ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12):144-158
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.7 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_12_0_144

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РОССЫПЕЙ СО СЛОЖНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ ФОРМАМИ НАХОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА

А.Г. Секисов[1], В.С. Алексеев[1], Н.М. Литвинова[1], Т.Г. Конарева[1], М.А. Бянкин[1,2]

[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия, e-mail: nauka22@yandex.ru

[2] ООО «Омега», Магадан, Россия

Аннотация: Освоение золотосодержащих россыпей традиционными способами добычи и переработки в настоящее время характеризуется прогрессивно возрастающими потерями металла, что обусловлено ростом доли сложноизвлекаемых форм нахождения золота в продуктивных песках. В свою очередь это актуализирует исследования, целью которых является разработка эффективных геотехнологий, включающих механическую выемку и промывку песков с гравиобогатимым золотом в сочетании с кюветным и скважинным выщелачиванием тонкого, чешуйчатого и инкапсулированного золота соответственно из хвостов промывки и целиковых участков. Для достижения поставленной цели использовался комплексный метод исследований, включающий минералого-геохимический анализ проб песков россыпей, хвостов их промывки, теоретическое обоснование параметров и режимов активационного выщелачивания из них сложноизвлекаемых форм нахождения россыпного золота хлоридными растворами, экспериментальные исследования активационного выщелачивания в перколяционном и агитационном режимах. По результатам исследований проведены опытно-промышленные испытания скважинного выщелачивания золота из эфельных отвалов Кручининского россыпного месторождения (Забайкальский край) активированными растворами с хлоридными комплексообразователями, позволившими извлечь более 70% металла от его расчетного исходного количества. Предложена комбинированная технологическая схема разработки россыпей, включающая отработку бульдозерами участков с преимущественно гравиобогатимым золотом и промывкой извлеченных песков, скважинным выщелачиванием золота из целиковых участков и кюветным выщелачиванием золота из хвостов промывки в сформированных котлованах. Схема была рекомендована артели «Кварц», осуществлявшей отработку этого месторождения.

Ключевые слова: золотосодержащие россыпи, формы нахождения золота, физико-химические процессы выщелачивания и сорбции, активированные бесцианидные растворы, хлоридные комплексы, активные формы кислорода, электрохимическая и фотохимическая обработка растворов, технологические схемы выщелачивания, комбинированные геотехнологии.

Благодарность: Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-20026, https://rscf.ru/project/24-17-20026/, совместно с министерством образования и науки Хабаровского края (Соглашение 109С/2024); минералогический анализ, электронная микроскопия, гравитационное обогащение проб выполнены на базе ЦКП «ЦИМС» ХФИЦ ДВО РАН.

Для цитирования: *Секисов А. Г., Алексеев В. С., Литвинова Н. М., Конарева Т. Г., Бянкин М. А.* Использование комбинированных геотехнологий при разработке россыпей со сложноизвлекаемыми формами нахождения золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12. – С. 144–158. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_12_0_144.

The use of mixed-type technologies for mining refractory gold ore placers

A.G. Sekisov[1], V.S. Alekseev[1], N.M. Litvinova[1], T.G. Konareva[1], M.A. Byankin[1,2]

[1] Institute of Mining of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia, e-mail: nauka22@yandex.ru

[2] Omega Limited Liability Company, Magadan, Russia

Abstract: Conventional technologies of gold placer mining and gold processing feature increasing losses of gold because of increased percentage of refractory gold occurrence forms in productive sands. This makes actual the research aimed at development of efficient geotechnologies combining mechanical excavation and washing of sand containing gold suitable for gravity concentration with in-situ and heap leaching of fine, flake and encapsulated gold from ore blocks and sluice tailings. With this end in view, an integrated method of research was used, embracing the mineralogical and geochemical analyses of samples of placer sands and their sluice tailings, the theoretical justification of parameters and modes of activation leaching to recover refractory gold forms by chloride solutions, and the experimental testing of activation leaching in the modes of percolation and agitation. The pilot tests of in-situ gold leaching from sluice tailings ponds at the Kruchina placer in Transbaikal by activated solutions with chloride complexing agents allowed gold recovery of 70% of the assumed original amount. The proposed mixed-type technology for placer mining includes bulldozer treatment of sites containing mostly gold suitable for gravity concentration, sluicing of excavated sand, in-situ leaching of gold from placer blocks and heap leaching of gold from sluice tailings in special ditches. The technology was recommended to Quartz mining team that carries out development of the test placer.

Key words: gold ore placer, gold occurrence forms, physicochemical processes of leaching and sorption, activated cyanide-free solutions, chloride complexes, active oxygen forms, electrochemical and photochemical treatment of solutions, leaching process flow sheets, mixed-type geotechnologies.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 24-17-20026, https://rscf.ru/project/24-17-20026/, jointly with the Ministry of Science and Education of the Khabarovsk Krai, Agreement No. 109C/2024. Mineralogical analysis, electron microscopy and gravity concentration of test samples was carried at the Shared Use Center for Mineral Resources and Environment Research, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences.

For citation: Sekisov A. G., Alekseev V. S., Litvinova N. M., Konareva T. G., Byankin M. A. The use of mixed-type technologies for mining refractory gold ore placers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12):144-158. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_12_0_144.

Введение

Золото в россыпных месторождениях в основном представлено в форме свободных частиц различной морфологии и размерности, видимых невооруженным глазом [1–5]. По морфологическим признакам выделяют изометричные, комковидные, лепешковидные, пластинчатые, палочковидные зерна золота и его дендриты. Также россыпное

золото может находиться в сростках сложной морфологии с жильными и шлиховыми минералами или в форме визуально обнаруживаемых вкраплений в них. Если крупность свободных частиц золота по одной из 3 осей достигает более 0,1 мм, то они могут с приемлемыми показателями извлекаться из продуктивных песков гравитационными способами обогащения. Свободное золото величиной менее 0,1 мм (чешуйчатое и пылевидное размерным диапазоном 0,01 — 0,005 мм) практически не извлекается гравитационными методами обогащения.

