

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ, ГОРНЫЕ НАУКИ

SUBSOIL USE, MINING SCIENCES

Научная статья

УДК 622,7

DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-4-51-62

Апробация технологии добычи из россыпных месторождений и бесцианидного извлечения золота из песчано-глинистой фракции отвалов промывочного прибора

Лидия Владимировна Шумилова¹, Константин Константинович Размахнин²

^{1,2}Читинский филиал Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Чита, Россия

¹Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

¹shumilovalv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>

²constantin-const@mail.ru

Переработка россыпей представляет собой экономически выгодное и экологически ответственное решение, что делает её важной задачей для горнодобывающей промышленности и регионов, в которых ведётся добыча золота. Объект исследования – золотосодержащие россыпи со значительным содержанием валунов и песковая часть техногенных отходов длительного периода хранения, полученная на переставных промывочных приборах при обогащении. Цель – экспериментальное исследование работы промприбора при оптимизации отдельных технологических узлов и технологии выщелачивания золота из лежалых отходов мелких фракций (песчано-глинистой фракции в галечных и эфельных отвалах). Задачи исследования: апробация технологии в полупромышленных условиях гравитационного обогащения золотосодержащих песков; апробация технологии выщелачивания золота из техногенных отходов промывки промприбора заменителями цианида в лабораторных условиях. Для изучения золотосодержащих россыпей и их отходов используются атомно-абсорбционные спектрометры AAnalyst и КВАНТ с пробирным методом для повышения надёжности. Сульфидные минералы идентифицированы с помощью оптического микроскопа МБС-9 и химических реактивов. Гранулометрический анализ осуществлён с применением лазерного анализатора. Проведены полупромышленные испытания модифицированной передвижной модульной промывочной установки, определены оптимальные технологические параметры извлечения золота при механической и гидродрозелеваторной загрузке песков. В рамках проведения комплексных испытаний модификаций промывочного оборудования сделана детальная оценка влияния ключевых параметров классификатора на эффективность извлечения золота, в частности исследованы такие параметры, как величина зазора между спиралью и основанием классификатора, скорость вращения спирали, угол её наклона, а также соотношение жидкости и твёрдой фазы на этапе как первичного, так и вторичного разжижения. Проанализированы производительность по исходным пескам и производительность на этапе вторичного разжижения. Сформулирован вывод о том, что новое устройство повышает эффективность разработки валунистых россыпных месторождений, увеличивая производительность оборудования, степень извлечения золота и снижая себестоимость добычи. Потери очень мелкого и тонкого золота сократились на 50 %, а общий показатель извлечения металла увеличился на 7 %. Исследована технология выщелачивания золота из лежалых отходов мелких фракций, в частности из песчано-глинистой фракции в галечных и эфельных отвалах. Извлечение золота составило 85,5 %.

Ключевые слова: золото, россыпные месторождения, промывочный прибор, эффективность процесса, полупромышленные испытания, лабораторные исследования, техногенные отходы, извлечение золота, песчано-глинистая фракция, экологощадящие растворители

Для цитирования

Шумилова Л. В., Размахнин К. К. Апробация технологии добычи из россыпных месторождений и бесцианидного извлечения золота из песчано-глинистой фракции отвалов промывочного прибора // Вестник Забайкальского государственного университета. 2025. Т. 31, № 4. С. 51–62. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-4-51-62

© Шумилова Л. В., Размахнин К. К., 2025



Original article

Testing of Technology for Extraction from Placer Deposits and Cyanide-Free Extraction of Gold from the Sand-Clay Fraction of the Washing Device Dumps**Lidiya V. Shumilova¹, Konstantin K. Razmakhnin²**^{1,2}*Chita branch of Mining Institute named after N. A. Chinakal SB RAS, Chita, Russia*¹*Transbaikal State University, Chita, Russia*¹shumilovalv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>²constantin-const@mail.ru

The processing of alluvial deposits is an economically viable and environmentally responsible solution, making it an important task for the mining industry and the regions where gold is mined. The object of the research is gold-bearing alluvial deposits with a significant content of boulders and the sandy part of long-term technogenic waste obtained from mobile washing devices during enrichment. The goal is to experimentally study the operation of an industrial device while optimizing individual technological units and the technology of gold leaching from stale waste of small fractions (sand-clay fraction in pebble and ephal dump). Research objectives are as follows: 1) testing the technology in semi-industrial conditions of gravity enrichment of gold-bearing sands; 2) testing the technology of gold leaching from technogenic waste of industrial device washing with cyanide substitutes in laboratory conditions. AAnalyst and QUANT atomic absorption spectrometers with the assay method are used to study gold-bearing placers and their wastes to increase reliability. Sulfide minerals were identified using an optical microscope MBS-9 and chemical reagents. Granulometric analysis has been performed using a laser analyzer. Semi-industrial tests of a modified mobile modular washing unit have been conducted, and the optimal technological parameters for gold extraction during mechanical and hydro-elevator loading of sands are determined. As part of the comprehensive testing of flotation equipment modifications, a detailed assessment of the impact of key classifier parameters on the efficiency of gold extraction has been made. In particular, the following parameters are studied: the gap between the spiral and the base of the classifier, the speed of the spiral rotation, the angle of the spiral, and the ratio of liquid and solid phases during both the primary and secondary liquefaction stages. In addition, the performance of the initial sands and the performance at the stage of the secondary liquefaction are analyzed. The new device increases the efficiency of the development of boulder-type placer deposits, increasing the productivity of the equipment, the degree of gold recovery, and reducing the cost of production. The loss of very fine and thin gold has been reduced by 50 %, and the overall recovery rate of the metal has increased by 7 %. The research has been conducted on the technology of gold leaching from stale waste of small fractions: sand-clay fraction in pebble and ephal dump. The gold recovery rate is 85.5 %.

