

## БЕСЦИАНИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Л. В. Шумилова<sup>1</sup>, А. Н. Хатькова<sup>1</sup>, К. К. Размахнин<sup>1</sup>, М. Ф. Простакишин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО Забайкальский государственный университет, Чита, 672039, Россия

**Аннотация:** Экологощадящие технологии переработки отходов горных предприятий обеспечивают возможность компромиссного сосуществования двух систем: человек – природа, человек – технологии. Объект исследований – технология «Альбион» для переработки лежалых сульфидных флотационных хвостов золотоизвлекательной фабрики на основе применения заместителя цианида. Цель исследований – разработка бесцианидной технологии извлечения золота из лежалых флотационных хвостов с применением методов интенсификации процесса выщелачивания. Проведён сравнительный анализ цианида, – самого эффективного на сегодняшний день растворителя золота, – с альтернативными нетоксичными реагентами, которые имеют большие перспективы применения на горных предприятиях. Изучен вещественный состав техногенного сырья. Разработана технология переработки лежалых флотационных хвостов на основе применения нетоксичных растворителей и методов интенсификации процесса выщелачивания золота. Проведено исследование на обогатимость на малой лабораторной пробе массой 2,0 кг. Экспериментально установлены оптимальные режимные технологические параметры тиомочевинного выщелачивания. В 3,87 раза (с 22,1% до 85,5%) увеличено извлечение золота в сравнении с классическим цианидным выщелачиванием благодаря синергетическому эффекту комбинации способов интенсификации процесса: технологии «Альбион», бинарной комплексообразующей системе (тиомочевина и глицин) в сернокислой среде, механическому перемешиванию и нагреву пульпы, применению сильных окислителей (озон и перекись водорода).

**Ключевые слова:** техногенные золотосодержащие отходы, экологощадящие технологии, интенсификация процесса выщелачивания, технология «Альбион», бесцианидная технология, тиомочевина, глицин, перекись водорода, озон.

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке проекта РНФ 22–17–00040 «Научное обоснование и разработка экологически чистых безотходных технологий переработки природного и техногенного минерального сырья» (2022–2023 гг.).

**Для цитирования:** Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К., Простакишин М. Ф. Бесцианидная технология извлечения золота с применением методов интенсификации процесса выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 328–344. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_101\_0\_328.

---

## Cyanide-free gold extraction technology using methods of intensification of the leaching process

L. V. Shumilova<sup>1</sup>, A. N. Khatkova<sup>1</sup>, K. K. Razmakhnin<sup>1</sup>, M. F. Prostakishin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Transbaikal State University, Chita, 672039, Russia, e-mail: rektorat@zabgu.ru

---

**Abstract:** Eco-sparing technologies of waste processing of mining enterprises will provide the possibility of compromise coexistence of two systems: man-nature, man-technology. The object of research is the Albion technology for processing stale gold-containing sulfide flotation tailings of a gold recovery plant based on the use of a cyanide substitute. The object of research is Albion technology for processing stale sulfide flotation tailings of a gold recovery plant based on the use of a cyanide substitute. A comparative analysis of cyanide, the most effective gold solvent to date, with alternative non-toxic reagents, which have great prospects for use in mining enterprises, has been carried out. The material composition of technogenic raw materials has been studied. A technology for processing stale flotation tailings based on the use of non-toxic solvents and methods for intensifying the gold leaching process has been developed. A study on the enrichment capacity was carried out on a small laboratory sample weighing 2.0 kg. Optimal regime technological parameters of thiourea leaching have been experimentally established. Gold extraction was increased by 3.87 times (from 22.1% to 85.5%) compared to its analogue – classical cyanide leaching, due to the synergistic effect of a combination of methods of process intensification: Albion technology, binary complexing system (thiourea and glycine) in a sulfuric acid medium, mechanical mixing and heating of the pulp, the use of strong oxidants (ozone and hydrogen peroxide).

**Key words:** technogenic gold-containing waste, environmentally friendly technologies, intensification of the leaching process, Albion technology, cyanide-free technology, thiourea, glycine, hydrogen peroxide, ozone.

**Acknowledgements:** the work was carried out with the support of the RNF project 22-17-00040 «Scientific substantiation and development of environmentally friendly waste-free technologies for processing natural and man-made mineral raw materials» (2022-2023).

**For citation:** Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K., Prostakishin M. F. Cyanide-free gold extraction technology using methods of intensification of the leaching process. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):328–344. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_101\_0\_328.

---

### Введение

Главные приоритеты развития горного дела — это создание и внедрение новых технологий освоения недр Земли и безотходной переработки минерального сырья. В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 в ближайшие 10–15 лет приоритетами научно-технологического развития РФ следует считать те направления, которые позволят создать технологии, являющиеся основой инновационного пути развития России и обеспечат возможность

компромиссного сосуществования двух систем: человек — природа, человек — технологии [1, с. 142; 2, с. 369].

Человеческая деятельность приводит к негативным для окружающей среды последствиям. Так, только в 2021 г. на планете Земля исчезло 5025488 га леса, 676.666 га почв потеряно из-за эрозии, выбросы CO<sub>2</sub> составили 35241811766 т, произошло опустынивание 11596108 га земель, выброшено 9462790 т токсичных химикатов и складировано огромное количество отходов. Только на терри-

тории Российской Федерации **образовалось** 8448,6 млн т отходов производства и потребления, большая часть из которых — это отходы горной отрасли, включая золотодобычу, причем в текущем году уровень образования отходов стал выше на 21,5%, чем в 2020 г. [3, с. 190; 4, р. 283].

В последние годы отмечается активный интерес учёных к переходу от классических технологий обогащения труднообогатимых золотосодержащих и комплексных золотосодержащих руд к технологиям выщелачивания благородных металлов различными альтернативными растворителями. Отходы переработки таких типов руд, как природное минеральное сырьё, являются упорными (тонкая — эмульсионная вкрапленность золота; наличие бинарных минералов золота и мышьяка, золота и железа, золота и меди, золота и сорбционно-активного органического углеродистого вещества) [5, с. 72; 6, р. 217].

В связи с ужесточением экологических требований возникает необходимость разработки экологощадящей бесцианидной технологии выщелачивания золота из отходов, соответствующей реализуемой государством политике по внедрению наилучших доступных технологий (НДТ). Это является актуальной научной задачей, требующей мобильного решения [7].

Объект исследований — технология «Альбион» для переработки лежалых сульфидных флотационных хвостов золотоизвлекательной фабрики на основе применения заменителя цианида.

**Цель исследований** — разработка бесцианидной технологии извлечения золота из лежалых флотационных хвостов с применением методов интенсификации процесса выщелачивания.

