

Обоснование схемы сорбционного выщелачивания «тонкого» и чешуйчатого золота из хвостов промывки песков россыпей

А.Г. Секисов ✉, Н.М. Литвинова, А.Е. Копылова

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация
✉ sekisovag@mail.ru

Резюме: Истощение запасов россыпных месторождений с гравииобогатимым золотом объективно предполагает необходимость использования при их освоении физико-химических геотехнологий: кучного, кюветного, чанового или скважинного выщелачивания. Для доизвлечения «тонкого» и чешуйчатого золота, большей частью теряемого с хвостами промывки песков россыпей, предложена схема чанового выщелачивания с локальной сорбцией растворенного золота из пульпы, обеспечивающая достижение максимального извлечения драгоценных металла и минимизирующая экологический ущерб. В статье рассмотрена технология сорбционного выщелачивания золота из техногенного россыпного минерального сырья, реализуемая с помощью установки, позволяющей сократить время технологического цикла и увеличить рабочую емкость сорбента, а следовательно, и прирост извлечения (доизвлечения) золота. Приводятся результаты экспериментов по активационному выщелачиванию сложноизвлекаемых форм золота, в которых были использованы различные реагенты-комплексобразователи и пошагово изменялись параметры подготовки технологических растворов и переработки пульпы.

Ключевые слова: россыпные месторождения, гравииобогатимое золото, тонкое золото, чешуйчатое золото, физико-химические геотехнологии, кюветное выщелачивание, локальное сорбционное выщелачивание, фотоэлектрохимическая подготовка растворов

Благодарности: Исследования выполнены на базе ЦКП «Центр исследования минерального сырья» Хабаровского исследовательского центра ДВО РАН.

Для цитирования: Секисов А.Г., Литвинова Н.М., Копылова А.Е. Обоснование схемы сорбционного выщелачивания «тонкого» и чешуйчатого золота из хвостов промывки песков россыпей. *Горная промышленность*. 2025;(4S):82–86. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-82-86>

Justification of a sorption leaching circuit for fine-grained and flake gold from tailings of placer sand washing

A.G. Sekisov ✉, N.M. Litvinova, A.E. Kopylova

Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation
✉ sekisovag@mail.ru

Abstract: Depletion of placer deposits containing gravity-concentrated gold objectively implies the need to use physical and chemical geotechnologies in their development, i.e. heap, cuvette, vat or drillhole in-situ leaching. A vat leaching circuit is proposed for fine-grained and flake gold, which is mostly lost with the tails during washing of placer sands. This circuit involves vat leaching with in-situ sorption of dissolved gold from the pulp, ensuring maximum recovery of the precious metal while minimizing environmental damage. The article discusses the technology of sorption leaching of gold from man-made placers, implemented using a device that reduces the processing cycle time and increases the operational capacity of the sorbent, thereby improving gold recovery (re-extraction). The results are presented of experiments on activation leaching of hard-to-extract gold forms, utilizing various complexing reagents, with parameters for preparing technological solutions and pulp processing systematically varied.

Keywords: placer deposits, gravity-concentrated gold, fine-grained gold, flake gold, physico-chemical geotechnologies, cuvette leaching, in-situ sorption leaching, photoelectrochemical preparation of solutions

Acknowledgements: The research was conducted at the Centre for Mineral Research Core Shared Research Facilities of the Khabarovsk Research Centre, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Sekisov A.G., Litvinova N.M., Kopylova A.E. Justification of a sorption leaching circuit for fine-grained and flake gold from tailings of placer sand washing. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):82–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-82-86>