Keywords: gold, placer deposits, washing device, process efficiency, semi-industrial tests, laboratory research, technogenic waste, extraction of gold, sand-clay fraction, environmentally friendly solvents

For citation

Shumilova L. V., Razmakhnin K. K. Testing of technology for extraction from placer deposits and cyanide-free extraction of gold from the sand-clay fraction of the washing device dumps // Transbaikal State University Journal. 2025. Vol. 31, no. 4. P. 51–62. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-4-51-62

Введение. Известны загрузочно-ограничительные устройства гидровашердного типа, широко распространённые на предприятиях, обрабатывающих месторождения россыпного золота [1–3]. При разработке месторождений со значительным содержанием валунов их применение невозможно, а при небольшом количестве камней и валунов осложнено: редкие крупные валуны должны периодически удаляться из промываемых песков уже на плотике россыпи либо при перемещении струей головного гидромонитора по обезвоживающим грохотам наклонного желоба гидровашерда сбрасываются с его верхней кромки. При невозможности сброса валунов струёй гидромонитора они убирают-

ся с ограничительной решётки бункера автокраном или бульдозером¹.

Актуальность исследования. Для уборки крупных галей используется струя гидромонитора, а для валунов – механический способ. Данные процессы занимают много времени и сопровождаются пульсирующим режимом пульпообразования и нерав-

¹ Патент № 2080933 Российская Федерация. Промывочный прибор ПГНВК / Раздолькин В. Н., Ястребов К. Л., Прокопьев С. А. 1997; Патент № 2089295 Российская Федерация. Промывочный прибор с непрерывным выводом концентрата / Раздолькин В. Н., Ястребов К. Л. 1997; Патент № 2198032 Российская Федерация. Промывочно-обогащительный прибор для глинистых металлоносных песков / Ястребов К. Л. 2003; Патент № 2207911 Российская Федерация. Универсальный промывочный комплекс / Галич В. М., Денисов Г. А., Калько И. П., Семенюк Б. С., Сычев В. В. 2003.

номерным питанием гидropодъёмного аппарата, что негативно влияет на эффективность извлечения золота и снижает производительность промывочного оборудования [1; 4–7].

Для эффективной разработки чрезвычайно сложных россыпных месторождений с большим содержанием в песках крупных валунов, разработаны два типа промывочных приборов [1; 6–11].

Следует отметить, что описанными грузочно-ограничительными устройствами гидровальерного типа могут комплектоваться и ныне используемые промывочные приборы при их гидравлической загрузке песками [1].

Объект исследования – золотосодержащие россыпи со значительным содержанием валунов и песковая часть техногенных отходов длительного периода хранения, полученная на переставных промывочных приборах при обогащении.

Предмет исследования – технология переработки золотосодержащих россыпей и мелких фракций лежалых техногенных отходов промприборов.

Цель исследования – экспериментальное исследование работы промприбора при оптимизации отдельных технологических узлов и технологии выщелачивания золота из лежалых отходов мелких фракций – песчано-глинистой фракции в галечных и эфельных отвалах.

Задачи исследования: апробация технологии в полупромышленных условиях гравитационного обогащения золотосодержащих песков; апробация в лабораторных условиях технологии выщелачивания золота заменителями цианида из техногенных отходов промывки промприбора.

Анализ литературных данных

К экологоэкономическим технологиям относятся гравитационный способ обогащения золотосодержащего минерального сырья как коренных, так и россыпных месторождений золота, а также технологии выщелачивания золота экологоэкономическими реагентами – заменителями цианида.

Разработкой технологии и техники для добычи россыпного золота занимались многие учёные: Л. П. Мацуев, Е. И. Богданов, Н. К. Кузнецов, С. М. Шорохов, Б. Э. Фридман, Б. П. Юматов, А. И. Чернов, Г. М. Лезгинцев, А. А. Рожновский, С. В. Потемкин, Г. А. Сумин, О. В. Замятин, А. Д. Чугунов, К. В. Соломин, А. Е. Кокташев, Т. Г. Фоменко и другие, а также научные организации, такие как ООО «ВНИИ-1», АО «Иргиредмет», Московский государственный горный университет и др. [1].

В настоящее время для добычи золота из россыпных месторождений применяют разработанные переставные промывочные приборы двух видов: конвейерно-скрубберные и гидроэлеваторные. Парк конвейерно-скрубберных промывочных приборов составляют установки двух серий МПД (МПД-2, МПД-3, МПД-4, МПД-5, МПД-6) и ПКС (ПКС-1-700, ПКС-1-1200). Парк гидроэлеваторных промывочных приборов состоит также из двух серий установок ПГШ (ПГШ-Ш-30, ПГШ-П-50, ПГШ-П-75) и ГЭП (ГЭП-5, ГЭП-12, ГЭП-63, ГЭП-64 и др.), а также ПГБ-1-1000. Приведённые промывочные приборы, а также технологии гравитационного обогащения, реализуемые на них, остались неизменными с середины 60-х гг. XX в. В последние 25–30 лет разработано значительное количество промывочных приборов, в частности бочечные: ПКС-100, ТОК-200, СБ-12, СБ-15, ПБШ-10У, а также шлюзовые: «Ромашка» (КОУ-1200), ПГШ-50, ПГШ-ЮУ, ПКС-52, СП-50, КС-1, ПБМ-150 «Тайга-2», Шилка-150 и др. [1].

Этап, охватывающий период максимального расцвета добычи россыпного золота, прошёл в связи с отработкой богатых месторождений. Заметным фактором последнего времени стало постепенное снижение экономической эффективности добычи россыпного золота, что обусловлено такими причинами, как ухудшение сырьевой базы россыпных месторождений золота по физическим характеристикам отложений, содержанию и крупности золота, промывистости, мерзлости, коэффициенту разрыхления и объёмному весу продуктивной горной массы, сокращение запасов россыпных месторождений золота, не требующих больших трудозатрат при их разработке и переход на освоение более капиталоемких россыпных месторождений [1; 8; 12; 13].

Выполненный анализ промывочных приборов [1], применяемых в отечественной и зарубежной практике, показывает, что в последние годы разрабатываются преимущественно шлюзовые промывочные приборы, причём без существенного изменения реализуемых на них технологий. Данная проблема сохраняется как для бочечных, так и для скрубберных промывочных приборов.

Основными недостатками применяемых в настоящее время промывочных приборов и реализуемых на них технологий являются значительные потери мелкого и тонкого золота, достигающие 70–80 %. В силу ряда причин, к которым, в частности, относятся

значительные затраты труда, времени и материалов на монтаж, демонтаж и перемещение на новую приборостоянку промывочных приборов, а также потерь сезонного времени на съём металла и обслуживание промприборов, их сезонная производительность составляет лишь 45–65 % от технической [1].