К связанным формам нахождения золота могут быть отнесены: сорбированное минералами глин золото и внутрикристаллическое, находящееся внутри минеральных зерен шлиховой фракции и кварца, включая инкапсулированное и не обнаруживаемое электронной микроскопией химически связанное и дисперсное. Инкапсулированное золото особенно сложно извлечь, а дисперсное, химически связанное — даже выявить. Эти формы нахождения связанного золота присутствуют в том или ином количестве практически в каждой россыпи. Вопросам изучения сложноизвлекаемых форм золота и их извлечения из техногенного минерального сырья с использованием гравитационных, пирометаллургических, гидрометаллургических, биогидрометаллургических и пр. процессов посвящено достаточно большое количество научных работ [6 — 10]. Для переработки продуктивных песков со значительным количеством минералов-концентраторов дисперсного и инкапсулированного золота и/или высокой долей в них чешуйчатых и пылевидных свободных золотин наиболее эффективно использование процессов выщелачивания [11 — 13].

Как правило, разрабатываемые в Дальневосточном Федеральном округе россыпи в первую очередь представлены участками с преобладающим гравиобогатимым золотом крупностью более 0,25 мм, преимущественно близкой к изометричной и/или лепешковидной формы с малым покрытием поверхности зерен оксидными пленками, малой долей пластинчатого золота (до 5%), незначительным (до 2%) содержанием минералов шлихового комплекса (при концентрации в нем инкапсулированного и дисперсного золота менее 0,3 — 0,4 г/т).

Для такого типа россыпей, в зависимости от мощности торфов и песков, обводненности пласта, наличия в непосредственной близости реки, возможна отработка с использованием одной из традиционных технологических схем добычи-переработки: механической выемки бульдозером, экскаватором, фронтальным погрузчиком или скрепером, грохочением-отмывкой и промывкой песков на промприборах, дражным способом. При глубине залегания продуктивного пласта более 10 — 12 м, его малой мощности и соответствующих гидрогеологических условиях — с использованием способа скважинной гидродобычи.

Вместе с тем в таких россыпных месторождениях часто встречаются участки, представленные преимущественно песками с гравиобогатимым золотом с комковидной, удлиненной (палочковидной) и сложной морфологией, с чистой поверхностью и с выраженным покрытием поверхности зерен оксидными пленками. Причем при преобладании на таких участках золота крупностью более 0,25 мм присутствует тонкое золото пластинчатой формы в соотношениях этих форм не более 20:1.

В последние пять-семь лет артели, вследствие истощения запасов, вынуждены вовлекать в разработку участки россыпей или отдельные россыпные месторождения, представленные песками, содержащими преимущественно тонкое

и ультратонкое золото размерностью, соответственно, в диапазонах 0,1 — 0,25 и 0,01 — 0,1 мм. При значительном (от 2% по массе) количестве минералов шлихов с дисперсным и инкапсулированным золотом в таких песках и концентрации золота в них не менее 0,3 — 0,4 г/т они могут перерабатываться по комбинированной технологии: промывкой на промприборе с получением гравиконцентрата и хвостов, далее центробежной сепарацией хвостов промывки с получением продуктивной фракции с доводкой ее на шлихообогатительных установках с последующим, преимущественно раздельным, выщелачиванием продуктивных фракций хвостов промывки и хвостов ШОУ. Пески с высоким содержанием как мелкопластинчатых (чешуйчатых) форм золота, так и пылевидных частиц (0,005 — 0,01 мм), а также пески, содержащие его дисперсные и инкапсулированные формы в минералах шлихов и/или в минералах алевритовой фракции, нецелесообразно перерабатывать промывкой. Такие пески должны перерабатываться прямым выщелачиванием или с предварительным отделением продуктивных классов крупности. Золото из целиковых участков песков россыпей с некондиционным содержанием может извлекаться скважинным выщелачиванием.

Таким образом, при разработке россыпей, представленных продуктивными зонами с существенно различными формами нахождения золота, целесообразно использовать комбинированные геотехнологии. При этом традиционная механическая выемка песков с преимущественно гравиобогатимым золотом и промывкой их на промприборах будет сочетаться со скважинным выщелачиванием мелкого, пылевидного и чешуйчатого золота из целиковых участков полигонов, а также с кюветным выщелачиванием из хвостов промывки и доводки.

Для выщелачивания чешуйчатых и пылевидных свободных золотин, а также дисперсных, химически связанных и инкапсулированных форм золота необходимо использовать специальные растворы, обеспечивающие возможность повышения пористости и микротрещиноватости его минералов-концентраторов и передислокации кластеров золота к их контактным поверхностям. Несмотря на малый размер чешуйчатых и пылевидных частиц золота, вследствие их кластерной наноструктуры, наличия оксидных, амальгамных и углеродных включений в их приповерхностных слоях, объемно распределенных примесей серебра, меди и других элементов, они обладают значительной технологической упорностью при растворении цианидами. Кроме того, наличие в продуктивной фракции частиц гематита и сульфидов приводит к повышенному расходу реагентов и длительности процесса растворения золотин.

Известны работы по использованию альтернативных цианидам растворов для извлечения «упорного» золота и ряда других ценных компонентов [14 — 16].

Выщелачивание золота с использованием газообразного хлора было осуществлено еще в 1848 г. (первая заводская хлоринационная установка была создана в Германии) [17]. После этого в США и Австралии также стали использовать выщелачивание золота из руд хлором. Причем процесс гидрохлоринации золота был основным до разработки более дешевого и простого в конструктивном оформлении процесса цианирования. Во всех конструктивных вариантах используемого оборудования хлоринационное выщелачивание золота осуществлялось путем формирования водорастворимого хлорсодержащего комплекса ($AuCl_4$). Упрощенно, реакция образования такого комплекса выражается уравнениями:

$$2Au + 3Cl_2 + 2Cl^- = 2(AuCl_4)^-,$$

или, что в большей степени отражает химизм процесса:

$$2Au + 3Cl_2 + 2HCl = 2Au + 3Cl_2 +$$
$$+ 2H^+ + 2Cl^- = 2[H + (AuCl_4)^-].$$

Использование хлоринационного выщелачивания золота (и, в целом, галогенидного), в сравнении с его выщелачиванием растворами цианидов щелочных металлов, в большинстве случаев менее выгодно экономически. Вместе с тем, учитывая предпочтительную кинетику и динамику процесса хлоринационного выщелачивания, его меньшую экологическую опасность, что особенно важно при сезонной разработке россыпных месторождений, актуальным остается решение задачи повышения его эффективности в структуре технологических схем кучного, кюветного или скважинного выщелачивания [18 — 20].

