

МЕТАЛЛУРГИЯ



Научная статья

УДК 669.213.4

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-688-696>

Выбор выщелачивающей системы для извлечения золота из руды месторождения «Быньговское»

Владимир Геннадьевич Лобанов^{1✉}, Раиса Энверовна Хабибулина²Ольга Борисовна Колмачихина³, Ольга Юрьевна Маковская⁴¹⁻⁴Уральский федеральный университет им. первого Президента России

Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

¹lobanov-vl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6450-8434>²raisa.khabibulina@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2764-4434>³o.b.kolmachikhina@urfu.ru⁴o.i.makovskaia@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5794-1475>

Резюме. Цель работы – формирование научных основ экологически чистой технологии извлечения золота из минерального сырья. В качестве альтернативы традиционному цианиду предложены хлорсодержащие производные изоциануровой кислоты, относящейся к разряду органических кислот ($C_3H_3N_3O_3$). Данный реагент в изучаемом процессе сочетает роль окислителя пролонгированного действия и комплексообразователя, в роли которого служит образующийся ион Cl^- . В исследованиях использована методика вращающегося диска. Результаты экспериментов оценивали измерением содержания золота в растворах с использованием атомно-адсорбционного метода. Изучены теоретические особенности растворения золота с использованием предлагаемого реагента. С целью оценки применимости выявленных закономерностей для практического использования оценены сравнительные показатели выщелачивания золота из руды месторождения «Быньговское» (Свердловская область) предложенным реагентом, цианидом и китайским заменителем цианида «Цикада». Изучена зависимость скорости растворения золотого диска от температуры, концентраций выщелачивающего реагента и соляной кислоты. В опытах с дисковым образцом установлена экспоненциальная зависимость скорости от концентрации изучаемого реагента, при этом максимальная интенсивность процесса достигается при достижении концентрации выше 50 г/дм^3 . Оптимальный уровень кислотности – $0,3\text{--}0,4 \text{ г-ион/дм}^3$ соляной кислоты. Установлено, что повышение температуры позволяет ускорить растворение, но технологически это не оправдано. Скорость растворения золотого диска в оптимальных условиях достигает $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ г-ион/(см}^2\text{-мин)}$, что примерно в 100 раз выше, чем при растворении цианистыми растворами в традиционных режимах. При выщелачивании золота из руды в сопоставимых условиях достигнута близкая степень извлечения золота растворами цианидов и хлорсодержащих производных изоциануровой кислоты, при использовании растворов «Цикады» данный показатель в 2 раза ниже. В целом по результатам исследований установлены высокая скорость растворения золота при использовании предложенного реагента и технологическая возможность выщелачивания золота из руды при использовании данного экологически чистого реагента.

Ключевые слова: золото, растворение, органический хлор, производные изоциануровой кислоты, руда, выщелачивание

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке за счет средств, составляющих доход от доверительного управления целевым капиталом на развитие УрФУ, сформированным при участии ООО «УГМК-Холдинг».

Для цитирования: Лобанов В. Г., Хабибулина Р. Э., Колмачихина О. Б., Маковская О. Ю. Выбор выщелачивающей системы для извлечения золота из руды месторождения «Быньговское» // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 688–696. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-688-696>.

Selection of a leaching system for the extraction of gold from the ore of the Byn'govskoye deposit

Vladimir G. Lobanov^{1✉}, Raisa E. Khabibulina²,
Olga B. Kolmachikhina³, Olga Yu. Makovskaia⁴

¹⁻⁴Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

¹lobanov-vl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6450-8434>

²raisa.khabibulina@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2764-4434>