Введение

Истощение запасов россыпных месторождений с гравиобогатым золотом объективно предполагает необходимость использования при их освоении физико-химических геотехнологий: кучного, кюветного, чанового или скважинного выщелачивания [1–5]. Наиболее приемлемой для доизвлечения «тонкого» и чешуйчатого золота, большей частью теряемого с хвостами промывки песков россыпей, является схема чанового выщелачивания, не только исходя из условия достижения максимального извлечения драгметалла, но и в первую очередь исходя из экологических соображений. Технология чанового выщелачивания, т.е. выщелачивания в емкости в режиме агитации, широко используется при переработке золотосодержащих руд и реализуется в крупнообъемных технологических аппаратах – пачуках цианирования и сорбции, представляющих собой емкости, оборудованные эрлифтами (устройствами подачи сжатого воздуха, смонтированных внутри их нижней части) для перемешивания и последовательной перекачки рудной пульпы, в которые соответственно вводятся реагенты и сорбенты. Пачуки сорбции в оголовках, установленных в их верхней части, дополнительно оборудованы сетками для отделения ионообменной смолы, сорбирующей растворенное золото. Поскольку смола имеет большую крупность, чем минеральные частицы, то она остается на поверхности сеток, имеющих соответствующий размер разделяющей ячеи. Смола перемещается после съема на сетке из пачука в пачук от хвостового до головного, т.е. навстречу потоку пульпы для постепенного насыщения растворенным золотом.

Результаты

По традиционной схеме в головной пачук цианирования (рис. 1) подается раствор цианида натрия до достижения его конечной концентрации в жидкой фазе пульпы обычно порядка 0.03–0.05% (весовое).

При этом процесс предварительного цианирования продолжается в среднем 6 ч (по часу в каждом из 6 пачуков цианирования).

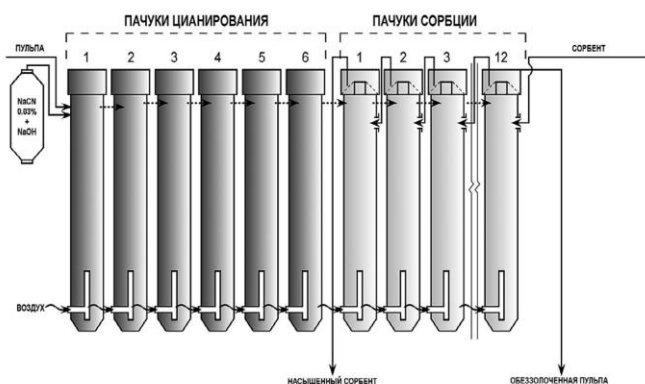


Рис. 1
Традиционная схема
сорбционного выщелачивания
золота

Fig. 1
A traditional gold sorption
leaching circuit

Естественно, что для переработки песков россыпей, а тем более хвостов их промывки и даже ШОУ, такая сложная и капиталоемкая технология неприменима. Поэтому для использования технологии сорбционного выщелачивания золота применительно к россыпным объектам необходимо решить проблему интенсификации процессов как выщелачивания, так и сорбции золота.

Процессы сорбции золотосодержащих комплексов активным углем и ионообменными смолами (ионитами) изучаются уже более 50 лет. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в этой области, главный вопрос о том, как именно происходит сорбция золота, остается до сих пор дискуссионным [3; 4; 6–8].

По формам нахождения золота в сорбенте модели сорбции его комплексов могут быть разделены на несколько групп, основными из которых являются:

1. Цианоауратная модель – комплексный золото-цианидный анион $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ как таковой удерживается на поверхности сорбента силами Ван-Дер-Ваальса.
2. Коллоидная модель – золото осаждается на угле в металлическом (коллоидном) виде, освобождаясь от лигандов (в частности, цианидов).
3. Модель смены лигандов. В процессе адсорбции золото-циановый комплекс трансформируется, диссоциирует и катион золота взаимодействует с другим анион-формирующим лигандом, находящимся на поверхности угля (карбоксильных, фенольных и др. групп).

В одной из новых моделей, предложенных в ИГД ДВО РАН, связь между золото-циановым комплексом (рассматриваемым как кластерная структура $[\text{nAu} \cdot \text{m}(\text{CN})_2]^{n-}$) и кластерами углерода отводится пленочной воде, точнее продуктам ее ионизации и кластеризации. По этой модели ионы OH^- , связанные с периодически ионизируемыми атомами углерода, с одной стороны, через протоны (H^+), образующиеся при диссоциации молекул воды контактного абсорбционного слоя, обеспечивают опосредованную связь с золото-циановыми анионами. Поскольку атомы углерода образуют цепочечные структуры, то в контактирующем с поверхностью сорбента пленочном слое формируются водные кластеры, включающие коллективизированную группу протонов, соответственно, активные центры на поверхности сорбента удерживают не отдельные анионы, а кластеризованные золотосодержащие комплексы. Соответственно, для повышения интенсивности сорбции должна активироваться пленочная фаза сорбента с формированием в ней кластерных структур и повышаться концентрация комплексообразователя для золота в контактирующем с ним слое воды.