Наиболее эффективными хлорсодержащими растворителями золота являются хлорид нитрозила (ClNO), образующийся при смешении азотной и соляной кислот (1:3), и хлорная кислота $HClO_4$ [21]. Хлорная кислота является одной из самых сильных неорганических кислот, которая, обладая способностью к полимеризации, может одноактно образовывать с кластеризованным золотом комплексные соединения с относительно высокой скоростью протекания реакции без дополнительных окислителей:

$$Au_2 + nH_2O \cdot 9(HClO_4) \rightarrow$$
$$\rightarrow 2[Au(ClO_4)_3] +$$
$$+ (n + 3)H_2O \cdot 3HClO_3$$

При использовании хлорной воды для растворения золота молекулярный хлор при гидратации, как известно, образует метастабильный комплекс хлорноватистой и соляной кислот, выполняющих соответственно функции окислителя и комплексообразователя:

$$Cl_2^* + nH_2O^* = HClO \cdot HCl.$$

Хлорная кислота, в отличие от хлорноватистой, содержит в своем составе на 3 атома кислорода больше, поэтому совмещает в себе свойства окислителя и комплексообразователя. Следовательно, если обеспечить условия для создания реакционной среды, в которой будут появляться гидратированные метастабильные комплексы $ClO^- \cdot 3H_3O^+ \cdot \cdot nH_2O^*$ или, при более высокой степени ионизации, $ClO^- \cdot 9H + \cdot 3O^{2-*} \cdot nH_2O$, эквивалентные по элементному составу и динамической структуре хлорной кислоте, то это обеспечит возможность ее использования для выщелачивания сложноизвлекаемых форм золота из песков россыпей. При электрохимической обработке исходного подкисленного раствора хлорида натрия, с соблюдением ее определенных режимов и параметров, а также при облучении источником ультрафиолетового света образующаяся хлорноватистая кислота, при опосредованном участии появляющихся в ходе электродиссоциации молекул воды, активных ионов водорода (протонов), может образовать метастабильную связь ионов хлора с гидратированными ионами кислорода O^{2-}:

$$HClO \cdot (9H^+ 3O^{2-} nH_2O) \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow (Cl^- \cdot 9H^+ \cdot 4O^{2-}) \cdot H_3O +$$
$$+ H_2O^- (n - 2) H_2O^*.$$

Таким образом, формируя посредством электрохимической и фотохимической обработки исходного хлоридного раствора хлорноватистую кислоту, совместно с активными гидратированными формами кислорода, возможно синтезировать в нем метастабильную форму хлорной кислоты, сопоставимую по эффективности с ее стабильной формой [11].

Одним из направлений повышения эффективности извлечения дисперсных и инкапсулированных форм золота яв-

ляется использование специальных активированных растворов в технологических схемах кучного, кюветного или скважинного выщелачивания. Причем в отдельных случаях использование таких растворов может быть эффективно только в варианте механохимической активации. В рамках данной статьи отражены результаты экспериментальных и теоретических исследований по извлечению сложноизвлекаемых форм нахождения россыпного золота на основе комплексного подхода к изучению вещественных и технологических характеристик исходных песков золотосодержащих россыпей и техногенного материала.

Материалы и методы исследования

На основе анализа разработанных в МГРИ–РГГРУ, Иргиредмете и ЦНИГРИ методик оценки морфологических типов и форм нахождения золота, результатов собственных исследований авторов [20], проведенных на россыпных и производных от них техногенных образованиях, предлагается следующая методика геотехнологической оценки золотосодержащих песков россыпи.

На первом этапе предварительно устанавливается общее количество золота гравиметрическим, пробирным или пробирно-атомно-абсорбционным методом со специальной пробоподготовкой, обеспечивающей стадийный переход различных форм дисперсного золота в коллектирующий свинцово-серебряный веркблей.

На втором этапе устанавливается долевая часть различных форм нахождения золота, включая: 1) свободное гравиобогатимое, 2) золото в сростках, 3) свободное, условно не извлекаемое гравитационными методами (тонкое, пластинчатое, чешуйчатое), 4) сорбированное, 5) физически и химически связанное (соответственно инкапсулированное и дисперсное), т.е. сконцентрированное в частицах магнетита и других минералов шлиховой фракции, кварце-халцедоне алевритовой фракции песков россыпи. При этом главным отличием дисперсного золота от его инкапсулированных форм, по мнению авторов, является преобладание его межатомных связей с другими химическими элементами в минералах-носителях над моноэлементными связями (Au — Au).

Дисперсное золото может проявляться в виде различных кластерных структур:

а) металлокластеров: Au — Ag, Au — Hg, Au — Bi, Au — Cu;

б) биэлементных кластеров: *n*Au — *m*S, *n*Au — *m*Si, *n*Au — *m*C, Au — Sb, Au-Te;

в) металлорганических кластеров: *n*Au — $R_{орг}$;

г) полиэлементных кластеров: *n*Au — *m*(Fe-O), *n*Au — *m*(Fe-O-OH), *n*Au-*m*FeS, *n*Au — *m*PbS, *n*Au — *m*SiO_2 [20].

При выполнении экспериментальных исследований выщелачивания золота из техногенных образований работы проводились в следующей последовательности.

1. Тестовые исследования по агитационному выщелачиванию золота (моделирующие чановый вариант промышленной схемы выщелачивания). При этом осуществлялась сравнительная оценка растворимости меди, золота и серебра различными реагентными комплексами в режиме агитации с концентрацией, приемлемой для промышленных условий. Агитация осуществлялась вращением закрытых емкостей с пульпами на рольгангах (вращающихся валах) в течение 6 ч. В случае достижения уровня извлечения каждого из ценных металлов не менее 55% вариант считался приемлемым для продолжения исследований на следующем этапе. При недостаточном уровне извлечения метала

(менее 50%) за заданный интервал времени эксперимент (тест) повторялся в пролонгированном варианте.

2. Тестовые исследования по перколяционному выщелачиванию золота (моделирующие вариант кучного выщелачивания), осуществляемые по итогам агитационного выщелачивания с использованием наиболее эффективных режимов и реагентных комплексов.

При выполнении тестовых исследований по агитационному выщелачиванию учитывалось, что растворение золота может быть реализовано как в варианте прямого извлечения (без предварительного концентрирования рудных минералов), так и в варианте его доизвлечения после предварительного гравитационного обогащения. Экспериментальные исследования процессов агитационного и перколяционного выщелачивания золота осуществлялись стандартными и активированными растворами из техногенного материала, содержащего преимущественно его сложноизвлекаемые формы.