**Задачи исследований:** осуществить сравнительный анализ цианидной тех-

нологии выщелачивания с бесцианидными (с использованием различных нетоксичных растворителей золота) по ряду значимых показателей (преимущества и недостатки, значение pH процесса, извлечение золота в раствор, тип минерального сырья); выбрать перспективные нетоксичные растворители золота из перечня апробированных в лабораторных или/и производственных условиях; подобрать эффективные способы интенсификации процесса выщелачивания золота; разработать технологию переработки лежалых золотосодержащих флотационных хвостов с использованием экологощадящих растворителей золота и способов интенсификации процесса; провести экспериментальные исследования (тестирование) новой технологии на лабораторной пробе; изучить влияние технологических режимных параметров на извлечение золота; установить экспериментальным путём оптимальные условия выщелачивания золота.

### **Методы исследования**

В настоящее время известно до 40 видов растворителей золота. В качестве перспективных альтернативных заменителей цианида исследуются такие реагенты, как тиомочевина (тиокарбамид); тиосульфаты (серосодержащие нетоксичные соединения, применяемые в сельском хозяйстве в качестве удобрений); галоиды (хор, бром, йод); **органические соединения (гуматы и аминокислоты)**; CNLITE; YX500 и др. [8, с. 425; 9; 10, с. 181].

Эффективность процесса выщелачивания металлов (извлечение золота в раствор) в гетерогенной термодинамической системе (среде) зависит от типа минерального сырья, пригодного для переработки, и ряда значимых технологических показателей (pH,

крупность частиц, скорость и селективность процесса, удельный расход реагентов и окислителей) и факторов (регенерация реагента на стадии осаждения металла из раствора; возможность организации замкнутой схемы по растворителю; реологические свойства пульпы и т.д.) [11, с. 148;12, с. 461].

Следует отметить, что на выбор типа растворителя также оказывает влияние тип местности, где будет располагаться горное предприятие. Так, есть территории с большим объёмом скоплений горных отходов, которые не могут быть

отработаны цианированием из-за того, что они находятся в «чувствительной» местности (например, близко расположенные заповедники, рекреационные зоны) [13, с. 24].

Проведён сравнительный анализ преимуществ и недостатков цианида — самого эффективного на сегодняшний день растворителя золота с альтернативными нетоксичными реагентами, которые имеют перспективы применения на горных предприятиях (табл. 1) [14, с. 25; 15, с. 221; 16, с. 325; 17–18].

Таблица 1

**Сравнительный анализ преимуществ и недостатков цианида с альтернативными нетоксичными растворителями**

**Comparative analysis of advantages and disadvantages of cyanide with alternative non-toxic solvents**

Растворитель золота	Недостатки растворителя	Преимущества растворителей
Цианид (аналог или прототип)	Высокая токсичность реагента (категория — сильнодействующее ядовитое вещество, СДЯВ); возможность отрицательного воздействия на окружающую среду; неполнота растворения металлического серебра и вскрытия его сульфидных форм в рудах; невозможность переработки руд некоторых категорий; не до конца решена проблема разработки высокоэффективной и экологической схемы обезвреживания цианидных стоков	Высокая селективность, достаточная устойчивость цианидных комплексов золота; относительная дешевизна; производство цианистого натрия организовано в широком промышленном масштабе; не является дефицитным продуктом; наличие простых, хорошо отработанных схем переработки продуктивных золотосодержащих растворов
Тиомочевина (тиокарбамид)	Необходимость в использовании кислотостойкого оборудования; возможность разложения тиокарбамида за счет окисления; при высоком содержании кислотоёмких примесей (карбонатов и т.д.); процесс сорбции из растворов осложняется активированным углем, и переработка руд становится нерентабельной; высокая стоимость процесса (дороже цианида натрия на 25%); дефицитность растворителя	Нет необходимости в обезвреживании стоков и отвалов, т.к. растворитель имеет низкую токсичность; высокая скорость растворения металлов; возможность улучшения технологических показателей за счет комбинирования отдельных стадий выщелачивания; бессточная гидрометаллургическая технология за счет простой схемы регенерации растворителя

Окончание табл. 1

Растворитель золота	Недостатки растворителя	Преимущества растворителей
Хлорид	Использование кислотостойкой аппаратуры, что удорожает процесс переработки руд; большой расход реагента; сложный солевой состав продуктивных растворов; происходит выделение элементарного хлора; сложность переработки и утилизации растворов; создание на месте специальных станций хранения баллонного хлора; токсичность газа	Применяется система реагентов, которая состоит из кислоты (соляной или серной), соли, как правило, хлорсодержащей (хлорид натрия) и окислителя (гипохлорит калия или натрия, перманганат калия, диоксид марганца). В результате протекающей реакции образуется элементарный хлор, который является активным началом при растворении благородных металлов. Реагенты можно получать на месте производства работ; низкая стоимость реагентов и их доступность; скорость растворения золота выше в 13 раз; при небольшой крупности руды за счет высокой окислительной активности растворителя повышается извлечение золота и серебра
Тиосульфат	Повышенный расход реагента; образование сульфитов, сульфатов и полиатионатов	Меньшая токсичность; по селективности не уступает цианидам; возможность переработки руд, содержащих медь, мышьяк, сурьму и т.д., которые затрудняют переработку цианированием; реагенты доступны и имеют низкую стоимость; за счет легкой технологии приготовления возможно их получение на месте; применение полного оборота маточных растворов; выделение золота и серебра из продуктивных растворов по простым технологическим схемам
Йод	Дефицитность растворителя и его высокая стоимость; высокий расход растворителя; использование дорогой кислотостойкой аппаратуры при выщелачивании; низкая степень извлечения серебра; требуется тщательная промывка кеков после выщелачивания и выделения йода из сбросных растворов	При низких концентрациях растворитель нетоксичен; высокая степень извлечения золота.
Бактерии <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> и <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	Имеется ряд ограничений, обусловленных сложностью вещественного состава руд и концентратов (наличие углистых и органических включений); экстенсивность процесса; рентабельность только при относительно высоких содержаниях золота в исходном сырье	Увеличение извлечения золота; уменьшение капитальных и эксплуатационных затрат; простота технологической схемы; отсутствие высоких температур и давлений; экологическая безопасность, может заменить дорогостоящие способы переработки минерального сырья, такие, как обжиг и автоклавное выщелачивание

Кроме растворителей золота, представленных в табл. 1, практический интерес представляют также аминокислоты, как органические (бифункциональные) соединения ( $\text{NH}_2 - \text{R} - \text{COOH}$ ), в которых карбоксильная группа способна вступать в реакции с металлическим золотом. По комплексобразующей способности **аминокислоты** можно расположить в следующий ряд: гистидин > аспарагин > метионин > глицин, лейцин, серин, аланин, фенилаланин, триптофан > аргинин, лизин.