Следовательно, в техногенных отходах, накопленных за длительный период отработки россыпных месторождений, накоплено значительное количество золота, находящегося в тонких классах, которое необходимо извлечь экологоэкономичными реагентами. Нетоксичные растворители для выщелачивания россыпных месторождений становятся перспективным направлением в горной добыче, снижая экологическое воздействие и повышая безопасность [14–17]. Традиционные методы, такие как цианидное выщелачивание, эффективны, но токсичны [18]. Новые технологии, использующие тиомочевину, глицин, гипохлорит натрия и гуматы, уменьшают вредное воздействие на экосистемы [19–22]. Выбор растворителя зависит от химического состава сырья и минералогических характеристик месторождений. Комплексные исследования помогают определить оптимальные методы извлечения ценных компонентов [23–26].

Повышение технологической, экологической и экономической эффективности переработки россыпных месторождений золота является актуальной проблемой и может быть достигнуто разработкой, внедрением в процесс новых технологий и техники.

Методология и методы исследования.

С целью изучения золотосодержащих россыпей и их отходов используются атомно-абсорбционные спектрометры AAnalyst и КВАНТ для точного определения золота. Приведённые приборы применяли с пробирным методом для повышения надёжности результатов. Для идентификации сульфидных минералов использовали оптические микроскопы МБС-9 и химические реактивы. Гранулометрический анализ проводили с помощью сит по ГОСТ 32730-2014 и лазерного анализатора, обеспечивающего высокую точность и скорость измерений. Применяли методику экспериментального исследования цианидного чанового выщелачивания золота из тонкоизмельчённых лежалых хвостов (классический вариант – прототип, концентрация NaCN – 0,1 %), методику экспериментального исследования чанового тиомочевинного выщелачивания золота из тонкоизмельчённых лежалых хвостов в присутствии окислителя (эксперименталь-

ный вариант), методику сравнительной оценки эффективности альтернативных растворителей золота в процессе выщелачивания.

Результаты исследования и их об-суждение. Технологические параметры извлечения золота на передвижной установке определены при испытаниях на повторной разработке полигона техногенной россыпи в Магаданской области в 60-х гг. XX в. Использовались механическая и гидродрозелеваторная загрузка песков.

Для повышения эффективности разработки чрезвычайно сложных россыпных месторождений с большим содержанием в песках крупных валунов (300–2000 мм) предлагается передвижная гидроэлеваторная установка с поточным отделением валунов на загрузочно-ограничительном устройстве гидровашгердного типа, технические возможности которой обеспечивают эффективную промывку песков, содержащих крупные валуны, благодаря снижению трудоёмкости и времени обмыва крупных валунов, улучшению качества исходного питания промывочной установки, повышению ее производительности и степени извлечения золота [1].

Рассмотрим принцип работы передвижной гидроэлеваторной установки с поточным отделением валунов на загрузочно-ограничительном устройстве. Пески подаются в бункер, где осуществляются размыв и крупное грохочение песков струёй головного гидромонитора. Крупные валуны обмываются струей головного гидромонитора, но обмыть их тщательно невозможно, особенно верхнюю и боковые части валуна со стороны гидровашгерда. В связи с этим оператор включает напорную оросительную систему, происходит обмыв валуна и надрешётных фракций одновременно струёй головного гидромонитора и высоконапорными вертикальными водяными струями дополнительной напорной оросительной системы. В результате улучшается обмыв на приёмной площадке и ограничительной решётке механического валуноуборщика, значительно сокращается время размыва и крупного грохочения песков. В процессе подъёма валуна опрокидом дополнительная оросительная система не отключается. Происходит окончательный обмыв валуна от глинистой примазки и мелочи в его нижней части за счёт изменения угла поворота оросительной трубы дополнительной оросительной системы вокруг своей оси и совершения ею возвратно-поступательных движений по горизонтальной базовой раме.

Высокий сферический лобовой щит загрузочного бункера (щит изогнут согласно радиусу поворота лобового щита опрокида валунов во избежание трения и возможности их плотного прилегания) препятствует выносу мелких фракций песков и потерям полезного компонента при их стекании во время подъёма опрокида.

После промывки напорная оросительная система выключается. Валун перемещается на грунтовую площадку, откуда убирается бульдозером, как и галечник, из-под гидровашгерда. Пульты дистанционного управления механическим валуноуборщиком и дополнительной оросительной системой расположены на рукояти ручного управления головного гидромонитора. Опрокид поворачивается до конечной нижней точки вращения, где концевой выключатель останавливает его движение. Ограничительная решётка валуноуборщика плотно прилегает к ограничительной решётке загрузочного бункера, а отверстия обеих ограничительных решёток точно совпадают.

Оператор продолжает поднимать по обезживающим грохотам наклонного желоба гидровашгерда надрешётные фракции струёй

головного гидромонитора, сбрасывая их с его верхней кромки. Заканчивая процесс выгонки песков по грохотам, оператор подаёт сигнал (поднятие красного флага или включение лампочки в тёмное время суток над бункером) бульдозеристам, скреперистам. После сигнала пески подаются бульдозером или скрепером в бункер. Подача песков прерывается после опускания флага или отключения лампочки, а процесс промывки повторяется. Пульпа с ограничительной решётки загрузочного бункера и грохотов гидровашгерда по гладкому поддону понурного желоба поступает в загрузочный бункер. Объём и высота загрузочного бункера минимальны, что предотвращает его глубокий завал в случае повреждений грохотов гидровашгерда, ограничительной решетки загрузочного бункера или перебоев в работе гидроэлеватора. Далее пульпа из бункера поступает в смесительную камеру гидроэлеватора, откуда струёй воды, поступающей из водовода через насадку, увлекается в гидроэлеватор и по пульповоду подаётся на обогащающее устройство.

В качестве примера в табл. 1–3 и на рис. 1 представлены некоторые результаты исследований.