³o.b.kolmachikhina@urfu.ru

⁴o.i.makovskaia@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5794-1475>

Abstract. A theoretical substantiation of an environmentally friendly technology for extracting gold from mineral raw materials is presented. In terms of an alternative to conventional cyanide, the authors propose chlorine-bearing derivatives of organic isocyanuric acid ($C_3H_3N_3O_3$). In the studied process, this reagent combines the roles of a long-acting oxidant and complexing agent due to the resulting Cl^- ion. For experimental purposes, the rotating disc technique was applied. Experimental results were evaluated by measuring the concentration of gold in solutions using the atomic adsorption method. The theoretical characteristics of gold dissolution using the proposed reagent were studied. In order to evaluate the applicability of the revealed regularities for practical purposes, comparative indicators for leaching gold from the ore of the Byn'govskoye deposit (Sverdlovsk Oblast) using the proposed reagent, cyanide and CYCAD cyanide substitute (China) were evaluated. The dependence of the gold disc dissolution rate on temperature, as well as leaching reagent and hydrochloric acid concentrations, were studied. In disc sample experiments, the exponential dependence of the dissolution rate on the concentration of the studied reagent was established. In this case, the maximum intensity of the process is achieved at a concentration higher than 50 g/dm^3 . The optimum acidity level comprises $0.3\text{--}0.4 \text{ g ion/dm}^3$ of hydrochloric acid. Despite an increase in temperature being shown to accelerate the dissolution process, this appears to be technologically unjustified. Under optimal conditions, the gold disc dissolution rate reaches $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ g ion/(cm}^2 \cdot \text{min)}$, which is approximately one hundred times higher than during the dissolution by the cyanic solutions in conventional modes. Close gold extraction values were achieved in the solutions of cyanides and chlorine-bearing derivatives of isocyanuric acid during the leaching of gold from the ore under the comparable conditions. For CYCAD solutions, the same indicator is two times lower. The results of the performed studies demonstrate the high dissolution rate of gold using the proposed reagent along with the technological possibility of leaching gold from ores using this environmentally friendly reagent.

Keywords: gold, dissolution, organic chlorine, isocyanuric acid derivatives, ore, leaching

Funding: The research was funded by means of the trust income from the target capital for the development of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin formed with the participation of LLC Ural Mining and Metallurgical Company Holding (UMMC-Holding).

For citation: Lobanov V. G., Khabibulina R. E., Kolmachikhina O. B., Makovskaia O. Yu. Selection of a leaching system for the extraction of gold from the ore of the Byn'govskoye deposit. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):688-696. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-688-696>.

ВВЕДЕНИЕ

Благородные металлы крайне устойчивы к химическому воздействию, растворяются только в том случае, если раствор содержит окислитель и лиганд, связывающий золото в прочный комплекс. Сочетание лиганда и окислителя, обеспечивающих растворение ценных компонентов, называется выщелачивающей системой.

Выбор оптимальной выщелачивающей

системы определяется рациональным сочетанием ряда факторов, прежде всего экономических, технологических, безопасностью для окружающей среды и персонала при практическом использовании.

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ РАССМАТРИВАЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ

Для выщелачивания золота и серебра из минерального и вторичного сырья известно и

в разной мере апробировано порядка 40 выщелачивающих систем, способных переводить золото и серебро в растворимое состояние. Однако лишь немногие из них заслуживают серьезного рассмотрения с точки зрения возможности промышленного использования в гидрометаллургии благородных металлов. В числе наиболее изученных систем лиганд/окислитель: тиомочевина, серная кислота [1, 2] и тиоцианат [3] с ионами трехвалентного железа; сульфит, тиосульфат натрия [3–5], сульфат меди (II) и аммиак в сочетании с кислородом [6]; бромат, бромид натрия и бром, йодид и йод [7, 8], раствор серы в известковом молоке, раствор роданида и перманганат [9], дитиооксамид или замещенный дитиооксамид и др. До изобретения цианистого метода для переработки руд и концентратов широко использовали кислые и щелочные растворы, содержащие хлор-ион как комплексообразователь и активный хлор, способный окислить золото. В качестве окислителя использовали газообразный хлор, гипохлориты [10] и перхлораты щелочных металлов. Последний вариант принято называть жидкофазное хлорирование [11, 12].