Правомерность этой модели подтверждена многочисленными экспериментами, в ходе которых обеспечивалось повышение сорбционной емкости угля (и ионообменной смолы), а также при проведении опытно-промышленных испытаний в заводских условиях (на гидрометаллургическом заводе ГМЗ-3 Навоийского ГМК).

На ГМЗ-3 была испытана инновационная технологическая схема двух-стадийной сорбции с подготовкой реагентов и сорбентов в опытно-фотоэлектрохимическом реакторе, схема которой приведена на рис. 2.

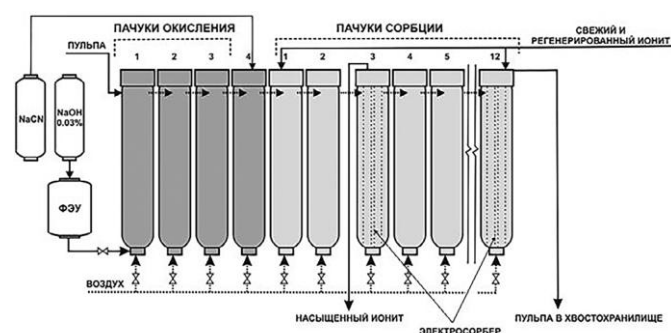


Рис. 2
Технологическая схема
двухстадийной сорбции-
электросорбции с подготовкой
реагентов в опытном
фотоэлектрохимическом
реакторе

Fig. 2
Technological circuit of two-
stage sorption-electrosorption
with preparation of reagents
in an experimental
photoelectrochemical reactor

Главным отличием от традиционной технологии «уголь в пульпе» или «смола в пульпе» (см. рис. 1), когда сорбент перемещается против хода движения пульпы, т.е. по градиенту содержания растворенного золота, предлагаемая технология двухстадийной сорбции (см. рис. 2) предполагает первоначальный ввод сорбента по ходу движения пульпы, т.е. по градиенту содержания растворенного золота. Процесс переработки начинается с окислительной подготовки пульпы, заключающейся в ее обработке раствором, содержащим ряд гидратированных форм активного кислорода [9–12]. Такой раствор подготавливается в фотоэлектрохимической установке из исходного слабого щелочного раствора. В результате электрохимического и фотохимического воздействия на исходный раствор в нем формируется ряд пероксидных, гидроксильных и гидроксидных комплексов. Аналогичный раствор может быть получен при электролизе насыщенного двух- или трехатомным кислородом раствора щелочи, причем не только для последующего использования в качестве комплексообразователя для золота цианида натрия, но и для синтеза хлоркислородных, хлоркислородоводородных и, возможно, хлоркислородазотных комплексов. Эти комплексы, сочетающие в себе функции окислителей и лигандов, формируются при облучении растворов в приэлектродных зонах (в мембранном и безмембранном вариантах электролитической ячейки) ультрафиолетовой лампой или при барботаже озонированным (фотоактивированным) воздухом межэлектродного пространства. Известно, что многие химические реакции, как простые (разложение бромистого серебра в фотопленке, двухатомного кислорода на атомарный), так и сложные (фотосинтез в клетках растений, цепные реакции образования хлористого водорода, реакции полимеризации – образование многоатомных молекул) протекают под воздействием света. Причем большинство фотохимических реакций осуществляется только при воздействии ультрафиолетовых лучей. Для каждой реакции существует граница частоты света, ниже которой она не реализуется:

$$\nu > \nu_0 = \frac{E_{св}}{h},$$

где ν , ν_0 – соответственно требуемая и граничная частота; h – постоянная Планка; $E_{св}$ – энергия, необходимая для разрушения или образования межатомной связи.