Таблица 1 / Table 1

Результаты рассева песков техногенной россыпи / Results of sandy sandblasting of technogenic placers

<i>Показатели гранулометрического состава / Indicators of granulometric composition</i>	<i>Числовые значения / Numeric values</i>			
Класс, мм / Class, mm	+200	-200+20	-20+2	-2
Выход класса, % / Class Output, %	7	33	37	23
Выход класса по нарастающей, % / Class output on an increasing scale, %	7	40	77	100

Таблица 2 / Table 2

Результаты изучения гранулометрического состава золота техногенной россыпи / Results of the granulometric composition of technogenic placer gold study

<i>Показатели гранулометрического состава / Indicators of granulometric composition</i>	<i>Числовые значения / Numeric values</i>				
Класс, мм / Class, mm	+5	-5+2	-2+1	-1+0,2	-0,2
Выход класса, % / Class Output, %	0	11	25	37	27
Выход класса по нарастающей, % / Class output on an increasing scale, %	0	11	36	73	100

Таблица 3 / Table 3

Результаты экспериментальных исследований добычи золота из россыпного месторождения / Results of experimental studies on gold mining from a placer deposit

<i>Технологические параметры / Technological parameters</i>	<i>Числовые значения / Numeric values</i>				
Производительность прибора на стадии вторичного разжижения песков, тыс. м³/сут / Productivity of the device at the stage of the secondary liquefaction of sands, thousand m³/day	0,24	0,36	0,48	0,6	0,72

Окончание табл. 3 / The end of the table 3

Технологические параметры / Technological parameters	Числовые значения / Numeric values				
Конвейерно-скрубберный вариант/ Conveyor-scrubber option					
Извлечение золота, г/м³ (%) / Gold extraction, g/m³ (%) /	1,124 (93,67)	1,142 (95,17)	1,087 (90,58)	1,018 (84,83)	0,973 (81,08)
Соотношение Ж:Т на стадии вторичного разжижения песков / Ratio of L:S at the stage of secondary liquefaction of sands	4	6	8	10	12
Извлечение золота, ε, г/м³ (%) / Gold extraction, ε, g/m³(%)/	1,027 (85,58)	1,124 (93,67)	1,040 (86,67)	1,013 (84,42)	0,892 (74,33)
Производительность прибора, тыс. м³/сут / Device capacity, thousand m3/day	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
Конвейерно-скрубберный вариант/ Conveyor-scrubber option					
Извлечение золота, г/м³ (%) / Gold extraction, g/m³ (%)	1,147 (95,58)	1,132 (94,33)	1,104 (92,00)	1,052 (87,67)	0,957 (79,75)
Гидроэлеваторный вариант /					
Извлечение золота, г/м³ (%) / Gold extraction, g/m³ (%)	1,169 (92,03)	1,158 (90,62)	1,109 (86,80)	1,023 (80,70)	0,913 (72,34)

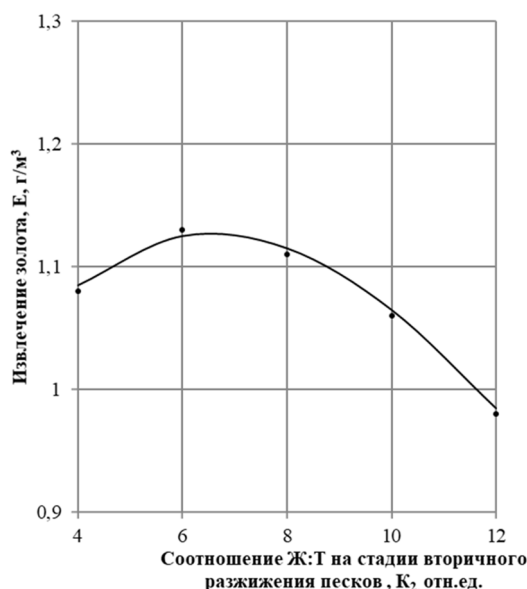


Рис. 1. Влияние плотности (Ж:Т) на извлечение золота при гидроэлеваторном варианте прибора /

Fig. 1. Density effect (L:S) on gold extraction using the hydro-elevator version of the device

Среднее содержание золота в исследуемых россыпях варьировалось в пределах 1,1 г/м³. При постоянных значениях параметров (производительность – 800 м³/сут, угол наклона спирали классификатора – 18°) получены следующие результаты экспериментальных исследований:

1) конвейерно-скрубберный вариант: Ж:Т на первичном разжижении – 8,9, Ж:Т на вторичном разжижении – 6,6, зазор между спиралью шнека и дном классификатора – 5 мм, скорость шнека – 6,6 об/мин;

2) гидроэлеваторный вариант: Ж:Т на вторичном разжижении – 6,7, зазор между спиралью шнека и дном классификатора – 8,3 мм, скорость шнека – 10,2 об/мин.

Предложенные оптимальные технологические условия позволяют по сравнению с аналогом более эффективно вести разработку валунистых россыпных месторождений

(повышаются производительность промывочного прибора и степень извлечения золота, снижается себестоимость одного грамма добытого золота).

За счёт монтажа установки на одном металлическом основании сокращается время, затрачиваемое на монтаж, демонтаж и перестановку промывочного прибора на новую приборостоянку. Сокращается расход электроэнергии, количества и видов техники, необходимой для монтажно-демонтажных работ. Улучшаются эксплуатационные свойства прибора, облегчается работа по его обслуживанию, а именно в гидроэлеваторе в течение промывочного сезона необходимо несколько раз заменять из-за износа горловину и насадку, а замена их на аналогичной установке очень неудобна, трудоёмка и затратна по времени. Значительно увеличивается продолжительность эксплуатации установки бла-

годаря монтажу всего горного оборудования на одном остова, что исключает его просадки, перекосы, приводящие к нарушениям промывки песков.

На аналогичных установках, являющихся переставными, в конце сезона всё горное оборудование демонтируется, что сопровождается его деформациями. Предлагаемая установка является передвижной и легко транспортируемой, что объясняется наличием полозьев у остова.

Дополнительная напорная оросительная система, благодаря её перемещению над приёмной площадкой и ограничительной решёткой загрузочного бункера, позволяет высоконапорными водяными струями с изменяющимся направлением от вертикального вниз до горизонтального обеспечивать полный обмыв валунов. В результате значительно сокращается время высококачественного обмыва валунов и надрешётных фракций.