Методы выделения золота из хлорсодержащих растворов предложены Плаксиным И. Н. [16, с. 326]. Тиосульфат как малотоксичный растворитель, позволяет расширить по сравнению с цианированием сырьевую базу за счёт выщелачивания сырья, содержащего органический углерод, так как тиосульфатный комплекс золота не чувствителен к природной сорбционной активности и/или медным минералам, которые очень сложно вступают в процесс с выщелачивающим реагентом [17].

Результаты анализа ряда значимых показателей (значения pH, при которых эффективно протекает процесс выщелачивания; средние показатели извлечения золота в раствор; типы минерального сырья, применяемого для данного растворителя) представлены в табл. 2.

Серией экспериментальных исследований (Патент США № 6344068) [18] доказано, что извлечение золота тиосульфатным выщелачиванием с использованием дополнительных окислителей, таких как йод, бром, перекись водорода, может достичь значений в пределах 50–96%, однако объём проведённых исследований явно недостаточен.

Сравнительный анализ цианидной технологии на основе применения сильнодействующего ядовитого

вещества с альтернативными малотоксичными технологиями показал, что лучшими технологическими перспективами обладает вариант тиомочевинного (тиокарбамидного) извлечения благородных металлов. Однако большой проблемой является тот факт, что этот выщелачивающий реагент исследуется и экспериментально апробируется только для руд и золотосодержащих концентратов, и не применяется, и даже активно не исследуется, для техногенного сырья, что обуславливает необходимость дополнительных применений способов интенсификации.

Для повышения эффективности процесса выщелачивания металла из упорного минерального сырья применяются различные способы интенсификации, которые можно классифицировать на четыре группы: химические, биологические, физические, включая нетрадиционные, и комбинированные. Эти способы интенсификации могут применяться как каждый в отдельности, так и в комбинации друг с другом (рис. 1).

Например, возможна комбинация таких способов интенсификации, как физические (ультратонкое измельчение) и химические (окислительное выщелачивание золота при атмосферном давлении), которые в совокупности представляют собой *Альбион*-процесс.

Биологические способы интенсификации, представляют собой заимствованные у природы процессы, которые протекают по аналогичным моделям, только в недрах Земли. Благодаря развитию биотехнологии учёные начали заниматься разработкой новой химико-биологической идеологии в горном деле [19, с. 10; 20, р. 2900].

На основе синтеза искусственной среды можно создать благоприятные условия для метаболизма живого возобновляемого реагента — бактериальных клеток (колоний микроорганиз-

Таблица 2

**Сравнительный анализ альтернативных процессов выщелачивания**  
**Comparative analysis of alternative leaching processes**

Наименование процесса выщелачивания	pH процесса/ Извлечение золота в раствор, %	Тип минерального сырья, пригодный для переработки
Цианидное	10,5–11/74	Окисленные, смешанные типы руд и техногенное сырьё, за исключением углистых, сульфид-, мышьяк-, сурьмасодержащих, с «запечатанным» золотом в кварце, содержащие повышенные концентрации меди и железа
Хлоридное	2,0–4,0/70	Техногенные отходы, гравитационные и флотационные концентраты
Тиосульфатное, аммиачно-тиосульфатное и сульфитное	9,4–9,5/38	Упорные золотосодержащие руды со значительным содержанием марганца, меди, цинка, свинца и природного углерода
Тиомочевинное (тиокарбамидное)	pH = 2–4/90%	Золотосодержащие руды с включениями органического углерода, глинистыми минералами, соединениями мышьяка
Йодидное	pH = 1,0–1,5/85	Трудновскрываемое минеральное сырьё, продукты шлихового обогащения рыхлых золотосодержащих отложений («чёрные шлихи» или измельчённые породы)
Биовыщелачивание	pH = 2–2,5/90%	Упорное минеральное сырьё с нановключениями золота

мов) и получить новый энергетический дизайн (скачок электрохимического потенциала) в экстремальных условиях. На рис. 2 и 3 представлены результаты полупромышленных испытаний биотехнологии: извлечение золота из продуктов биоокисления концентратов, содержание углерода, содержание золота в продуктивном растворе [21].

Из вышепредставленных способов интенсификации процесса выщелачивания золота из упорного минерального сырья наибольший интерес с технологической точки зрения в данных исследованиях представляют несколько направлений: химические — оптимизация концентрации растворителя и химических составов, применение окислителей, проведение аэрации озонном; физические — механическое перемешивание минеральной пульпы,

термическое воздействие, сверхтонкое измельчение.

Первичные и вторичные эффекты при ультратонком измельчении возникают в связи с созданием напряжения в кристаллической решетке на молекулярном уровне, что сопровождается увеличением удельной поверхности сульфидных минералов и реакционной способности за счёт уменьшения энергии когезии.

Результаты количественного минералогического анализа лежалых флотационных хвостов показали наличие пирита, арсенопирита, магнетита, ильменита и др. Содержание кварца и полевого шпата достигает 48,75%. Полуколичественным спектральным анализом установлено присутствие в хвостах железа 10–15%, мышьяка 0,15%, свинца 0,01%, цинка 0,01%,