Лабораторные исследования процессов перколяционного выщелачивания золота и сопутствующих элементов из навесок технологической пробы проводились при различных гидродинамических режимах орошения и концентрационных параметрах бесцианидных растворов.

3. Тестовые исследования по перколяционному выщелачиванию золота и сопутствующих элементов бесцианидными растворами на крупнообъемных навесках технологических проб.

4. Полупромышленные испытания на конкретном объекте с возможным внедрением новых технологических решений.

Результаты и обсуждения

Как отмечалось выше, свободные частицы чешуйчатого, тонкого, ультратонкого и пылевидного золота часто обладают технологической упорностью. Более сложно выщелачивается инкапсулированное и химически связанное золото, поэтому для извлечения таких форм золота из песков россыпей предлагается использовать специальные активированные растворы. Учитывая повышенные экологические требования при разработке россыпных месторождений, такие растворы должны быть бесцианидными.

Работы по выщелачиванию обладающего технологической упорностью золота электроактивированными растворами проводятся авторами статьи с 1986 г. В частности, при выполнении прикладных исследований (по договорам, заключенным между Тырныаузским вольфрамо-молибденовым комбинатом и МГРИ) в период 1986—1991 гг. при выщелачивании золота и молибдена электроактивированными оборотными хлоридными растворами из сульфидной руды штокверкового месторождения Гитче–Тырныауз (Кабардино-Балкария) было обеспечено приемлемое извлечение в продуктивный раствор не только молибдена, но и дисперсного золота. При этом было доказано, что метастабильность хлор-кислородных комплексов свежеприготовленных растворов определяет итоговую эффективность процесса.

Использование электрофотоактивированных выщелачивающих растворов, содержащих метастабильные хлор-кислородные комплексы для извлечения, в последующем проводилось при тестировании упорных золотосодержащих руд различных формационных типов и, главным образом, россыпных объектов Забайкальского и Хабаровского края.

При выполнении экспериментальных лабораторных исследований по растворению сложноизвлекаемых форм россыпного золота для активации вы-

щелачивающего раствора хлоридно-гипохлоритного реагентного комплекса использовался как стандартный лабораторный электролизер «Санер 5-30-01» (на стадии лабораторных экспериментов), так и изготовленный в ИГД ДВО РАН трехэлектродный двухкамерный электролизер (для опытно-промышленных испытаний), схема которого приведена на рис. 1. Нестандартный вариант электролизера, в отличие от электролизера «Санер 5-30-01», позволяет, во-первых, получать два вида растворов: кислотный анолит в анодной камере и слабощелочной биэлектролит (в биэлектродной камере), во-вторых, устанавливать над камерами УФ-лампу, не извлекая электроды из камеры электролизера. В качестве источника ультрафиолетового излучения как в том, так и в другом вариантах использовалась стандартная лампа ультрафиолетового излучения (ДРТ 400).

При обработке в реакторе раствора хлорида натрия в биэлектродной камере реактора синтезируется гипохлорит натрия, а в анодной камере, при УФ-облучении лампой, установленной над ней, — анолит с комплексом метастабильных хлоркислородных кислот.

С использованием растворов, подготовленных в разработанном лабораторном реакторе, были проведены сравнительные эксперименты по извлечению дисперсного и инкапсулированного золота из шлиховых фракций песков россыпей Верхняя Борзя со средним содержанием золота в пробе — 143,5 г/т и месторождения россыпного золота Средняя Кия (среднее содержание золота — 175 г/т). Отличительной особенностью шлиховой фракции песков этих россыпей являются высокие (более 100 г/т) содержания инкапсулированного и дисперсного золота в пирите и магнетите, составляющих основу ее массы.

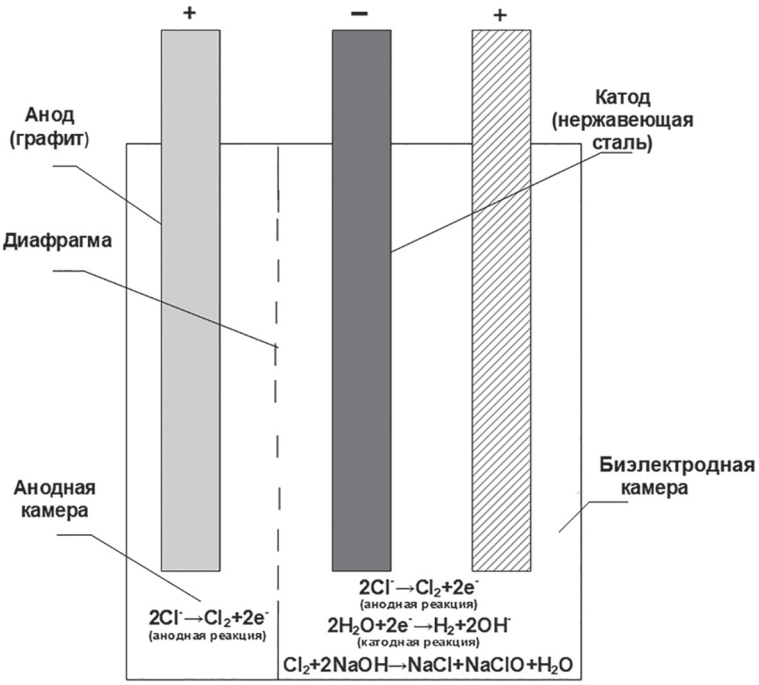


Рис.1. Схема электрохимического реактора с рабочими камерами
Fig. 1. Diagram of an electrochemical reactor with working chambers

Для сравнения использовались две схемы выщелачивания золота активированными растворами из навесок пробы шлиховой фракции: карбонатно-цианидная и карбонатно-хлоридная. Содержание золота в шлиховой фракции определялось стандартным пробирно-атомно-абсорбционным методом.