Работа механического валуноуборщика и напорной дополнительной оросительной системы при промывке песков предложенной установкой позволяет значительно сократить пульсирующий режим пульпообразования и неравномерность питания гидродоёмного аппарата, характерные для загрузочно-ограничительных устройств гидровашердного типа, что положительно сказывается на степени извлечения золота, повышении производительности загрузочного устройства и промывочного прибора в целом. Кроме того, снижается неравномерность производительности установки за счёт повышения надёжности её работы и бесперебойности загрузки (сглаживается неравномерность, вызванная циклическим режимом подачи песков бульдозерами, скреперами на загрузочный бункер установки).

Проведённые экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность разработанной технологии селективного извлечения мелкодисперсного золота. Данная методика включает стадию промежуточного обезвоживания песковых фракций и использование специализированного промывочного оборудования. Применение данной технологии позволяет сократить на 50 % потери золота с размером частиц менее 45 микрон, что существенно улучшает показатели извлечения данного металла. Общая эффективность извлечения золота возрастает на 7 %, что свидетельствует о высокой степени оптимизации технологических параметров процесса.

После промывки россыпей образуются отходы разных фракций с содержанием золота. Исследования проводили на отходах мелких

фракций песчано-глинистой фракции в галечных и эфельных отвалах размером 0,1–1 мм (псаммитах – песчаных породах), на тонкодисперсных частицах (алевритах и пелитах) размером менее 0,01 мм, которые могут накапливаться в тыльных частях эфельных отвалов и отложениях прудов-отстойников.

В процессе переработки песков, являющихся отходами гравитационного обогащения (хвостами), после завершения добычи россыпных месторождений золота в их составе могут быть обнаружены разнообразные сульфидные минералы, к которым относятся как первичные, которые изначально присутствовали в исходной сульфидной руде, так и вторичные, образовавшиеся в результате гипергенных трансформаций.

В перечень основных сульфидных минералов, которые выявлены в процессе исследований в техногенных отходах, полученных после обогащения золотоносной россыпи на промывочном приборе, входят:

1) пирит (FeS_2), который является одним из наиболее часто встречающихся сульфидов и характеризуется высокой концентрацией микропримесей золота, которые могут быть интегрированы в кристаллы минерала или присутствовать в виде включений, и отличается высокой устойчивостью к процессам выветривания, что позволяет ему сохраняться в хвостах обогащения в значительных количествах;

2) магнетит ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) – минерал класса оксидов, известный как магнитный железняк, встречающийся в виде окатанных зёрен, который нередко ассоциируется с другими тяжёлыми минералами, включая золото, благодаря высокой плотности и устойчивости к выветриванию.

В рамках настоящего исследования разработана инновационная технология переработки лежалых песков, основанная на использовании нетоксичных растворителей в кислой среде с добавлением серной кислоты и методов интенсификации окислительных процессов сульфидных минералов.

В ходе лабораторных экспериментов проведена апробация технологии выщелачивания золота (исходный материал – тонко измельчённые хвосты с содержанием золота $\beta_{\text{Au}} = 1,85 \text{ г/т}$) с применением нетоксичного растворителя – тиомочевина (тиокарбамида) – $\text{CN}(\text{NH}_2)_2$ – в присутствии сильного окислителя – пероксида водорода H_2O_2 . Для вскрытия тонкой структуры и извлечения дисперсного золота, инкапсулированного в сульфидных минералах, проведена серия операций, включающих измельчение мелкозернистой песчаной фракции до наноразмерного состо-

яния и последующую обработку нетоксичным окислителем, таким как пероксид водорода. Данные методы позволяют эффективно разрушить минеральную матрицу, обеспечивая доступ к заключённым в ней ценным компонентам и повышая общую эффективность процесса извлечения золота. Дисперсность 10 мкм обеспечивалась применением Альбион-процесса.

Тиомочевинное выщелачивание золота осуществляется в оптимальном диапазоне pH с целью образования растворимых тиомочевинных комплексов для предотвращения разложения тиомочевины ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$) и стабилизации металлокомплексов ($\text{Au}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)_2$).

В процессе экспериментальных исследований получены следующие результаты:

1) прототип: $C_{\text{Au}}=1,44$ г/т (содержание золота в твёрдой фазе) и $C_{\text{Au}}=1,1$ мг/л (содержание золота в жидкой фазе);

2) экспериментальный вариант: $C_{\text{Au}} = 0,21$ г/т (содержание золота в твёрдой фазе) и $C_{\text{Au}}=1,78$ мг/л (содержание золота в жидкой фазе).

Результаты тестирования подтвердили высокую эффективность предложенной технологии, обеспечив значительное повышение степени извлечения золота из вторичного сырья. Соответственно, разработанная методика представляет собой перспективное решение для переработки лежалых песков с минимальными экологическими рисками и максимальной экономической целесообразностью.

Экспериментально установленные технологические параметры переработки песковой части техногенных отходов (рис. 2), позволили выявить оптимальные условия проведения выщелачивания экологически щадящей тиомочевинной (тиокарбамидом).