Разновидностью хлорирования является технология, включающая предварительное закисление руды разбавленным раствором соляной кислоты и последующее выщелачивание золота солянокислыми растворами, содержащими галит и молекулярный хлор [13], поверхностно-активное вещество и гипохлорит [14], соляную кислоту, гипохлориты натрия, калия или кальция, водный раствор хлорноватистой кислоты [15, 16].

В практической металлургии для извлечения золота из руд и концентратов наиболее широко используется система, представляющая собой сочетание цианида натрия (калия) в качестве лиганда с воздухом (кислородом) в качестве окислителя. Термодинамической основой предпочтительного применения цианидов является исключительная прочность образующихся комплексов. Даже сравнительно низкий окислительный потенциал кислорода в водных растворах при атмосферном

давлении достаточен для окисления и перевода золота в цианистый комплекс [17, 18].

Цианиды, несмотря на исключительную токсичность, на сегодняшний день являются основным реагентом для выщелачивания золота из минерального сырья. Вместе с тем, специалисты всего мира находятся в поиске выщелачивающей системы, альтернативной цианидам.

Примерно 10–15 лет назад китайские производители впервые представили несколько вариантов реагента, которые по совокупности свойств были полным аналогом цианидов – Flotent GoldSC, EarthGold 570, Goldix 570 и некоторые другие. Реагенты подобного типа заявляются как недорогие, экологически безопасные химические вещества, обеспечивающие высокое извлечение золота, с возможностью использовать в обороте для кучного или чанового выщелачивания.

Другой альтернативный и весьма перспективный способ выщелачивания золота основан на использовании соединений органического хлора, в частности дихлоризоцианурата натрия дигидрата. Данный реагент относят к хлорсодержащей производной циануровой кислоты ($C_3H_3N_3O_3$), относящейся к разряду органических кислот [19]. Важнейшей особенностью хлоризоциануратов является их экологическая безопасность. Реагенты подобного типа относятся к III классу опасности химических веществ (СТО 14175996-202009), что является показателем предельно низкой токсикологической категории реагента. При растворении хлоризоциануратов в воде выделяется активный хлор, который и обеспечивает окислительную функцию реагента. В воде обсуждаемый реагент растворяется медленно, и эта особенность обуславливает пролонгацию окислительных свойств хлоризоциануратов, возможность синхронизировать растворение золота и генерацию окислителя, обеспечивает уверенное регулирование и поддержание требуемого окислительно-восстановительного потенциала выщелачивающей системы в широком диапазоне pH на требуемом уровне [20].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

На основании результатов предварительных тестовых опытов установлено, что извлечение золота из частной пробы окисленной золотосодержащей руды с использованием производных изоциануровой кислоты сопоставимо с данным показателем при цианистом выщелачивании. Ожидаемыми преимуществами выщелачивания золота соединениями органического хлора метода могут стать экологичность реагента, высокие скорость и степень извлечения золота.

С использованием методики вращающегося диска диаметром 5 мм изучены принципиальные особенности растворения золота чистотой 99,9% с использованием изоциануровой кислоты (ИЦК). По окончании опытов раствор анализировали методом атомной адсорбции (новАА300). Длительность всех опытов выбиралась с учетом необходимости достижения уверенно определяемой концентрации золота в растворе и не превышала 5–10 мин. В опытах с растворением дискового образца необходимое количество окислителя (ИЦК) предварительно растворяли в заданном объеме воды и только после этого погружали диск в раствор. При заведомо избыточной концентрации ИЦК наблюдалось пересыщение раствора хлором, пузырьки которого выделялись из раствора. В качестве других

реагентов в опытах использовали цианид натрия, соляную кислоту категории «техническая».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важнейшим параметром любой технологии по извлечению золота является скорость растворения. На кинетику процесса влияет прежде всего концентрация комплексообразователя и окислителя. На предварительном этапе установлено, что интенсивное растворение золота в растворах ИЦК протекает в слабоокислом растворе. На рис. 1 представлена зависимость скорости растворения золотого диска от концентрации окислителя. Экспоненциальный характер кривой предположительно определяется увеличением непродуктивного визуально наблюдаемого выделения хлора в атмосферу при повышенных концентрациях ИЦК в растворе. Диапазон рациональной дозировки, обеспечивающей максимально возможное вовлечение ИЦК в растворение золота, соответствует 5–10 г/дм³.