По первой схеме навеска пробы шлиха песков была помещена в пластиковую кювету и залита фотоэлектроактивированным гидрокарбонатным раствором (5 л раствора на 10 кг навески). Исходная концентрация гидрокарбоната натрия 10 г/л. Электрохимическая обработка раствора осуществлялась в течение 40 мин при плотности тока 8 А/дм^2, с последующим облучением (УФ-лампой ДРТ-400) в течение 5 мин, с расстояния 10 см. pH раствора после обработки — 10,3—10,7. Предварительно проба пропитывалась фотоэлектроактивированным раствором. Полученная смесь для предокисления выдерживалась в пропитанном состоянии в течение месяца под пленкой. После появления на поверхности частиц магнетита пленок оксидов-гидроксидов железа остаточный раствор был слит. Далее навеска периодически заливалась концентрированным цианидным раствором, подготовленным на базе фотоэлектроактивированного пероксидно-карбонатного раствора до полного увлажнения (соотношение Ж:Т = 1:7), концентрация NaCN = 1,5 г/л в пересчете на жидкую фазу при последующем кюветном выщелачивании (соотношение Ж:Т = = 1,5:1), выдерживалась 8 сут в пропитанном состоянии. После этого навеска заливалась технической водой и в течение следующих суток осуществлялось выщелачивание в агитационном режиме барботажем сжатым воздухом, подаваемым автокомпрессором. Всего было осуществлено пять циклов выщелачивания в пульсационно-статическом гидродинамическом режиме (заливка раствора — пауза — слив раствора — пауза — заливка раствора).

По второй схеме навеска пробы шлиха массой 10 кг обрабатывалась на первом этапе таким же, как и в первом случае, фотоэлектроактивированным гидрокарбонатным раствором, а затем, после выдерживания паузы, орошалась фотоэлектроактивированным хлоридным раствором, с такими же, как в первой (цианидно-карбонатной) схеме временными и гидродинамическими параметрами. При подготовке хлоридно-гипохлоритного раствора исходное содержание хлорида натрия — 20 г/л, подкисление на завершающей стадии электролиза соляной кислотой при ее расходе 4 мл/л в анодной и катодной камерах. Окончательное pH анолита — раствора, полученного электрохимической обработкой раствора анодной камеры, с облучением его УФ-лампой (5 мин, с расстояния 10 см) до окончания электролиза — 3,7—4,3, pH католита — 7,1—7,3. Так же, как и в первой кювете, было осуществлено пять циклов выщелачивания с аналогичным гидродинамическим режимом обработки: первоначально — католитом, а затем (в следующем цикле) — анолитом и т.д.

За 2,5 месяца по карбонатно-хлоридной схеме было извлечено 88,86—94% золота. Максимальное извлечение по карбонатно-цианидной схеме — 66,90—67,50%. Расчет извлечения производился по соотношению количества золота, перешедшего в растворы, и исходного количества золота в твердой фазе, а также по балансу металла. Результаты экспериментов представлены на рис. 2 и 3.

Высокое извлечение золота активным карбонатно-хлоридным раствором относительно использования карбонатно-цианидного было также достигнуто и из навесок пробы шлиховой фракции

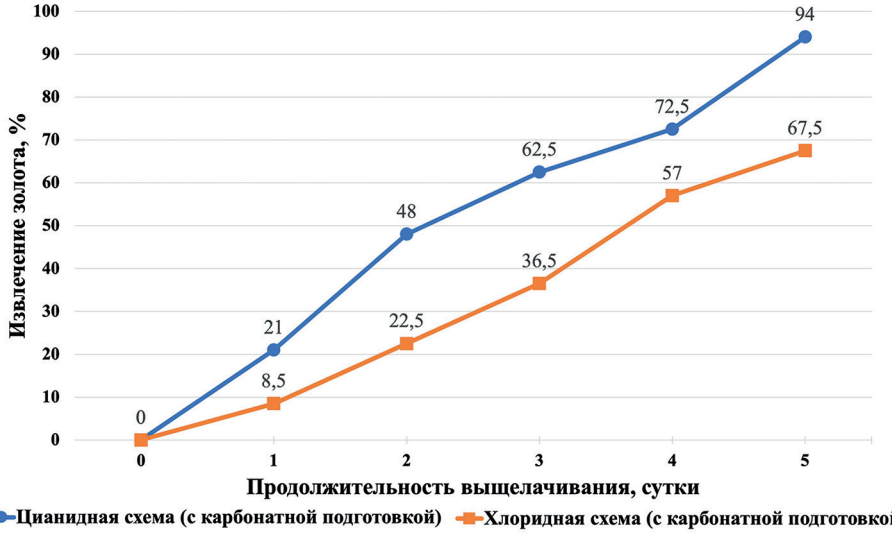


Рис. 2. Динамика извлечения золота в продуктивные растворы при активационном выщелачивании из шлихов Верхней Борзи

Fig. 2. Dynamics of gold extraction into productive solutions during activation leaching from Upper Borzya gold nuggets

песков россыпи Средняя Кия (см. рис. 3).

Опытно-промышленные испытания скважинного перкарбонатно-хлоридного выщелачивания были проведены по согласованию с руководством артели «Кварц» на гале-эфельном отвале прииска «Кручина» (Читинская область) с аналогичным вещественным составом проб с использованием активированных растворов, которые готовились по представленным выше схемам. Для полупромышленных испытаний использован фотоэлектрохимический реактор, описание которого приведено выше (см. рис. 1). Производительность реактора 15 л/ч, т.е. для подготовки раствора, доставляемого на объект (40 км от Читы), максимальное время простоя составляло не более 5 ч, что не критично снижало его активность. При этом за неполных 2 месяца на погружные ионообменные сорбенты, помещенные в от-

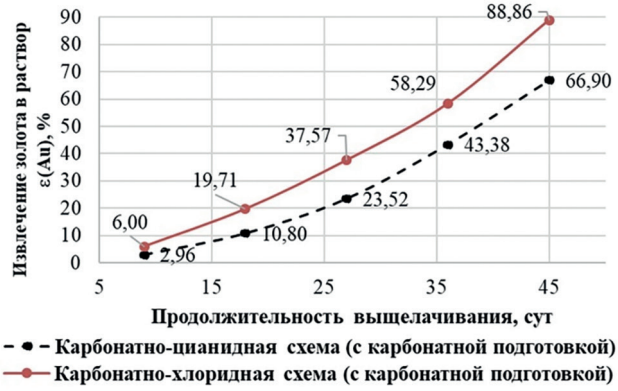
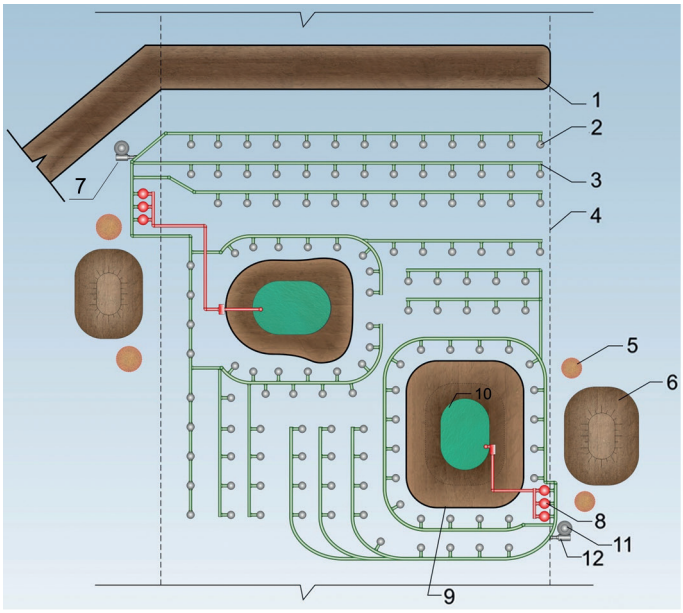