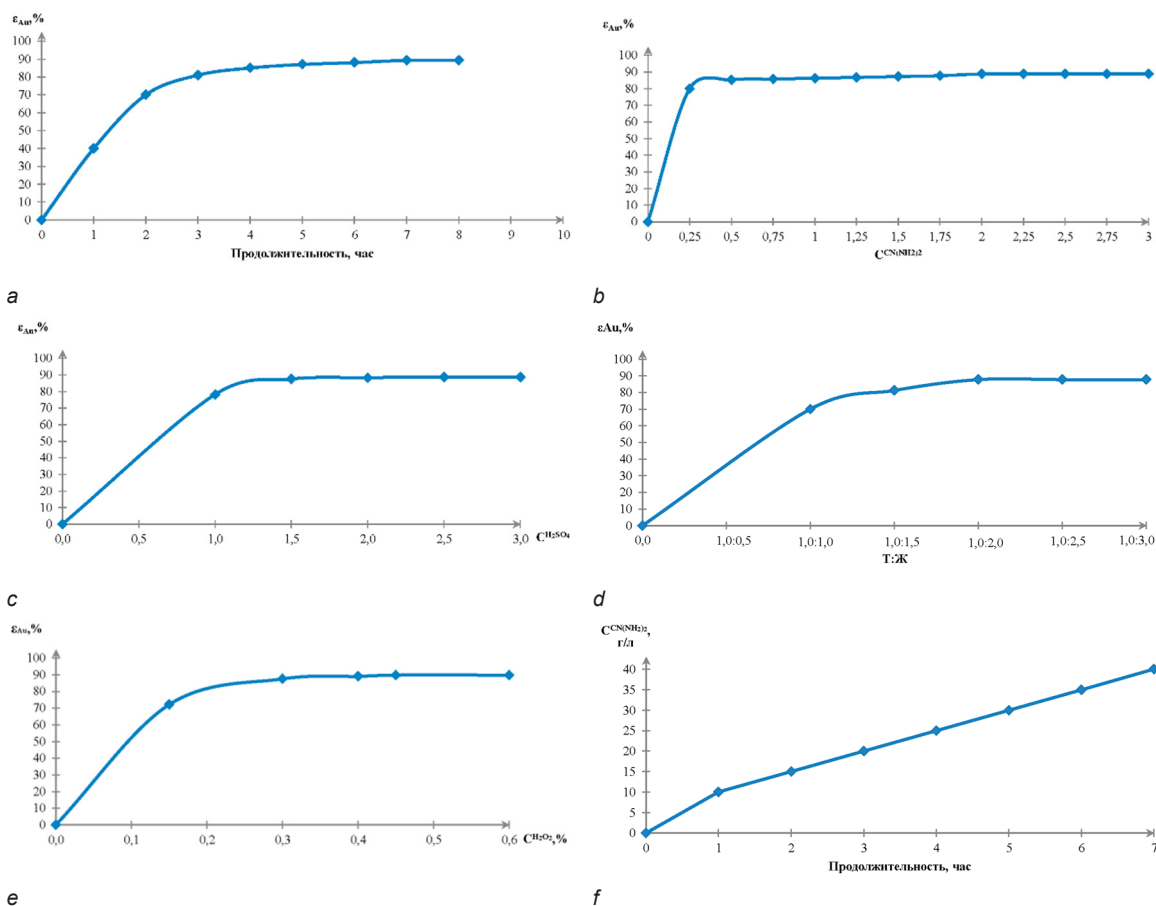


Рис. 2. Экспериментально установленные технологические параметры: а – продолжительность тиокарбамидного выщелачивания (7 ч); б – концентрация тиомочевины (2,0 %); с – концентрация серной кислоты (2,5 %); d – отношение жидкого к твёрдому (Т:Ж=1,0:2,0); е – концентрация перекиси водорода (0,45 %); f – концентрация тиомочевины в пульпе от продолжительности процесса тиокарбамидного выщелачивания (10 мг/л)

Fig. 2. Experimentally determined technological parameters: а – duration of thiourea leaching (7 hours);

б – concentration of thiourea (2.0 %); с – concentration of sulfuric acid (2.5 %); d – liquid-to-solid ratio (T:S=1.0:2.0);

е – concentration of hydrogen peroxide (0.45 %); f – concentration of thiourea in the pulp from the duration of the thiourea leaching process (10 mg/l)

Экспериментально установлены оптимальные технологические параметры процесса извлечения золота. Сверхтонкое измельчение материала до 86 % класса -10 мкм оказалось ключевым фактором, что обеспечивает извлечение золота на уровне 65,1 %. На первой стадии применяется предварительное окислительное выщелачивание под атмосферным давлением, pH 2,5 и температурой пульпы 60 °С в течение 6 ч. Повышение температуры пульпы с 10 до 60 °С увеличивает извлечение золота на 7,5 %. На второй стадии используется бинарная комплексобразующая система (тиокарбамид, пероксид водорода) при соотношении Т:Ж=1:4 и следующих концентрациях реагентов: тиомочевина – 0,6 %, серная кислота – 2,0 %, H_2O_2 – 0,4 %, продолжительность процесса – 10 ч (см. рис. 2).

Применение эффективного растворителя золота в сочетании с сильным окислителем позволило получить хорошие результаты, в частности извлечение золота значительно возросло (с 22,1 до 85,5 %) по сравнению с прототипом (цианидным выщелачиванием).

Заключение. Разработаны высокоэффективные технологические и технические решения гравитационного обогащения на промывочной установке за счёт оптимизации работы отдельных технологических узлов.

Проведённые испытания показали предпочтительность использования технологии улавливания мелкого золота с промежуточным обезвоживанием песков в промывочном приборе разработанной конструкции, что позволило уменьшить снос весьма мелкого и тонкого золота на 50 % и повысить общее извлечение металла на 7 %.

Выщелачивание золота из песковой части лежалых техногенных отходов экологически безопасными растворителями благородного металла способствует последовательному повышению извлечения золота: на 72,7 % – на первой стадии водного выщелачивания золота из тонкоизмельчённых лежалых хвостов посредством применения Альбион-технологии при атмосферном давлении с нагревом пульпы до 60 °С; на 74,3 % – при добавке тиомочевина и раствора серной кислоты; на 80,5 % – при тиомочевинном выщелачивании золота; на 85,5 % – на второй стадии при тиомочевинном выщелачивании с добавлением перекиси водорода. Все процессы осуществлялись при интенсивном механическом перемешивании пульпы. Новый способ извлечения золота позволяет перерабатывать отходы, улучшать взаимодействие природных и искусственных систем, снижать загрязнение окружающей среды.