На первом этапе были выбраны заведомо завышенные концентрации реагентов и целью дальнейших опытов являлось изучение зависимости скорости растворения золота от других параметров процесса (рис. 2). В частности, соляная кислота не только обеспечивает кислый характер среды, но и является

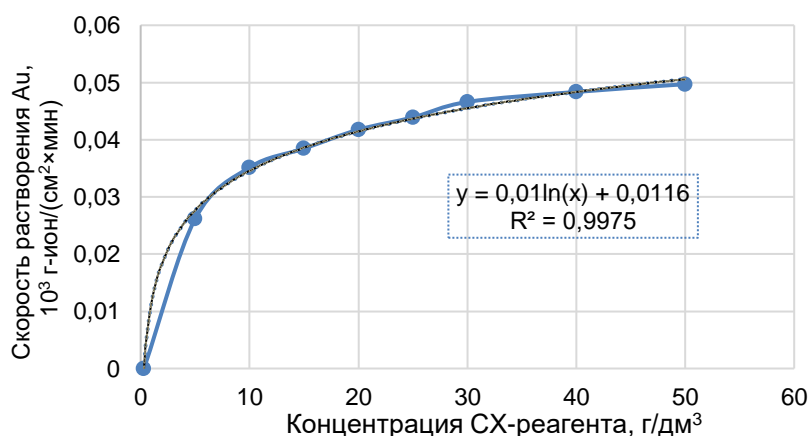


Рис. 1. Зависимость скорости растворения золота от концентрации окислителя в растворе
(условия: 25°C; 300 об/мин; $C_{HCl} = 1,4$ г-ион/дм³)

Fig. 1. Gold dissolution rate vs oxidizer concentration in solution (conditions: 25°C; 300 rpm; $C_{HCl} = 1.4$ g-ion/dm³)

источником ионов хлора, выступающего в данном случае в качестве комплексообразователя.

Из приведенных результатов следует, что максимально достигаемая скорость растворения золота наблюдается при концентрации соляной кислоты 0,3–0,5 г-ион/дм³ и достигает $0,5 \cdot 10^{-3}$ г-ион/(см²×мин). Для сравнения, скорость растворения золота в цианистом растворе, оцененная И. А. Каковским, примерно в 100 раз меньше. Уменьшение скорости растворения золота в области повышенной кислотности объясняется интенсификацией разложения ИЦК.

При оценке влияния температуры на скорость растворения золота использовали термостатированный лабораторный стакан. Результаты приведены на рис. 3.

С увеличением температуры скорость растворения золота возрастает линейно. При температурах 50°C и выше визуально наблюдаемое непродуктивное разложение окислителя интенсифицируется.

С учетом результатов, полученных выше, в работе проведено сравнение основных показателей цианирования в традиционном варианте с показателями альтернативных реагентов, в частности, с одним из китайских

заменителей цианида, получившего у российских пользователей название «Золотая ци-када», и растворами органического хлора – ИЦК.

Объектом исследований являлась окисленная глинистая золотосодержащая руда Быньговская (Средний Урал) крупностью 1,5 мм. Основными породообразующими минералами всех проб являются кварц, оксиды железа и алюминия, слюды. Химический состав материала представлен в табл. 2.

Содержание золота по данным пробирного анализа составляет 2,5 г/т.