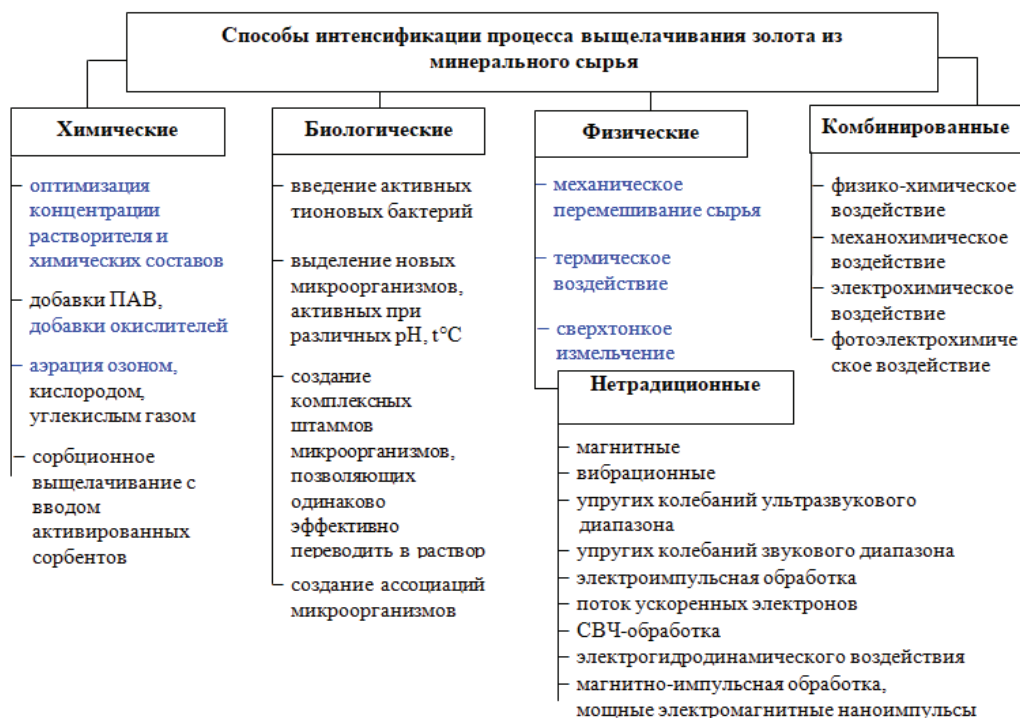


Рис. 1. Способы интенсификации процесса выщелачивания золота из минерального сырья

Fig. 1. Ways to intensify the process of leaching gold from mineral raw materials

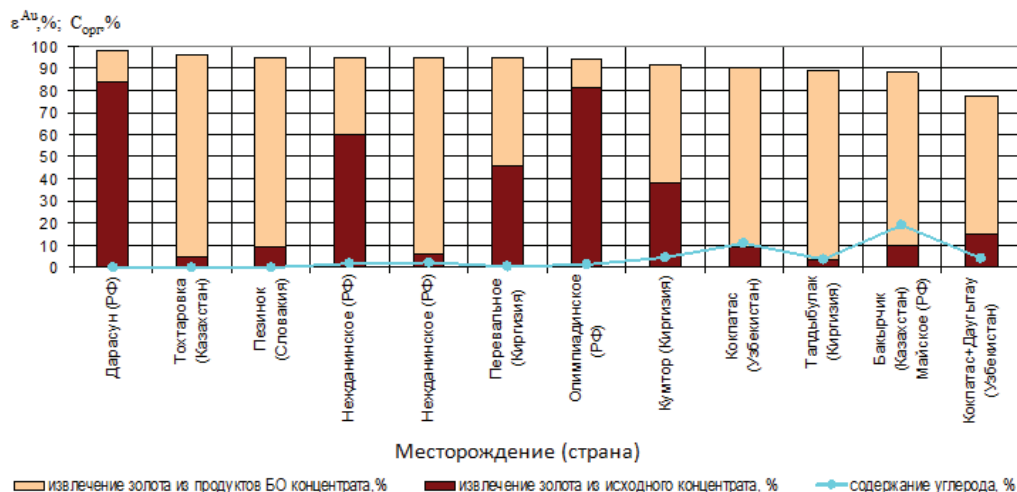


Рис. 2. Извлечение золота из продуктов биоокисления концентратов и содержание углерода в них (полупромышленные испытания биотехнологии)

Fig. 2. Extraction of gold from bio-oxidation products of concentrates and the carbon content in them (semi-industrial tests of biotechnology)



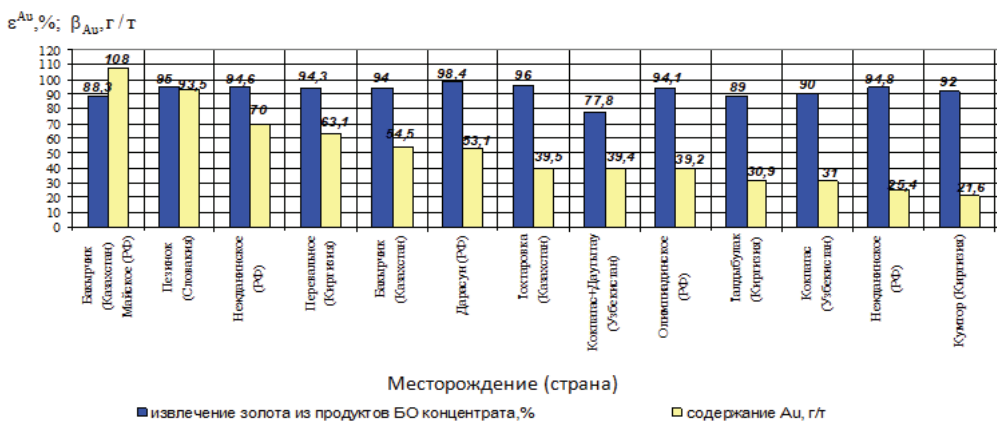


Рис. 3. Извлечение золота из продуктов био-окисления концентратов и содержание золота в продуктивном растворе (полупромышленные испытания биотехнологии)

Fig. 3. Extraction of gold from bio-oxidation products of concentrates and the gold content in the productive solution (semi-industrial biotechnology tests)

олова 0,0001%, меди 0,015% и др. При изучении гранулометрического состава техногенного сырья ситовым анализом установлено, что 74,37% фракции хвостов представлены классом минус 0,074 мм (рис. 4), из которых на данном этапе технологического процесса золото не извлекается и считается технологическими потерями. **Электронная микроскопия** позволила определять размер частиц инкапсулированного золота в сульфидные минералы. Крупность частиц составила 10 мкм. Это обуславливает необходимость доизмельчения техногенного сырья.

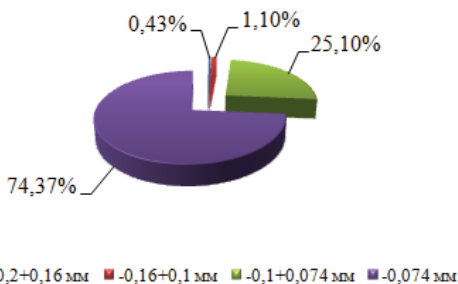


Рис. 4. Гранулометрический состав лежалых флотационных хвостов

Fig. 4. Granulometric composition of stale flotation tails

## Результаты

Разработана технология переработки лежалых флотационных хвостов на основе применения нетоксичных растворителей и комбинированных методов интенсификации процессов окисления сульфидных минералов и выщелачивания золота. Технологическая схема переработки представлена на рис. 5.

В лабораторных условиях на малой лабораторной пробе массой 2,0 кг проведено тестирование двухстадийной технологии выщелачивания золота из флотационных хвостов малотоксичными растворителями золота в присутствии сильных окислителей ( $O_3$ ,  $H_2O_2$ ). Перед выщелачиванием хвосты подвергались сверхтонкому измельчению в планетарной мельнице до тонины помола 10 мкм (*Альбион-процесс*).