Список литературы

1. Куппеев В. А., Шумилова Л. В. Промывочные приборы в новом конструктивном и технологическом оформлении для эффективной разработки россыпных месторождений: монография. М.: Горная книга, 2023. 256 с.
2. Николае Илиаш, Эмилия Дунка, Юлиан Оффенберг, Джордж Тешеляну, Ионуг Предойу. Элементы геоэкологического аудита и учета объектов окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 3-1. С. 359–371. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_359. EDN: GROVEY
3. Шумилова Л. В. Гравитационно-электрохимический способ извлечения золота из техногенных россыпей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. S1-4. С. 186–192. EDN: VQWBHR
4. Rosenfeld C. E., Chaney R. L., Martinez C. E. Soil geochemical factors regulate Cd accumulation by metal hyperaccumulating *Noccaea caerulea* (J. Presl & C. Presl) FK Mey in field-contaminated soils // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 616–617. P. 279–287.
5. Макаров В. А., Самородский П. Н. Актуальные вопросы оценки и освоения техногенных месторождений золота // Золото и технологии. 2018. Т. 42, № 4. С. 72–90.
6. Velasquez-Yevenes L., Torres D., Toro N. Leaching of chalcopirite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods // Hydrometallurgy. 2018. No. 181. P. 215–220. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.10.004
7. Секисов А. Г., Лавров А. Ю., Рассказова А. В. Фотохимические и электрохимические процессы в геотехнологии. Чита: ЗабГУ, 2019. 306 с. EDN: NSUKRD
8. Деметьев В. Е., Войлошников Г. И., Федоров Ю. О. Разработка ОА «ИРГИРЕДМЕТ» по извлечению ценных компонентов из техногенного сырья // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 4. С. 418–427. EDN: VTZAYV
9. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhou Yu., Khan K. Zhang Q. A transitional perspective of global and regional mineral material flows // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 140. P. 91–101. DOI: 10.1016/J.RESCONREC.2018.09.014. EDN: YKTFKX
10. Чантурия В. А., Самусев А. Л., Миненко В. Г. Интенсификация химико-электрохимического выщелачивания золота из упорного минерального сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 5. С. 154–164. DOI: 10.15372/FTPRPI20200518. EDN: ILCCUI

11. Самихов Ш. Р., Зинченко З. А. Исследования процесса тиосульфатного выщелачивания золотых мышьяк содержащих руд месторождения Чоре // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2014. Т. 57, № 2. С. 145–150. EDN: SIRFKV
12. Воробьев А. Е., Чекушина Е. В., Досаев В. М., Щелкин А. А., Чекушина Т. В. Выщелачивание золота с применением альтернативных растворителей // Естественные и технические науки. 2015. № 6. С. 457–462. EDN: UDDZMB
13. Лодейщиков В. В., Панченко А. Ф., Хмельникацкая О. Д. Тиокарбамидное выщелачивание золотых и серебряных руд // Гидрометаллургия золота. 1980. С. 26–35.
14. Радомская В. И., Радомский С. М., Павлова Л. М. Условие применения технологии тиокарбамидного выщелачивания // Георесурсы. 2013. № 5. С. 22–27. EDN: RENKNR
15. 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. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.218. EDN: UGTZBN
16. Плаксин И. Н. Металлургия благородных металлов. М.: Металлургиздат, 1958. 366 с.
17. Avdan Z. Y., Kaplan G., Goncu S., Avdan U. Monitoring the water quality of small water bodies using high-resolution remote sensing data // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. No. 8. P. 553. DOI: 10.3390/ijgi8120553
18. Topp S. N., Pavelsky T. M., Jensen D., Simard M., Ross M. R. V. Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: moving towards multidisciplinary applications // Water. 2020. Vol. 12, no. 1. P. 169. DOI: 10.3390/w12010169. EDN: MPMUSV
19. Булаев А. Г., Бодуэн А. Я., Украинцев И. В. Биоокисление упорного золотосодержащего концентрата руды месторождения Бестобе // Обогащение руд. 2019. № 6. С. 9–14. DOI: 10.17580/or.2019.06.02. EDN: TWXIEL
20. Saburbayeva L. Yu., Yu P. S., Ukraintsev I. V., Boduen A. Ya. Study of pressure oxidation and bacterial leaching efficiency as a method of refractory gold concentrate breakdown // IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress. 2019. P. 2911–2921. EDN: KSQJVB
21. Matthews T. Dilution and ore loss projections: strategies and considerations // SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference – Mining: Navigating the Global Waters. Denver, 2015. P. 529–532.
22. Seredkin M., Zabolotsky A., Jeffress G. In situ recovery, an alternative to conventional methods of mining: exploration, resource estimation, environmental issues, project evaluation and economics // Ore Geology Reviews. 2016. Vol. 79. P. 500–514. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.06.016. EDN: WPHILL
23. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydrometallurgy. 2015. Vol. 157. P. 306–324. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022
24. Lalomov A. V., Chefranov R. M., Naumov V. A., Naumova O. B., LeBarge W., Dilly R. A. Typomorphic features of placer gold of Vagran cluster (the Northern Urals) and search indicators for primary bedrock gold deposits // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 85. P. 321–335. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.06.018. EDN: XMKQGT
25. Шумилова Л. В. Научное обоснование инновационной технологии извлечения золота (разработка, апробация в условиях Забайкалья). Германия: Palmarium Academic Publishing, 2014. 362 с. EDN: WOLDGD
26. Абрамов Б. Н. Оценка токсичности хвостохранилищ рудных месторождений Забайкальского края // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11. С. 136–145. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_136. EDN: HULFUM

References

1. Kuppeev VA, Shumilova LV. Flushing devices in a new design and technological design for the placer deposits effective development: monograph. Moscow: Gornaya kniga; 2023. 256 p. (In Russian)
2. Ilias N, Dunca E, Offenberger IU, Teseleanu G, Predoiu I. Elements of geoecological environmental audit and accounting. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2021;(3-1):359-371. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_359. EDN: GROVEY
3. Shumilova LV. Gravity-electrochemical method of gold extracting from industrial placers. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2015;(S1-4):186-192. EDN: VQWBHR. (In Russian)
4. Rosenfeld CE, Chaney RL, Martinez CE. Soil geochemical factors regulate Cd accumulation by metal hyperaccumulating *Noccaea caerulea* (J. Presl & C. Presl) FK Mey in field-contaminated soils. *Science of the Total Environment*. 2018;616-617:279-287.
5. Makarov VA, Samorodsky PN. Actual issues of technogenic gold deposits assessment and development. *Gold and Technology*. 2018;42(4):72-90. (In Russian)
6. Velasquez-Yevenes L, Torres D, Toro N. Leaching of chalcopyrite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods. *Hydrometallurgy*. 2018;(181):215–220. (In Russian)