Опыты по выщелачиванию золота проводили с использованием бутылочного агитатора при Ж:Т = 3:1 при комнатной температуре. Состав выщелачивающих растворов:

- ИЦК – 5 г/дм³, соляной кислоты – 0,4 г-ион/дм³;
- цианида натрия – 2 г/дм³, pH = 10,7;
- «цикада» – 2 г/дм³, pH = 10,9.

Представительные навески сухой руды массой 100 г засыпали в пластиковые бутылки объемом 0,5 дм³, заливали выщелачивающий раствор. Реагент ИЦК загружали в бутылки в порошкообразном виде. Бутылки герметично закрывали, закрепляли на траверсе и включали вращение. Скорость вращения траверсы

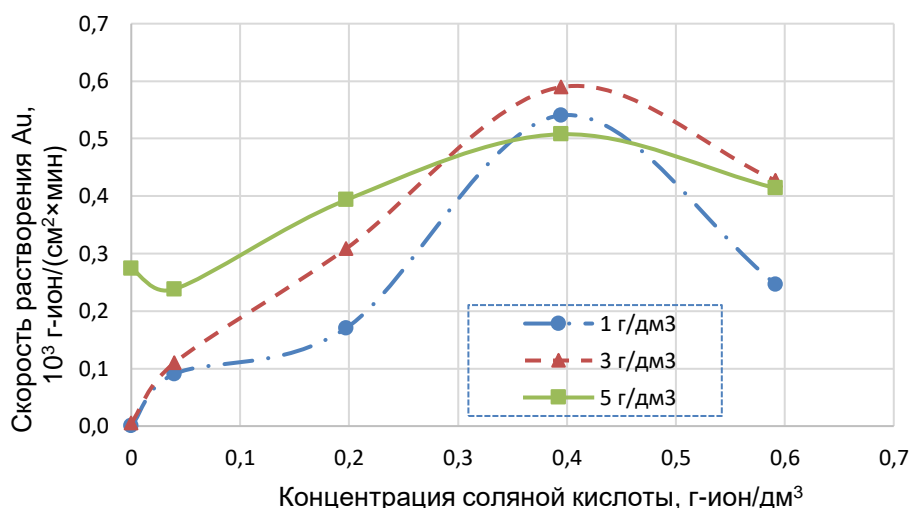


Рис. 2. Влияние концентрации соляной кислоты на скорость растворения золота (условия: 25°C, 300 об/мин, концентрация ИЦК 1; 3; 5 г/дм³)

Fig. 2. Effect of hydrochloric acid concentration on gold dissolution rate (conditions: 25°C, 300 rpm, concentration of target-controlled infusion (TCI) – 1; 3; 5 g/dm³)

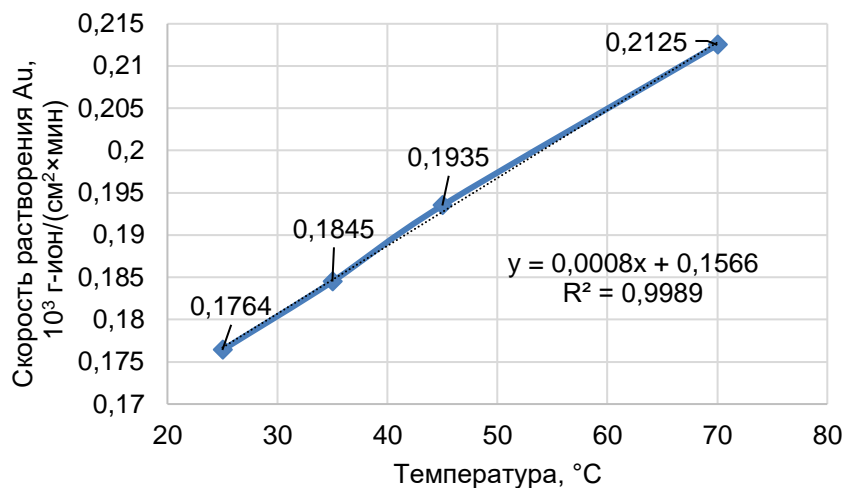


Рис. 3. Зависимость скорости растворения Au от температуры
 (условия: 300 об/мин, $C_{\text{ицк}} - 1 \text{ г/дм}^3$, $C_{\text{Cl}} - 0,4 \text{ г-ион/дм}^3$)