Доказательством участия в процессе растворения золота

промежуточных многоатомных соединений атомов кислорода и водорода является образование при цианировании перекиси водорода как сопутствующего вещества. Молекулы озона (трехатомного кислорода), перекиси водорода, гидроксил-радикала (ОН) и другие более сложные соединения водорода и кислорода, формирующиеся при воздействии на воздух ультрафиолетовым излучением, выполняют функцию высокоэнергетичных затравочных центров образования многоатомных кислород-водородных комплексов в водной среде. Данное предположение подтверждается установленным спектральным анализом появлением димеров и тримеров перекиси водорода в облученном ультрафиолетовым светом влажном воздухе. Кроме того, его подтверждают проведенные эксперименты по прямому облучению пульпы ультрафиолетовой лампой, позволившие получить увеличение содержания золота в жидкой фазе пульпы до 2,5–3 раз (по сравнению с контрольным процессом).

Таким образом, правомерно сделать вывод о том, что эффект, полученный при ультрафиолетовом облучении воздуха, закачиваемого в пульпу или водного раствора в процессах выщелачивания золота, необходимо рассматривать в первую очередь как результат фотохимического образования полимерных водород-кислородных комплексов (гидратированных пероксидов).

Можно предположить, что такие полимерные водород-кислородные комплексы не только окисляют продуктивные минеральные матрицы, но и кластеризуют лиганды (цианиды, хлориды и др.), соответственно повышая скорость протекания реакций комплексообразования золота.

Сорбент (в данном случае ионообменная смола А-100) по предлагаемой технологии проходит подготовку в фотоэлектроактивированном растворе и затем насыщается цианидом натрия. Первая часть сорбента вводится в пульпу непосредственно после цианидов или одновременно с ними вторая, основная часть сорбента – против хода движения пульпы. Часть смолы, введенная в голову процесса, участвует в процессе локального цианирования, не только как поглотитель быстрорастворимой части золота и элементов-примесей, образующих комплексы с цианидом, но и как носитель комплексообразователя и окислителя. Вторая часть смолы, введенная в хвостовой пачук сорбции, в основном работает в обычном режиме, т.е. поглощает золото, переходящее в жидкую фазу на завершающей стадии, поэтому в основном эта часть смолы выполняет функцию сорбента.

Эти растворы не содержали комплексообразователи для золота, но в ходе их обработки осуществлялось формирование гидратированных кластеризованных ионов H^+ и гидроксил-ионов OH^- , формирующих активные водные пленки на поверхности сорбентов и, как следствие, гидратные оболочки вокруг контактирующих с ними кластеризованных ионов $[nH_3O^+ \cdot m[Au(CN)_2]^{n-}]$, образующихся при растворении золота. Также были проведены эксперименты по использованию сорбентов, обработанных во 2-й стадии: активированным раствором и затем концентрированным раствором комплексообразователя, для интенсификации процесса растворения золота и его параллельного перевода в пленочную субфазу сорбента. При испытании этой схемы был получен прирост извлечения золота на смолу 17.3% относительно стандартной схемы (72.3 кг за 87 сут).

В период 2011–2024 гг. были проведены многочисленные эксперименты по доизвлечению золота активированными

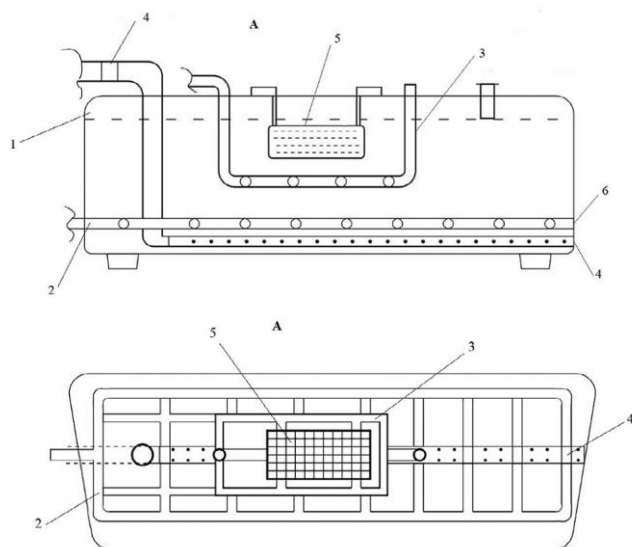


Рис. 3
Минипачук для
выщелачивания
сложноизвлекаемых форм
золота из хвостов промывки
песков россыпей