Рис. 3. Динамика выщелачивания золота из шлиха россыпи Средняя Кия

Fig. 3. Dynamics of gold leaching from the placer tailings Average Kiya



1 – дренажная канава
2 – закачные скважины
3 – трубопровод для подачи технологических растворов
4 – граница россыпи
5 – хвосты промывки песков
6 – гале-эфельный отвал
7 – насос
8 – сорбционные колонны
9 – котлован
10 – прудок-накопитель
11 – емкость с реагентом
12 – насос-дозатор

Рис. 4. Схема комбинированной разработки россыпного месторождения золота
Fig. 4. Scheme of combined development of a placer gold deposit

качные скважины, было извлечено более 70% золота от расчетного количества в опытном блоке.

На основе результатов выполненных исследований в ИГД ДВО РАН была обоснована комбинированная геотехнологическая схема разработки россыпей с изменчивыми параметрами продуктивных песков и, в первую очередь, соотношением различных форм нахождения в них золота (рис. 4), в соответствии с которой на начальном этапе их освоения производят селективную выемку песков, преимущественно содержащих гравиобогатимое золото, в результате чего формируются небольшие котлованы. На следующем этапе разработки в котлованы после гидроизоляции их бортов и днища сливают сбросную пульпу — хвосты промывки песков с промприборов, содержащую тонкую фракцию с недоизвлеченным тонким и пластинчатым золотом.

Также в котлованы, предпочтительно отдельные, сливают и шлиховую фракцию хвостов ШОУ, содержащую инкапсулированные, дисперсные и химически связанные формы нахождения золота. После этого в котлованах осуществляют декантацию водно-минеральной смеси и откачивают из них воду, в которую дозированно добавляют хлорид натрия. Полученный раствор подвергают обработке в погружных или выносных фотоэлектрохимических реакторах. В межкотлованных целиках с песками, содержащими в основном тонкое золото, осуществляют бурение закачных скважин и подают через них в продуктивный пласт первоначально активированные перкарбонатные растворы, содержащие окислители для продуктивных на золото минералов шлихов, а после технологической паузы — активные гипохлоритно-хлоридные выщелачивающие растворы. Золотосодержащие продуктивные растворы, полученные скважинным выщелачиванием, откачивают и подают в котлованы для доведения минеральной массы до пуль-

пообразного состояния или орошают ее выщелачивающим раствором в режиме фильтрации. Продуктивные растворы (или жидкая фаза пульп) поступают в сорбционные колонны для извлечения из них растворенного золота. Обеззолоченные маточные растворы доукрепляют, реактивируют и закачивают в скважины.

Производственный цикл продолжают до достижения требуемых остаточных концентраций золота в продуктивном пласте и хвостах промывки в котловане.

Выводы

При освоении золотосодержащих россыпей целесообразно выделять эксплуатационные блоки с продуктивными песками, с формами нахождения золота, не извлекаемыми при использовании гравитационных способов обогащения. Для извлечения сложноизвлекаемых форм нахождения в продуктивных песках золота, теряемых при гравитационном обогащении, предложено выщелачивать их активированными растворами, содержащими хлоридные комплексы, ассоциированные с гидратированными активными формами кислорода. Подготовка активированных растворов может осуществляться с использованием электрохимической и/или фотохимической обработки в реакторах специальной конструкции.

На основании результатов, полученных при выполнении экспериментальных исследований процессов активационного выщелачивания, можно сделать определенный вывод о значительном технологическом преимуществе схемы выщелачивания чешуйчатого и пылевидного золота размерным диапазоном 0,01 — 0,005 мм, сорбированного минералами глин, и дисперсного золота, находящегося внутри минеральных зерен шлиховой фракции и кварца, экологощадящими растворами с активными карбонатно-хлоридными комплексами.

Опытно-промышленные испытания скважинного перкарбонатно-хлоридного выщелачивания, проведенные по согласованию с руководством артели «Кварц» на гале-эфельном отвале прииска «Кручина» (Читинская область), подтвердили эффективность использования активированных растворов для извлечения тонкого, чешуйчатого и инкапсулированного золота. На основании результатов проведенных работ обоснована комбинированная геотехнологическая схема разработки золотосодержащих полиморфных россыпей, включающая выемку песков с преимущественно гравиобогатимым золотом механическими средствами и их промывку на промприборе с кюветным выщелачиванием недоизвлеченного золота и отработку целиковых участков скважинным выщелачиванием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кузнецова И. В.*, *Сафронов П. П.*, *Моисеенко Н. В.* Вещественно-минеральная характеристика техногенных россыпей — потенциальных источников благородного металла (на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья, Россия) // Георесурсы. — 2019. — № 21(1). — С. 2 — 14. DOI: 10.18599/ grs.2019.1.2-14.

2. *Ван-Ван-Е А. П.* Ресурсная база природных и техногенных месторождений золота. — М.: Изд-во «Горная книга», 2010. — 268 с.

3. *Петровская Н. В.* Самородное золото. — М.: Наука, 1973. — 349 с.

4. *Санакулов К. С.*, *Хамроев И. О.* Перспективы, свойства и формирование нанозолота. Типизация ультрадисперсных (нано) золотосодержащих руд. Классификация форм нахождения проявлений природного золота с агрегацией свободного нанозолота // Цветные металлы. — 2021. — № 9. — С. 5 — 28. DOI: 10.17580/tsm.2021.09.01.