Fig. 3. Gold dissolution rate vs temperature (conditions: 300 rpm, $C_{\text{TCI}} - 1 \text{ g/dm}^3$, $C_{\text{Cl}} - 0.4 \text{ g-ion/dm}^3$)

составила 30–40 об/мин. Через 10, 24, 48 ч по ходу опытов отбирали пробы растворов объемом 20 см³, в которых методом атомной адсорбции определяли концентрацию золота.

По истечении суток извлечение золота в раствор дало следующие показатели: цианированием – 71,6%; «цикадой» – 28%; ИЦК –

78,4% (рис. 4).

Примечательно, что за первый час выщелачивания концентрация золота в растворе при использовании цианида составила 0,52 г/т, а при использовании ИЦК в три раза больше – 1,7 г/т.

Таблица 2. Химический состав исследуемого материала
 Table 2. Chemical composition of the material under investigation

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe _{общ.}
Содержание, %	51–55	18–21	0,9–1	0,2–0,3	0,15–0,2	5–6	2,8–3,0	11–12

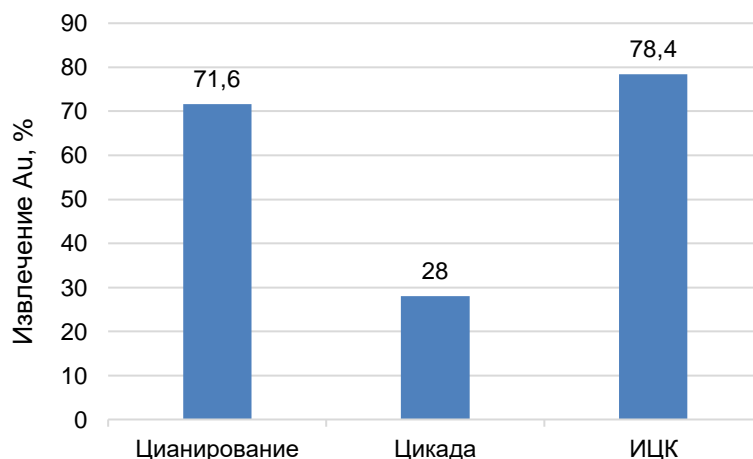


Рис. 4. Результаты опытов по выщелачиванию золота из руды (условия: 25 °С, продолжительность 24 ч, $C_{\text{циан}} = 2 \text{ г/дм}^3$; $C_{\text{цикада}} = 2 \text{ г/дм}^3$; $C_{\text{ицк}} = 5 \text{ г/дм}^3$ и $C_{\text{HCl}} - 0,4 \text{ г-ион/дм}^3$, Ж:Т = 3:1)

Fig. 4. Results of experiments on leaching gold from ore (conditions: 25 °C, 24 hours duration, $C_{\text{cyan}} = 2 \text{ g/dm}^3$; $C_{\text{cicada}} = 2 \text{ g/dm}^3$; $C_{\text{TCI}} = 5 \text{ g/dm}^3$ and $C_{\text{HCl}} - 0.4 \text{ g-ion/dm}^3$, W:T = 3:1)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Поиск альтернативы цианидам для выщелачивания золота из минерального сырья чрезвычайно актуален.

2. Изучено влияние состава раствора и температуры на скорость растворения дискового образца золота экологически чистым реагентом – хлорсодержащими растворами ИЦК.

3. Скорость растворения золота при температуре 20°C и концентрации ИЦК 15 г/дм³

достигает $0,5 \cdot 10^{-3}$ г-ион/(см²×мин), что в 100 раз выше, чем при цианировании.