Fig. 3
A mini pachuca tank
for leaching hard-to-recover
gold from placer sand washing
tailings

ми растворами на хвостовой пульпе гидрометзавода и на хвостах промывки песков россыпей. При этом, кроме цианидов, были испытаны и другие, бесцианидные реагенты-комплексобразователи, в том числе реагент нового поколения «Флотент голд». Во всех случаях по сравнению с использованием неподготовленных сорбентов или сорбентов, подготовленных обычными регенерирующими растворами, был получен прирост сорбционной емкости, а следовательно, и прирост извлечения (доизвлечения) золота. Использование реагента Флотент позволяет выщелачивать чешуйчатое и тонкое золото из хвостов промывки песков с извлечением более 80%. При этом использование сорбента, обработанного фотоэлектроактивированным раствором, помещенного в перфорированную капсулу, контактирующую с барботируемой пульпой, сокращает время сорбции золота до 6–8 ч. Поскольку использование активированного сорбента позволяет существенно сократить время цикла выщелачивания, появляется возможность компактифицировать аппарат для сорбционного выщелачивания золота из хвостов промывки песков россыпей. На основе этих исследований в ИГД ДВО РАН был разработан способ сорбционного бесцианидного выщелачивания золота из техногенного россыпного минерального сырья, реализуемый с помощью компактной установки, приведенной на рис. 3.

Установка представляет собой горизонтально ориентированный пачук, включающий емкость для выщелачивания 1, с основным барботажным контуром 2, малым барботажным контуром 3, пульпопроводом 4, съемной сорбционной кассетой с углем 5, перфорированными трубами-воздухоотводами 6.

Подготовку пульпы производят путем добавления воды к техногенному минеральному сырью, пульпу закачивают в емкость для сорбционного выщелачивания 1, в которую подают через барботажный контур 2 – через перфорированные трубы-воздуховоды 6 сжатый воздух для барботажа (перемешивания и насыщения кислородом пульпы) и интенсификации процесса сорбции и выщелачивания золота. На первом этапе в пульпу вводят выщелачивающие реагенты и подачей сжатого воздуха через основной барботажный контур 2 для равномерного растворения реагента производят барботаж пульпы в течение 15–20 мин. После чего в емкости для выщелачивания 1 устанавливают съемную сорбционную кассету с углем 5, обработанным активированным концентрированным выщелачивающим раствором для интенсификации массообменных процессов и извлечения переходящего в жидкую фазу пульпы золота. Сетчатый каркас кассеты пропускает наиболее мелкие частицы минеральной массы, т.е. продуктивную на золото фракцию, включая «тонкое» (менее 0,25 мм и чешуйчатое) золото, при этом задерживает зерна сорбента в объеме кассеты. При прохождении восходящего потока пульпы с отделенным мелкофракционным материалом через слой сорбента реализуется процесс сорбционного выщелачивания. Причем процесс сорбции проводят в изолированном от основного объема пульпы пространстве, что резко снижает абразивный износ зерен сорбента крупными минеральными частицами и повышает локальное содержание как золота, так и концентрацию сорбента, что существенно ускоряет протекание массообменных процессов. Для обеспечения реализации сорбции золота зернами сорбента в режиме «кипящего слоя» и контактного насыщения пленочной воды, окружающей мелкие частицы золота, комплексобразователем, сконцентрированным на поверхности зерен сорбента, в кассету дополнительно к основной подаче сжатого воздуха подают сжатый воздух через малый барботажный контур 3.

Выводы

Предлагаемый способ сорбционного выщелачивания сложноизвлекаемых форм золота из продуктивной фракции песков россыпей и хвостов их промывки позволяет сократить время технологического цикла и увеличения рабочей емкости сорбента.

