.ru. Research interests: mineral and technological assessment of non-metallic minerals, justification of enrichment methods and development of modern technologies for processing non-traditional types of mineral raw materials to expand their practical application.

Razmakhnin Konstantin K., doctor of technical sciences, associate professor, Transbaikal State University, Chita, Russia; constantin-const@mail.ru. Research interests: mineral processing, geoecology, sorption technologies, hydrometallurgy.

Prostakishin Mikhail F., executor of the RNF project 22-17-00040, Transbaikal State University, Chita, Russia; m.prostakishin@gmail.com. Research interests: mineral processing, hydrometallurgy, innovative technologies, eco-engineering.

Вклад авторов в статью

Л. В. Шумилова – разработка идеи исследования; анализ разработанности темы; непосредственное руководство экспериментальными исследованиями; анализ полученных результатов; разработка технологической схемы; формулировка выводов; подбор библиографии, написание текста.

А. Н. Хатькова – общее руководство работой.

К. К. Размахнин – обработка результатов исследований с применением методов прикладной математики, математической статистики, программ Microsoft Excel, STATISTICA.

М. Ф. Простакишин – исполнитель экспериментальных работ; подготовка отчёта проведения экспериментальных исследований на перколяторах.

The author's contribution to the article

L. V. Shumilova – development of the research idea; analysis of the topic development; direct management of experimental research; analysis of the results; development of the technological scheme; formulation of conclusions; selection of bibliography, writing the text.

A. N. Khatkova – general management of the work.

K. K. Razmakhnin – processing of research results using methods of applied mathematics, mathematical statistics, programs Microsoft Excel, STATISTICA.

M. F. Prostakishin – performer of experimental works; preparation of a report on experimental studies on percolators.

Для цитирования

Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К., Простакишин М. Ф. Извлечение золота и серебра из шихты отходов горных предприятий // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 2. С. 79–90. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-79-90.

For citation

Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K., Prostakishin M. F. Extraction of gold and silver from the charge of mining waste // Transbaikal State University Journal. 2023. Vol. 29, no. 2. P. 79–90. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-79-90.