4. При сопоставимых условиях извлечение золота из руды при использовании цианида и ИЦК более чем в 2 раза выше по сравнению с китайским реагентом «цикада».

5. Растворы органического хлора обеспечивают конкурентоспособные показатели скорости и степени выщелачивания золота из руды в сопоставлении с растворами цианидов.

Список источников

1. Дмитриенко В. П., Дмитриенко И. В., Макасеев Ю. Н., Сидоров М. Е. Тиомочевинное выщелачивание золота из гравитационного концентрата // Золото и технологии. 2019. № 1. С. 82–85.
2. Whitehead J. A., Zhang J., Cluskey A., Lawrance G. A. Comparative leaching of a sulfidic gold ore in ionic liquid and aqueous acid with thiourea and halides using Fe(III) or HSO₅⁻ oxidant // Hydrometallurgy. 2009. Vol. 98. Iss. 3-4. P. 276–280. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.05.012>.
3. 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. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0324>.
4. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – a review // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 115-116. P. 30–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>.
5. Grosse A. C., Dicoski G. W., Shaw M. J., Haddad P. R. Leaching and recovery of gold using ammoniacal thiosulfate leach liquors (a review) // Hydrometallurgy. 2003. Vol. 69. Iss. 1-3. P. 1–21. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00169-X](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00169-X).
6. Gökelma M., Birich A., Stopic S., Friedrich B. A Review on alternative gold recovery reagents to cyanide // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. 2016. Vol. 4. Iss. 8. P. 8–17. <https://doi.org/10.4236/msce.2016.48002>.
7. Tein I., Ziyadanogullari R. The effect of sulfurization process on flotation of copper ore containing gold and silver // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2008. Vol. 7. No. 3. P. 193–202. <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2008.73015>.
8. Hodouin D., Makni S. Real-time reconciliation of mineral processing plant data using bilinear material balance equations coupled to empirical dynamic models // International Journal of Mineral Processing. 1996. Vol. 48. Iss. 3-4. P. 245–264. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(96\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(96)00025-7).
9. Ширяева В. В. Разработка технологического режима извлечения золота из комплексных золотоурановых руд с использованием роданидных растворов методом кучного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 7. С. 403–412.
10. Baghalha M. Leaching of base gold-bearing ore with chloride-hypochlorite solutions // International Journal of Mineral Processing. 2007. Vol. 82. Iss. 4. P. 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.001>.
11. Olteanu A. F., Dobre T., Panturu E., Radu A. D., Akcil A. Experimental process analysis and mathematical modeling for selective gold leaching from slag through wet chlorination // Hydrometallurgy. 2014. Vol. 144-145. P. 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.02.011>.
12. Guo Xue-Yi, Liu Zuo-Wei, Tian Qing-Hua, Li Dong, Zhang Lei. Gold extraction from Carlin-type concentrate by a novel environmentally friendly lixiviant // Hydrometallurgy. 2022. Vol. 211. P. 105884. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105884>.
13. Yannopoulos J. C. The extractive metallurgy of gold. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 273 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8425-0>.
14. Neto I. F. F., Soares H. M. V. M. Simple and near-zero-waste processing for recycling gold at a high purity level from waste printed circuit boards // Waste Management. 2021. Vol. 135. P. 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.025>.
15. Ahtainen R., Lundström M. Cyanide-free gold leaching in exceptionally mild chloride solutions // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 234. P. 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.197>.
16. Hasab M. G., Rashchi F. Chloride-hypochlorite leaching and hydrochloric acid washing in multi-stages for extraction of gold from a refractory concentrate // Hydrometallurgy. 2014. Vol. 142. P. 56–59. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.11.015>.
17. Barani K., Kogani Y., Nazarian F. Leaching of complex gold ore using a cyanide-glycine solution // Minerals Engineering. 2022. Vol. 180. P. 107475.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107475>.

18. Самихов Ш. Р., Зинченко З. А. Изучение кинетики процесса цианирования золота и серебра из руды месторождения Мосариф // Наука и инновация. 2014. № 1. С. 88–92.