Проведены экспериментальные исследования влияния длительности процесса выщелачивания, концентрации тиомочевины, концентрации серной кислоты, концентрации окислителей на извлечение золота с целью определения оптимальных технологических параметров. В процессе экс-

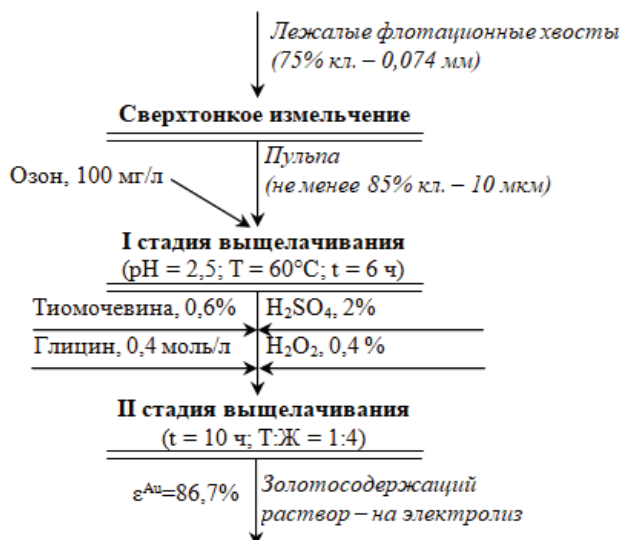


Рис. 5 Технологическая схема переработки лежалых флотационных хвостов на основе применения нетоксичных растворителей и методов интенсификации процесса выщелачивания золота

Fig. 5 Technological scheme of processing of stale flotation tailings based on the use of non-toxic solvents and methods of intensification of the gold leaching process

периментальных исследований апробирована новая комплексообразующая система, представленная тиомочевинной (тиокарбамидом) и аминокислотой (глицином).

При проведении серии опытов установлены следующие оптимальные условия. Сверхтонкое измельчение – 86% кл. 10 мкм; I стадия предварительного окислительного выщелачивания золота из пульпы сверхтонкого измельчения при атмосферном давлении в присутствии озона (концентрация смеси 100 мг/л); продолжительность – 6 ч; рН – 2,5; температура – 60°С; II стадия выщелачивания с применением бинарной комплексообразующей системы (тиокарбамид + глицин) в присутствии H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, соотношение Т:Ж = 1:4; концентрация тиомочевины – 0,6%, серной кислоты – 2,0%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – 0,4%, глицина – 0,4 моль/л; продолжительность выщелачивания – 10 ч (рис. 6–10).

В качестве примера представим некоторые зависимости. Зависимость извлечения золота от содержания класса минус 10 мкм показывает, что при значениях 65% (ε<sub>Au</sub> = 50%); 75% (ε<sub>Au</sub> = 62%); 86% (ε<sub>Au</sub> = 65,1%) – оптимальная тонина помола (рис. 6).

При изменении температуры пульпы от 10°С до 60 °С **извлечение золота в раствор увеличивается на 7,5% (от 65,2% до 72,7%)**, рис. 7.

Концентрация тиомочевины также оказывает влияние на эффективность процесса выщелачивания. При изменении концентрации тиомочевины от 0,1% до 0,5% **извлечение золота в раствор тиомочевины увеличивается на 1,4% (72,9% до 74,3%)**, рис. 8.

Экспериментальными исследованиями установлена зависимость извлечения золота от концентрации глицина. При концентрации глицина 0,1 моль/л ε<sub>Au</sub> = 75,1%, при увеличении концентрации глицина до 0,4 моль/л извле-

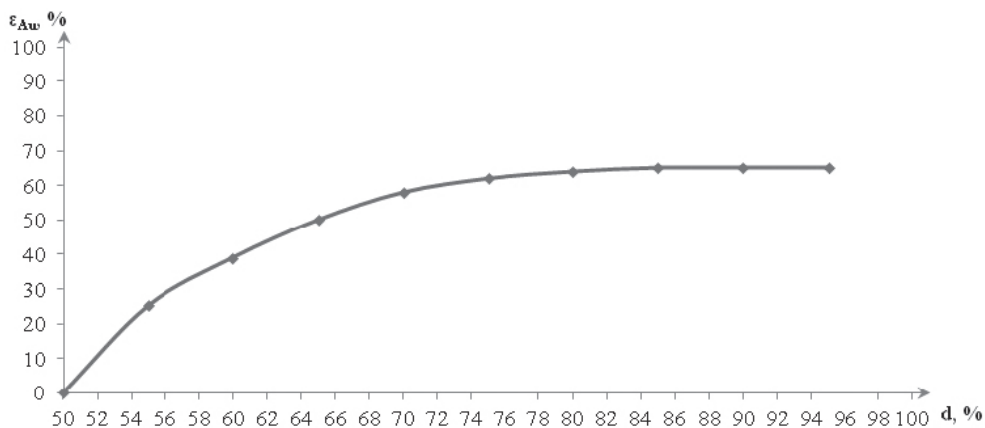


Рис. 6. Зависимость извлечения золота от содержания класса -10 мкм  
 Fig. 6. Dependence of gold extraction on the content of class -10 microns

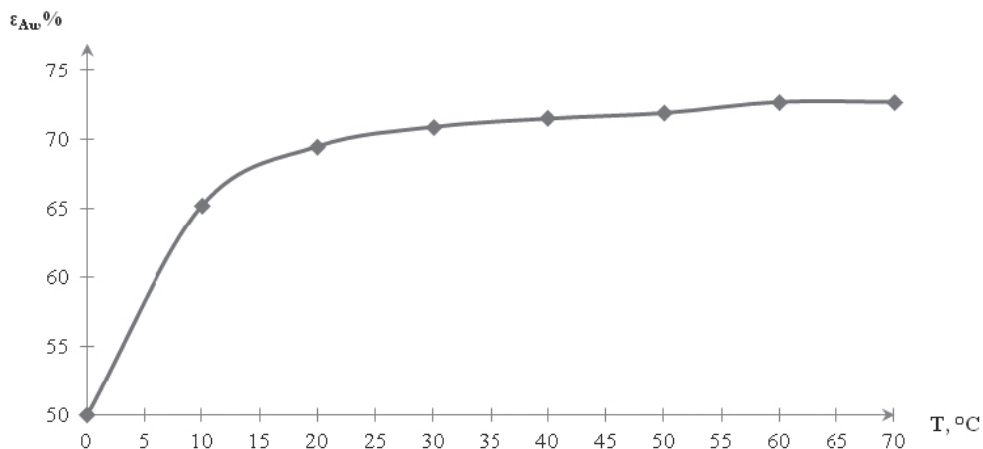


Рис. 7. Зависимость извлечения золота от температуры пульпы  
 Fig. 7. Dependence of gold extraction on pulp temperature

чение золота увеличивается до 80,5% (рис. 9).