5. *Борисов Р. В.*, *Брагин В. И.*, *Жижаев А. М.*, *Лихацкий М. Н.* Особенности формирования вторичной золотой минерализации в лежалых хвостах ЗИФ // Обогащение руд. — 2022. — № 2. — С. 29—36. DOI: 10.17580/or.2022.02.05.

6. *Wang J., Faraji F., Ramsay J., Ghahreman A.* A review of biocyanidation as a sustainable route for gold recovery from primary and secondary low-grade resources // Journal of Cleaner Production. 2021, vol. 296, pp. 1—18. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126457.

7. *Xiang Liu, Yongliang Wang, Li Xiao, Licheng Ma, Peiwei Han, Shufeng Ye* Eco-friendly and rapid extraction of gold by in-situ catalytic oxidation with N-bromosuccinimide // Heliyon. 2022, vol. 8, no. 6, article e09706. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09706.

8. *Амдур А. М.*, *Федоров С. А.*, *Власов И. А.* Повышение извлечения микродисперсного золота и других ценных компонентов из техногенных материалов / Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований. Труды VI Конгресса с международным участием «ТЕХНОГЕН 2023». — Екатеринбург, 2023. — С. 110—112. DOI: 10.34923/technogen-ural.2023.36.99.027.

9. *Рассказова А. В.* Методы обогащения бедных золотомедных руд // Проблемы недропользования. — 2019. — № 2(21). — С. 122—129. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.122.

9. *Rasskazova A. V.* Methods of enrichment of poor gold-copper ores // Problems of Subsoil Use. 2019, no. 2(21), pp. 122—129. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.122.

10. *Лаврик А. В.*, *Лаврик Н. А.*, *Рассказова А. В.*, *Литвинова Н. М.*, *Конарева Т. Г.* Исследование комплексной золотосодержащей руды месторождения Делькен и оценка ее технологических свойств // Проблемы недропользования. — 2020. — № 2 (25). — С. 17—23. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.017.

11. *Sekissov A., Paronyan A., Kouzin V., Lalabekyan N.* Patent US5942098 Method of treatment of water and method and composition for recovery of presious metal. USA International Class C 25 B 001/00, C 25 C 001/20 Filed 12.04.96.

12. *Ковлеков И. И.* Техногенное золото Якутии. — М.: Изд-во МГГУ, 2002. — 303 с.

13. *Surimbayev B., Yessengarayev Y., Khumarbekuly Y., Bolotova L., Kanaly Y., Akzharkenov M., Zhumabai Sh.* Effect of sodium acetate additive on gold leaching with cyanide solution: Laboratory and semi-pilot leaching tests // Heliyon. 2024, vol. 10, no. 15, article e35805. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e35805.

14. *Lei Hou, Alejandro López Valdivieso, Yu Chen, Peng Chen, Nasriddinov Zamoniddin Zainiddinovich, Chunhui Wu, Shaoxian Song, Feifei Jia* A highly efficient clean hydrometallurgy process for gold leaching in a Fenton oxidation assisted thiourea system // Sustainable Materials and Technologies. 2024, vol. 40, article e00975. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e00975.

15. *Холмогоров А. Г.*, *Пашков Г. Л.*, *Кононова О. Н.*, *Кононов Ю. С.*, *Плеханов В. П.* Нецианидные растворители для извлечения золота из золотосодержащих продуктов // Химия в интересах устойчивого развития. — 2021. — № 9. — С. 293—298.

16. *Холов Х. И.*, *Шарифбоев Н. Т.*, *Самихов Ш. Р.*, *Джуракулов Ш. Р.*, *Зарифова М. С.* Выщелачивание золота различными растворами, заменители цианида и их перспективы в будущем // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. — 2021. — Т. 14. — № 4. — С. 433—447.

17. *Максимов В. И.* Электрохлоринация как метод комплексного извлечения металлов. — М.: Металлургиздат, 1955. — 160 с.

18. *Karppinen A., Seisko S., Nevatalo L., B. Wilson P., Yliniemi K., Lundström M.* Gold recovery from cyanidation residue by chloride leaching and carbon adsorption — Preliminary results from CICL process // Hydrometallurgy. 2024, vol. 226, article 106304. DOI: 10.1016/ j.hydromet. 2024.106304.

19. *Nicol M., Ye K., Garrard N.* The combined leaching of copper, gold and uranium in chloride solutions. II. Concentrate leach tests // Hydrometallurgy. 2025, vol. 231, article 106407. DOI: 10.1016/j. hydromet.2024.106407.

20. *Секисов А. Г.*, *Алексеев В. С.*, *Рассказова А. В.*, *Серый Р. С.* Геолого-технологические особенности комплексных и полиморфных россыпных месторождений Хабаровского и Забайкальского края // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2025. — № 1. — С. 553—569.

21. *Оспанов Х. К.*, *Мерешкова К. С.* Поиск эффективного раствора выщелачивания золота на основе гипохлорита натрия // Universum: химия и биология. — 2022. — № 6(96). URL: https://7universum.com /ru/nature/archive/item/13845. ГИАБ

REFERENCES

1. Kuznetsova I. V., Safronov P. P., Moiseenko N. V. Material and mineral characteristics of technogenic placer deposits as potential sources of precious metals (based on the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node in the Amur Region, Russia). *Georesursy*. 2019, no. 21(1), pp. 2—14. [In Russ]. DOI: 10.18599/ grs.2019.1.2-14.

2. Van-Van-E A. P. *Resursnaya baza prirodnykh i tekhnogennykh mestorozhdeniy zolota* [Resource base of natural and man-made gold deposits], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2010, 268 p.

3. Petrovskaya N. V. Samorodnoe zoloto [Native Gold], Moscow, Nauka, 1973, 349 p.

4. Sanakulov K. S., Khamroev I. O. Prospects, properties and formation of nanogold. Typification of ultrafine (nano) gold-bearing ores. Classification of forms of natural gold exposure presence with aggregation of free nanogold. *Tsvetnye Metally*. 2021, no. 9, pp. 5—28. [In Russ]. DOI: 10.17580/ tsm.2021.09.01.

5. Borisov R. V., Bragin V. I., Zhizhaev A. M., Likhatsky M. N. Specific development features of secondary gold mineralization in mature tailings of gold processing plants. *Obogashchenie Rud*. 2022, no. 2, pp. 29—36. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2022.02.05.

6. Wang J., Faraji F., Ramsay J., Ghahreman A. A review of biocyanidation as a sustainable route for gold recovery from primary and secondary low-grade resources. *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 296, pp. 1—18. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126457.