Список литературы / References

1. Моисеенко В.Г., Кузнецова И.В. Роль наночастиц золота, серебра и свинца в образовании месторождений благородных металлов. Доклады Академии наук. 2010;430(3):377–381.
Moiseenko V.G., Kuznetsova I.V. The role of gold, silver, and lead nanoparticles in the formation of deposits of precious metals. Doklady Earth Sciences. 2010;430(1):125–128.
2. Ван-Ван-Е А.П. Ресурсная база природно-техногенных золотороссыпных месторождений. М.: Горная книга: Изд-во Московского гос. горного ун-та; 2010. 268 с.

3. Рассказова А.В. Методы обогащения бедных золотомедных руд. *Проблемы недропользования*. 2019;(2):122–129. Режим доступа: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/425> (дата обращения: 13.06.2025).
Rasskazova A.V. Methods of enrichment of poor gold-copper ores. *Problems of Subsoil Use*. 2019;(2):122–129. (In Russ.) Available at: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/425> (accessed: 13.06.2025).
4. Александров А.В., Богомяков Р.В., Конарева Т.Г. Технологические аспекты извлечения золота из техногенных образований Забайкальского края. *Обогащение руд*. 2019;(5):41–46. <https://doi.org/10.17580/or.2019.05.08>
Aleksandrov A.V., Bogomyakov R.V., Konareva T.G. Process-related aspects of gold recovery from the technogenic formations of the Trans-Baikal Territory. *Obogashchenie Rud*. 2019;(5):41–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2019.05.08>
5. Алексеев В.С., Сас П.П., Серый Р.С. Экспериментальные исследования формирования продуктивных зон в техногенных россыпных месторождениях золота. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(6):191–197. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20170620>
Aleksseev V.S., Sas P.P., Sery R.S. Experimental research of pay section formation in gold mining waste. *Journal of Mining Science*. 2017;53(6):1141–1146. <https://doi.org/10.1134/S1062739117063245>
6. Ковлеков И.И. *Техногенное золото Якутии*. М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та; 2002. 302 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/19956> (дата обращения: 13.06.2025).
7. Bahamòndez C., Castro R., Vargas T., Arancibia E. In situ mining through leaching: Experimental methodology for evaluating its implementation and economic considerations. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2016;116(7):689–698. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n7a11>
8. Liua X., Wangd Y., Xiaoa L., Maa L., Hana P., Ye S. Eco-friendly and rapid extraction of gold by in-situ catalytic oxidation with N-bromosuccinimide. *Heliyon*. 2022;8(6):e09706. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09706>
9. Секисов А.Г., Резник Ю.Н., Лавров А.Ю., Поляков О.А., Королев В.С., Тимощенко С.Н. и др. *Способ скважинного выщелачивания металлов из руд, россыпей и техногенных минеральных образований*. Патент РФ RU 2423607 C2. Оpubл. 10.07.2011.
10. Секисов А.Г., Рассказова А.В. *Способ выщелачивания золота из упорных руд*. Патент РФ RU 2647961 C1. Оpubл. 21.03.2018.
11. Sekisov A.G., Paronyan A., Kouzin V., Lalabekyan N. *Method of treatment of water and method and composition for recovery of precious metal*. Patent USA US 5942098. Publ. 24.08.1999.
12. Крылова Л.Н. Эффективность применения озона для извлечения металлов из минерального сырья. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022;28(2):4–15. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2022-2-4-15>
Krylova L.N. Efficiency of using ozone for extraction of metals from mineral raw materials. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2022;28(2):4–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2022-2-4-15>

Информация об авторах

Секисов Артур Геннадиевич – доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: sekisovag@mail.ru

Литвинова Наталья Михайловна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация

Копылова Александра Евгеньевна – младший научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.06.2025

Поступила после рецензирования: 13.08.2025

Принята к публикации: 21.08.2025

Information about the authors

Artur G. Sekisov – Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Research, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; e-mail: sekisovag@mail.ru

Natalya M. Litvinova – Cand. Sci. (Eng.), Leading Research Associate, Laboratory of Mineral Processing, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

Aleksandra E. Kopylova – Junior Research Associate, Laboratory of Mineral Processing, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

Article info

Received: 22.06.2025

Revised: 13.08.2025

Accepted: 21.08.2025