Перекись водорода применяется в качестве активного окислителя сульфидных минералов. Увеличение концентрации  $H_2O_2$  в диапазоне значений от 0,05% до 0,4% приводит к увеличению извлечения золота от 75,1% до 85,5%, то есть на 13,85% (рис. 10).

Общие результаты применения разных способов интенсификации про-

цесса выщелачивания, полученные экспериментальным путём, представлены на рис. 11.

Достигнуты следующие показатели извлечения золота: 72,7% (I стадия выщелачивания) нагрев пульпы до температуры 60°C, механическое перемешивание, окислитель — озон; 74,3% — выщелачивающий реагент тиомочевина +  $H_2SO_4$ , механическое перемешивание; 80,5% — выщелачива-

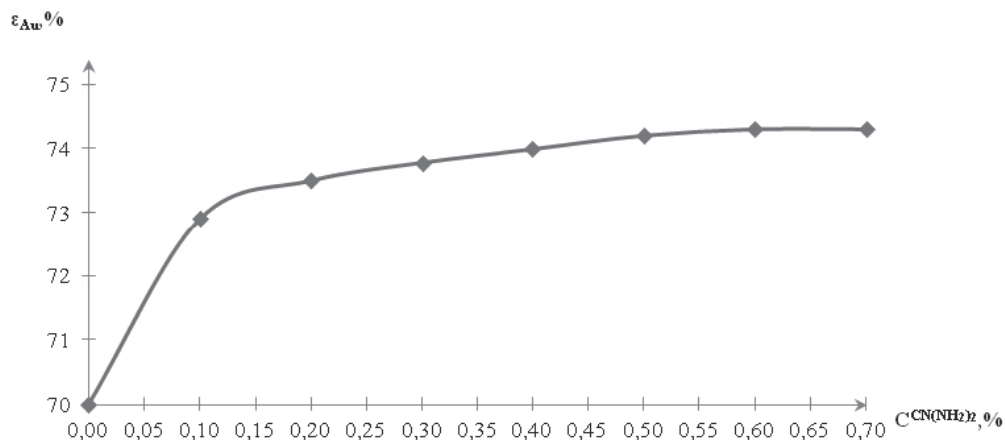


Рис. 8. Зависимость извлечения золота от концентрации тиомочевины  
 Fig. 8. Dependence of gold extraction on thiourea concentration

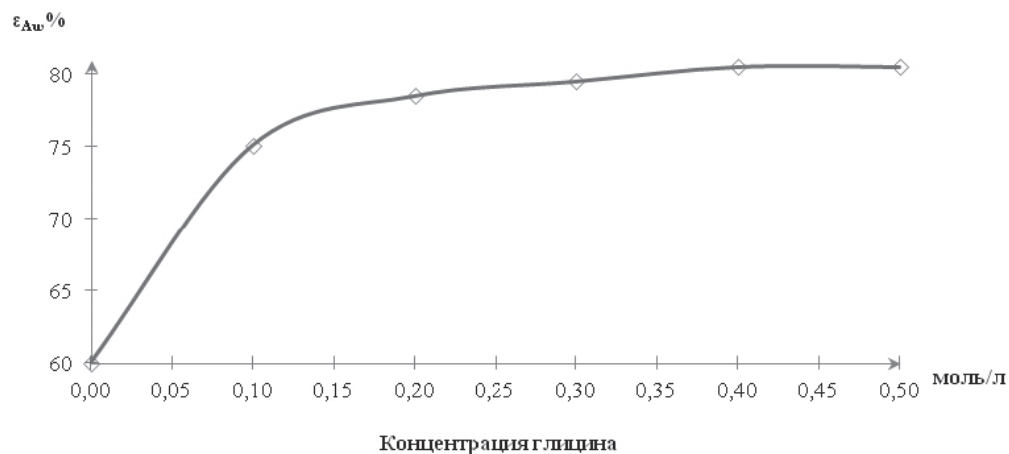


Рис. 9. Зависимость извлечения золота от концентрации глицина  
 Fig. 9. Dependence of gold extraction on glycine concentration

ющие реагенты тиомочевина и глицин +  $H_2SO_4$ , механическое перемешивание; 85,5% (II стадия выщелачивания) выщелачивающие реагенты тиомочевина и глицин +  $H_2SO_4$ , механическое перемешивание, окислитель перекись водорода.

Благодаря синергетическому эффекту комбинации способов интенсификации процессов окисления сульфидных мине-

ралов и двухстадийному выщелачиванию благородного металла из техногенного сырья получено извлечение золота 85,5%, что в 3,87 раз больше по сравнению с аналогом классического цианидного выщелачивания ( $\epsilon_{Au} = 22,1\%$ ).

### Заключение

Разработана бесцианидная технология извлечения золота из лежалых суль-

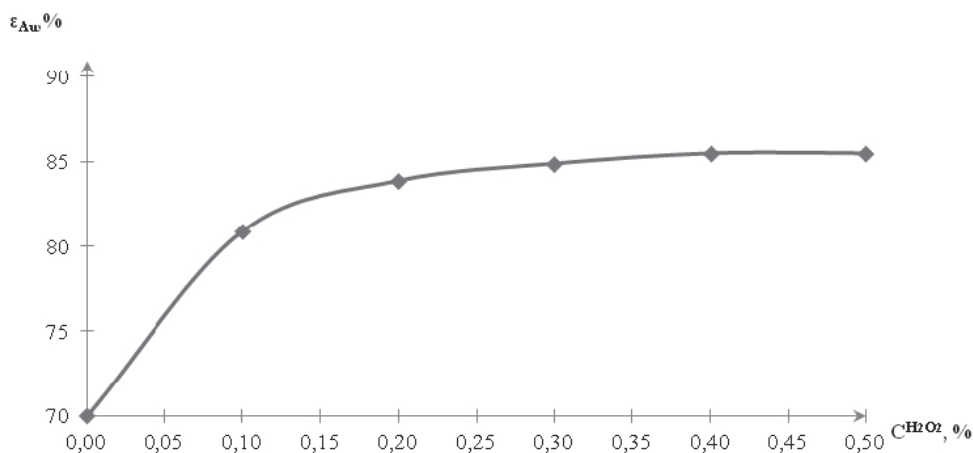


Рис. 10. Зависимость извлечения золота от концентрации перекиси водорода  
 Fig. 10. Dependence of gold extraction on the concentration of hydrogen peroxide