7. Xiang Liu, Yongliang Wang, Li Xiao, Licheng Ma, Peiwei Han, Shufeng Ye Eco-friendly and rapid extraction of gold by in-situ catalytic oxidation with N-bromosuccinimide. *Heliyon*. 2022, vol. 8, no. 6, article e09706. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09706.

8. Amdur A. M., Fedorov S. A., and Vlasov I. A. Increasing the extraction of microdispersed gold and other valuable components from technogenic materials. *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki protsessov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy. Trudy VI Kongressa c mezhdunarodnym uchastiem «TEKHNOGEN 2023»* [Fundamental research and applied development of processes for processing and utilization of technogenic formations. Proceedings of the VI International Congress «TECHNOGEN 2023»], Ekaterinburg, 2023, pp. 110—112. [In Russ]. DOI: 10.34923/ technogen-ural.2023.36.99.027.

9. Rasskazova A. V. Methods of enrichment of poor gold-copper ores. *Problems of Subsoil Use*. 2019, no. 2(21), pp. 122—129. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.122.

10. Lavrik A. V., Lavrik N. A., Rasskazova A. V., Litvinova N. M., Konareva T. G. Investigation of the complex gold-bearing ore of the Delken deposit and assessment of its technological properties. *Problems of Subsoil Use*. 2020, no. 2(25), pp. 17—23. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.017.

11. Sekissov A., Paronyan A., Kouzin V., Lalabekyan N. *Patent US5942098 Method of treatment of water and method and composition for recovery of presious metal*. USA International Class C 25 B 001/00, C 25 C 001/20 Filed 12.04.96.

12. Kovlekov I. I. *Tekhnogennoe zoloto Yakutii* [Technogenic gold of Yakutia], Moscow, Izd-vo MGGU, 2002, 303 p.

13. Surimbayev B., Yessengarayev Y., Khumarbekuly Y., Bolotova L., Kanaly Y., Akzharkenov M., Zhumabai Sh. Effect of sodium acetate additive on gold leaching with cyanide solution: Laboratory and semi-pilot leaching tests. *Heliyon*. 2024, vol. 10, no. 15, article e35805. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e35805.

14. Lei Hou, Alejandro López Valdivieso, Yu Chen, Peng Chen, Nasriddinov Zamoniddin Zainiddinovich, Chunhui Wu, Shaoxian Song, Feifei Jia A highly efficient clean hydrometallurgy process for gold leaching in a Fenton oxidation assisted thiourea system. *Sustainable Materials and Technologies*. 2024, vol. 40, article e00975. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e00975.

15. Kholmogorov A. G., Pashkov G. L., Kononova O. N., Kononov Yu. S., Plekhanov V. P. Non-cyanide solvents for the extraction of gold from gold-containing products. *Chemistry for Sustainable Development*. 2021, no. 9, pp. 293—298. [In Russ].

16. Holov Kh. I., Sharifboev N. T., Samikhov Sh. R., Dzhurakulov Sh. R., Zarifova M. S. Gold leaching with various solutions, cyanide substitutes, and their prospects in the future. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2021, vol. 14, no. 4, pp. 433—447. [In Russ].

17. Maksimov V. I. *Elektrokhlorinatsiya kak metod kompleksnogo izvlecheniya metallov* [Electrochlorination as a method of complex extraction of metals], Moscow, Metallurgizdat, 1955, 160 p.

18. Karppinen A., Seisko S., Nevatalo L., B. Wilson P., Yliniemi K., Lundström M. Gold recovery from cyanidation residue by chloride leaching and carbon adsorption — Preliminary results from CICL process. *Hydrometallurgy*. 2024, vol. 226, article 106304. DOI: 10.1016/ j.hydromet. 2024.106304.

19. Nicol M., Ye K., Garrard N. The combined leaching of copper, gold and uranium in chloride solutions. II. Concentrate leach tests. *Hydrometallurgy*. 2025, vol. 231, article 106407. DOI: 10.1016/j.hydromet.2024.106407.

20. Sekisov A. G., Alekseev V. S., Rasskazova A. V., Seriy R. S. Geological and technological features of complex and polymorphic placer deposits of the Khabarovsk and Trans-Baikal Territories. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2025, no. 1, pp. 553—569. [In Russ].

21. Ospanov Kh. K., Mereshkova K. S. Search for an effective gold leaching solution based on sodium hypochlorite. *Universum: chemistry and biology*. 2022, no. 6(96). [In Russ]. URL: https://7universum.com /ru/nature/archive/item/13845.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Секисов Артур Геннадиевич[1] — д-р. техн. наук,
зам. директора по научной работе,
e-mail: sekisovag@mail.ru,
ORCID ID: 0001-0001-5780-6150,
Алексеев Владимир Сергеевич[1] — канд. техн. наук,
зам. директора по научной работе и инновациям,
e-mail: alekseev.igd.khv@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8248-105X,
Литвинова Наталья Михайловна[1] — канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: nauka22@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8199-1605,
Конарева Татьяна Геннадьевна[1] — старший научный сотрудник,
e-mail: konar_tat@ mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9889-3721,
Бянкин Максим Александрович[1] — аспирант;
ООО «Омега», e-mail: maxbyanich@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0006-2632-585X,
[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН.
Для контактов: Литвинова Н.М., e-mail: nauka22@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.G. Sekisov[1], Dr. Sci. (Eng.),
Deputy Director for Research, e-mail: sekisovag@mail.ru,
ORCID ID: 0001-0001-5780-6150,
V.S. Alekseev[1], Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director
for Research and Innovation, e-mail: alekseev.igd.khv@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8248-105X,
N.M. Litvinova[1], Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher, e-mail: nauka22@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8199-1605,
T.G. Konareva[1], Senior Researcher,
e-mail: konar_tat@ mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9889-3721,
M.A. Byankin[1], Graduate Student; Omega Limited Liability Company,
Magadan, Russia, e-mail: maxbyanich@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0006-2632-585X,
[1] Institute of Mining of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
680000, Khabarovsk, Russia.
Corresponding author: N.M. Litvinova, e-mail: nauka22@yandex.ru.

Получена редакцией 21.07.2025; получена после рецензии 03.10.2025; принята к печати 10.11.2025.
Received by the editors 21.07.2025; received after the review 03.10.2025; accepted for printing 10.11.2025.