7. Sekisov AG, Lavrov AYu, Rasskazova AV. Fotokhimicheskie i ehlektrokhimicheskie protsessy v geotekhnologii. [Photochemical and electrochemical processes in geotechnology]. Chita: ZaBGU; 2019. 306 p. (In Russian)
8. Dementiev VE, Voiloshnikov GI, Fedorov YuO. «IRGIREDMET» developments on valuable constituents recovery from technogenic rawmaterials. *Izvestiya Tuskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(4):418-427. EDN: VTZAYV. (In Russian)
9. Baninla Y, Zhang M, Lu Y, Liang R, Zhou Yu, Khan K (et al). A transitional perspective of global and regional mineral material flows. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;140:91-101. DOI: 10.1016/J.RESCONREC.2018.09.014. EDN: YKTFKX. (In Russian)
10. Chanturia VA, Samusev AL, Minenko VG. Stimulation of chemical and electrochemical gold leaching from rebellious minerals. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2020;(5):154-164. DOI: 10.15372/FTPRPI20200518. EDN: ILCCUI. (In Russian)
11. Samikhov ShR, Zinchenko ZA. Investigation process of thiosulphate leaching of chore deposit gold arseniccontaining ore. *Reports of the Academy of Sciences of Tajikistan*. 2014;57(2):145-150. EDN: SIRFKV. (In Russian)
12. Vorobiev AE, Chekushina EV, Dosaev VM, Shchelkin AA, Chekushina TV. Leaching of gold using alterna-tive solvents. *Natural and Technical Sciences*. 2015;(6):457-462. EDN: UDDZMB. (In Russian)
13. Lodeishchikov VV, Panchenko AF, Khmel'nikatskaya OD. Tiokarbamidnoe vshchelachivanie zolotykh i serebryanykh rud [Thiocarbamide leaching of gold and silver ores]. In: *Gidrometallurgiya zolota*. [Hydrometallurgy of gold]. 1980. P. 26-35. (In Russian)
14. Radomskaya VI, Radomsky SM, Pavlova LM. Application condition of thiocarbamide leaching technology. *Georesources*. 2013;(5):22-27. EDN: RENKNR. (In Russian)
15. Fedotov PK, Senchenko AE, Fedotov KV, Burdonov AE. Studies of sulfide and oxidized ores enrichment of gold deposits of the Aldan shield. *Journal of Mining Institute*. 2020;242:218-227. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.218. EDN: UGTZBN. (In Russian)
16. Plaksin IN. Metallurgiya blagorodnykh metallov. [Metallurgy of noble metals]. Moscow: Metallurgizdat; 1958. 366 p. (In Russian)
17. Avdan ZY, Kaplan G, Goncu S, Avdan U. Monitoring the water quality of small water bodies using high-resolution remote sensing data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019;(8):553. DOI: 10.3390/ijgi8120553
18. Topp SN, Pavelsky TM, Jensen D, Simard M, Ross MRV. Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: moving towards multidisciplinary applications. *Water*. 2020;12(1):169. DOI: 10.3390/w12010169. EDN: MPMUSV
19. Bulaev AG, Boduen AYA, Ukraintsev IV. Biooxidation of persistent gold-bearing ore concentrate of the bestobe deposit. *Obogashchenie Rud*. 2019;(6):9-14. DOI: 10.17580/or.2019.06.02. EDN: TWXIEL. (In Russian)
20. Saburbayeva LYu, Yu PS, Ukraintsev IV, Boduen AYA. Study of pressure oxidation and bacterial leaching efficiency as a method of refractory gold concentrate breakdown. In: *IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress*; 2019. P. 2911-2921. EDN: KSQJVB
21. Matthews T. Dilution and ore loss projections: strategies and considerations. In: *SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference – Mining: Navigating the Global Waters*. Denver; 2015. P. 529-532.
22. Seredkin M., Zabolotsky A., Jeffress G. In situ recovery, an alternative to conventional methods of mining: exploration, resource estimation, environmental issues, project evaluation and economics. *Ore Geology Reviews*. 2016;79:500-514. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.06.016. EDN: WPHILL
23. Sinclair L, Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015;157:306-324. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022
24. Lalomov A. V., Chefranov R. M., Naumov V. A., Naumova O. B., LeBarge W., Dilly R. A. Typomorphic features of placer gold of Vagran cluster (the Northern Urals) and search indicators for primary bedrock gold deposits. *Ore Geology Reviews*. 2017;85:321-335. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.06.018. EDN: XMKQGT
25. Shumilova LV. Scientific substantiation of innovative technology for gold extraction (development, testing in the conditions of Transbaikalia). Germany: Palmarium Academic Publishing; 2014. 362 p. EDN: WOLDGD. (In Russian)
26. Abramov BN. Toxicity assessment of mine tailings ponds in Transbaikalia. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2021;(11):136-145. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_136. EDN: HULFUM. (In Russian)

Информация об авторах

Шумилова Лидия Владимировна, д-р техн. наук, доцент, зав. лабораторией, Читинский филиал Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Чита, Россия; профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия, shumilovalv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>. Область научных интересов: геоэкология, обогащение полезных ископаемых, физико-химическая геотехнология, инновационные технологии, экоинженерия.

Размахнин Константин Константинович, д-р техн. наук, доцент, руководитель, Читинский филиал Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Чита, Россия; constantin-const@mail.ru. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, геоэкология, сорбционные технологии, гидрометаллургия.

Information about the authors

Shumilova Lidiya V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the laboratory, Chita branch of Mining Institute named after N.A. Chinakal SB RAS, Chita, Russia; Professor, Transbaikial State University, Chita, Russia, shumilovalv@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>. Research interests: geoecology, mineral processing, physical and chemical geotechnology, innovative technologies, eco-engineering.

Razmakhnin Konstantin K., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chita branch of Mining Institute named after N.A. Chinakal SB RAS, Chita, Russia, constantin-const@mail.ru. Research interests: mineral processing, geoecology, sorption technologies, hydrometallurgy.

Вклад авторов в статью

Шумилова Л. В. – анализ разработанности темы, разработка исследований программы и проведение исследований, анализ результатов.

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

The authors' contribution to the article

Shumilova L. V. – analysis of the topic's development, research program development and conducting research, and analyzing the results.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.11.2025; одобрена после рецензирования 18.11.2025; принята к публикации 24.11.2025.

Received 2025, November 10; approved after review 2025, November 18; accepted for publication 2025, November 24.