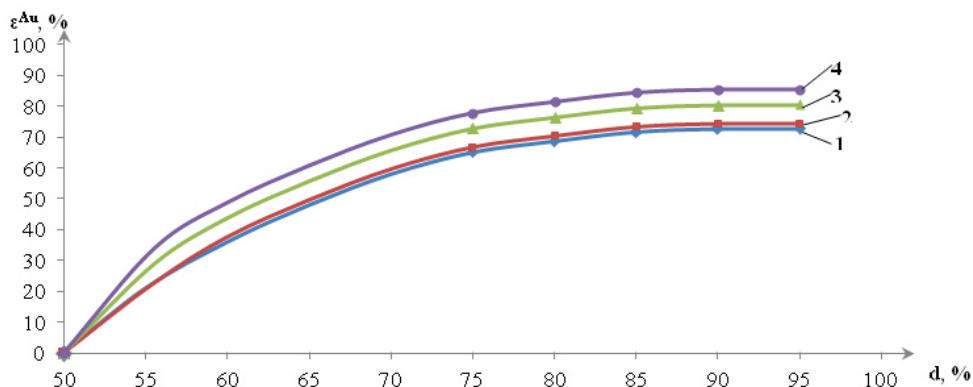


Рис. 11. Зависимость извлечения золота от содержания класса минус 10 мкм (d) при использовании интенсифицирующих факторов: 1 – сверхтонкое измельчение, нагрев пульпы, механическое перемешивание, озон; 2 – выщелачивающий реагент тиомочевина + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, механическое перемешивание; 3 – выщелачивающие реагенты тиомочевина + глицин + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, механическое перемешивание; 4 – выщелачивающие реагенты тиомочевина + глицин + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, механическое перемешивание, перекись водорода  
 Fig.11. Dependence of gold extraction on the content of class minus 10 microns (d) when using intensifying factors: 1 – ultrafine grinding, pulp heating, mechanical mixing, ozone; 2 – leaching reagent thiourea + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, mechanical stirring; 3 – leaching reagents thiourea + glycine + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, mechanical stirring; 4 – leaching reagents thiourea + glycine + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, mechanical stirring, hydrogen peroxide

фидных флотационных хвостов с применением нетоксичных растворителей (тиомочевина и глицин) **в присутствии сильных окислителей**, таких как озон и перекись водорода. Комби-

нированием методов интенсификации процесса выщелачивания золота, включая технологию «Альбион» (Albion Process), механическое перемешивание и нагрев пульпы, можно эффективно

перерабатывать отходы горных предприятий, оптимизировать взаимодействие (коэволюцию) природной и техногенной систем и сократить ореолы загрязнения экосистем токсичными отходами золотодобычи.

Установлены оптимальные условия двухстадиального выщелачивания золота и режимные технологические параметры, позволяющие извлечь 85,5% золота.

### **Вклад авторов**

*Шумилова Л. В.* — разработка идеи исследования; анализ разработанности темы; непосредственное руководство

экспериментальными исследованиями; анализ полученных результатов; разработка технологической схемы; формулировка выводов; подбор библиографии, написание текста.

*Хатькова А. Н.* — общее руководство работой.

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

*Простакишин М. Ф.* — исполнитель экспериментальных работ; подготовка отчёта проведения экспериментальных исследований.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Абрамов Б. Н.* Оценка токсичности хвостохранилищ рудных место-рождений Забайкальского края // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11. — С. 136–145. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_136.

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.

3. *Шумилова Л. В.* Гравитационно-электрохимический способ извлечения золота из техногенных россыпей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. № 5 (специальный выпуск 19). — С. 186–192.

4. *Rosenfeld C. E., Chaney R. L., Martinez C. E.* Soil geochemical factors regulate Cd accumulation by metal hyperaccumulating *Noccaea caerulescens* (J. Presl & C. Presl) FK Mey in field-contaminated soils // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 616. P. 279–287.

5. *Макаров В. А., Самородский П. Н.* Актуальные вопросы оценки и освоения техногенных месторождений золота // Золото и технологии. — декабрь 2018 г. — № 4 (42) — С.72–90.

6. *Velasquez-Yevenes L., Torres D., Toro N.* Leaching of chalcopyrite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods // Hydrometallurgy. 2018. № 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.

8. *Дементьев В. Е., Войлошников Г. И., Федоров Ю. О.* Разработка ОА «ИРГИРЕД-МЕТ» по извлечению ценных компонентов из техногенного сырья // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 4. — С. 418–427.

9. *Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K.* A transitional perspective of global and regional mineral material flows // Resources, Conservation and Recycling. 2019, vol. 140, pp. 91–101. DOI:10.1016/J.RESCONREC.2018.09.014.

10. *Чантурия В. А., Самусев А. Л., Миненко В. Г.* Интенсификация химико-электрохимического выщелачивания золота из упорного минерального сырья // Физико-техни-

ческие проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 5. — С. 154–164. DOI: 10.15372/FTPPI20200518.

11. *Самихов Ш. Р., Зинченко З. А.* Исследования процесса тиосульфатного выщелачивания золотых мышьяксодержащих руд месторождения Чоре // Доклады Академии Наук Республики Таджикистан. 2014. Т. 57. №2. С. 145–150.

12. *Воробьев А. Е., Досаев В. М., Чекушина Е. В., Чекушина Т. В., Щелкин А. А.* Выщелачивание золота с применением альтернативных растворителей // Естественные и технические науки. 2015. № 6. С. 456–461.

13. *Лодейщиков В. В., Панченко А. Ф., Хмельникацкая О. Д.* Тиокарбамидное выщелачивание золотых и серебряных руд. Гидрометаллургия золота. М.: Наука, 1980. С. 26–35.

14. *Радомская В. И., Радомский С. М., Павлова Л. М.* Условие применения технологии тиокарбамидного выщелачивания // Научно-технический журнал «Георесурсы». 2013. №5 (55). С. 22–27.

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. <https://doi.org/10.31897/rmi.2020.2.218>.

16. *Плаксин И. Н.* Metallurgy of noble metals. М.: Metallurgizdat, 1958. 366 с.

17. *Zehra Yigit Avdan, Gordana Kaplan, Serdar Goncu, Ugur Avdan.* 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. *Simon N. Topp, Tamlin M. Pavelsky, Daniel Jensen, Marc Simard and Matthew R. V. Ross.* Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: moving towards multidisciplinary applications // Water. 2020, 12, 169. DOI: 10.3390/w12010169.

19. *Булаев А. Г., Бодуэн А. Я., Украинцев И. В.* Биоокисление упорного золотосодержащего концентрата руды месторождения Бестобе // Обогащение руд. 2019. №6. С. 8–13. DOI: 10.17580/or.2019.06.02.

20. *Saburbayeva L. Yu., Boduen A. Ya., Yu P. S., Ukraintsev I. V.* Study of pressure oxidation and bacterial leaching efficiency as a method of refractory gold concentrate breakdown. IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress, 2019, pp. 2911–2921.

21. *Shumilova L. V.* Scientific substantiation of the innovative technology of gold leaching (working, testing in conditions of Transbaikalie) // Palmarium Academic Publishing / Germany. — 2014. — 362 p. **MIAB**

## REFERENCES

1. Abramov B. N. Assessment of the toxicity of tailings dumps of ore deposits of the Trans-Baikal Territory. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021. no. 11. pp. 136–145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_136.

2. Nicolae Ilias, Emilia Dunca, Iulian Offenberg, George Teseleanu, Ionut Predoiu Elements of geoecological environmental audit and accounting. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3–1):359–371. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_31\_0\_359.

3. Shumilova L. V. Gravitational-electrochemical method of gold extraction from technogenic placers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015. no. 5 (special issue 19). pp. 186–192. [In Russ].

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. pp. 279–287.



5. Makarov V. A., Samorodsky P. N. Actual issues of assessment and development of technogenic gold deposits. *Gold and Technology*. December 2018. no. 4 (42) pp.72–90. [In Russ].
6. Velasquez-Yevenes L., Torres D., Toro N. Leaching of chalcopyrite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods. *Hydrometallurgy*. 2018. no. 181. pp. 215–220. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.10.004.
7. Sekisov A. G., Lavrov A. YU., Rasskazova A. V. Fotokhimicheskiye i elektrokhimicheskiye protsessy v geotekhnologii (Photochemical and electrochemical processes in geotechnology). Chita: ZabGU, 2019, 306 p. [In Russ].
8. Dementiev V. E., Voiloshnikov G. I., Fedorov Yu. O. Development of the OA “IRGIREDMET” for the extraction of valuable components from technogenic raw materials. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2020. no. 4. pp. 418–427. [In Russ].
9. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019, vol. 140, pp. 91–101. DOI:10.1016/J.RESCONREC.2018.09.014.
10. Chanturia V. A., Samusev A. L., Minenko V. G. Stimulation of chemical and electrochemical leaching of gold from rebellious minerals. *Journal of Mining Science*. 2020. –T. 56. № 5. С. 818–827. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20200518.
11. Samikhov Sh. R., Zinchenko Z. A., Bobomurodov O. M. Study of conditions and development of technology for thi-ourea leaching of gold and silver from the Chore deposit ore. Re-ports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, 2013, vol. 56, no. 4, pp. 318–324. [In Russ].
12. Vorobyov A. E., Dosaev V. M., Chekushina E. V., Shchelkin A. A., Chekushina T. V. Leaching of gold using alterna-tive solvents. *Natural and technical sciences*, 2015, no. 6, pp. 456–461. [In Russ].
13. Lodeishchikov V. V., Panchenko A. F., Khmelnikatskaya O. D. Thiocarbamide leaching of gold and silver ores. *Hydrometallurgy of gold*. Moscow: Science, 1980, pp. 26–35. [In Russ].
14. Radomskaya V. I., Radomsky S. M., Pavlova L. M. Application condition of thiocarbamide leaching technology. *Georesursy*, 2013, no. 5 (55), pp. 22–27. [In Russ].
15. Fedotov P. K., Senchenko A. Ye., Fedotov K. V., Burdonov A. Ye. Studies of enrichment of sulfide and oxidized ores of gold deposits of the Aldan shield. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 242, p. 218–227. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.218.
16. Plaksin I. N. *Metallurgy of noble metals*. Moscow: Metallurgical publishing, 1958, 366 p. [In Russ].
17. Zehra Yigit Avdan, Gordana Kaplan, Serdar Goncu, Ugur Avdan. 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. Simon N. Topp, Tamlin M. Pavelsky, Daniel Jensen, Marc Simard and Matthew R. V. Ross. Research trends in the use of remote nsing for inland water quality science: moving towards multidisciplinary applications. *Water*. 2020, 12, 169. doi:10.3390/w12010169.
19. Bulaev A. G., Baudouin A. Ya., Ukraintsev I. V. Biooxidation of persistent gold-bearing ore concentrate of the Bestobe deposit. *Obogashchenie Rud*. 2019. no. 6. pp. 8–13. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2019.06.02.
20. Saburbayeva L. Yu., Boduen A. Ya., Yu P. S., Ukraintsev I. V. Study of pressure oxidation and bacterial leaching efficiency as a method of refractory gold concentrate breakdown. *IMPC 2018 29th International Mineral Processing Congress*, 2019, pp. 2911–2921.
21. Shumilova L. V. Scientific substantiation of the innovative technology of gold leaching (working, testing in conditions of Transbaikalie). *Palmarium Academic Publishing*. Germany. 2014. 362 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Шумилова Лидия Владимировна*<sup>1</sup> — докт. техн. наук, доцент, профессор,  
<https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>,  
email: shumilovalv@mail.ru;

*Хаткова Алиса Николаевна*<sup>1</sup> — докт. техн. наук, доцент, профессор,  
профессор, <https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>,  
e-mail: alisa1965.65@mail.ru;

*Размахнин Константин Константинович*<sup>1</sup> — докт. техн. наук, доцент, доцент,  
доцент, <https://orcid.org/0000-0003-2944-7642>,  
e-mail: igdranchita@mail.ru;

*Простакишин Михаил Федорович*<sup>1</sup> — исполнитель проекта РНФ 22-17-00040,  
e-mail: m.prostakishin@gmail.com;

<sup>1</sup> Забайкальский государственный университет, улица Александрo-Заводская, д.30,  
672039, г. Чита, Россия.

**Для контактов:** *Шумилова Л. В.*, e-mail: shumilovalv@mail.ru.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Shumilova L. V.*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), associate Professor, Professor,  
<https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>,  
e-mail: shumilovalv@mail.ru.

*Khatkova A. N.*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), professor, professor,  
<https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>,  
e-mail: alisa1965.65@mail.ru;

*Razmakhnin K. K.*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor  
<https://orcid.org/0000-0003-2944-7642>,  
e-mail: igdranchita@mail.ru;

*Prostakishin M. F.*<sup>1</sup>, executor of the RNF project 22-17-00040,  
e-mail: m.prostakishin@gmail.com.

<sup>1</sup> Transbaikal State University, 30, Str. Aleksandro-Zavodskaya, 672039, Chita, Russia.

Получена редакцией 02.08.2023; получена после рецензии 15.08.2023 ; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 02.08.2023; received after the review 15.08.2023 ; accepted for printing 10.10.2023.