19. Хабибулина Р. Э., Лобанов В. Г. Экологически чистая технология выщелачивания золота из техногенного сырья // Актуальные проблемы развития технических наук: сб. ст. участников XXIV Областного конкурса науч.-иссл. работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». Екатеринбург: Уральский

федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2021. С. 31–35.

20. Хабибулина Р. Э., Лобанов В. Г., Колмачихина О. Б., Коновалов М. В., Дружинин Д. И. Извлечение золота из концентратов экологически чистым способом // Современные технологии производства цветных металлов: матер. Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию С. С. Набойченко (г. Екатеринбург, 24 марта 2022 г.). Екатеринбург: Изд-во Уральского университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. С. 192–196.

References

1. Dmitrienko V. P., Dmitrienko I. V., Makaseev Yu. N., Sidorov M. E. Thiourea leaching of gold from gravity concentrate. *Zoloto i tekhnologii*. 2019;1:82-85. (In Russ.).

2. Whitehead J. A., Zhang J., Cluskey A., Lawrance G. A. Comparative leaching of a sulfidic gold ore in ionic liquid and aqueous acid with thiourea and halides using Fe(III) or HSO₅⁻ oxidant. *Hydrometallurgy*. 2009;98(3-4):276-280. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.05.012>.

3. Kholov K. I., Sharifboev N. T., Samikhov S. R., Dzhurakulov S. R. Gold leaching by various solutions, cyanide substitutes and their future prospects. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2021;14(4):433-447. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0324>.

4. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – a review. *Hydrometallurgy*. 2012;115-116:30-51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>.

5. Grosse A. C., Dicinoski G. W., Shaw M. J., Haddad P. R. Leaching and recovery of gold using ammoniacal thiosulfate leach liquors (a review). *Hydrometallurgy*. 2003;69(1-3):1-21. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00169-X](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00169-X).

6. Göknelma M., Birich A., Stopic S., Friedrich B. A Review on alternative gold recovery reagents to cyanide. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2016;4(8):8-17. <https://doi.org/10.4236/msce.2016.48002>.

7. Tein I., Ziyadanogullari R. The effect of sulfurization process on flotation of copper ore containing gold and silver. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2008;7(3):193-202. <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2008.73015>.

8. Hodouin D., Makni S. Real-time reconciliation of mineral processing plant data using bilinear material balance equations coupled to empirical dynamic models. *International Journal of Mineral Processing*. 1996;48(3-4):245-264. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(96\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(96)00025-7).

9. Shiryayeva V. V. Development of a technological regime for gold recovery from complex gold-uranium ores by heap leaching using rhodanide solutions. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and Analytical Bulletin*. 2012;7:403-412. (In Russ.).

10. Baghalha M. Leaching of base gold-bearing ore with chloride-hypochlorite solutions. *International Journal of Mineral Processing*. 2007;82(4):178-186.

<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.001>.

11. Olteanu A. F., Dobre T., Panturu E., Radu A. D., Akcil A. Experimental process analysis and mathematical modeling for selective gold leaching from slag through wet chlorination. *Hydrometallurgy*. 2014;144-145:170-185. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.02.011>.

12. Guo Xue-Yi, Liu Zuo-Wei, Tian Qing-Hua, Li Dong, Zhang Lei. Gold extraction from Carlin-type concentrate by a novel environmentally friendly lixiviant. *Hydrometallurgy*. 2022;211:105884. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105884>.

13. Yannopoulos J. C. *The extractive metallurgy of gold*. New York: Van Nostrand Reinhold; 1991, 273 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8425-0>.

14. Neto I. F. F., Soares H. M. V. M. Simple and near-zero-waste processing for recycling gold at a high purity level from waste printed circuit boards. *Waste Management*. 2021;135:90-97. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.025>.

15. Ahtiaienena R., Lundström M. Cyanide-free gold leaching in exceptionally mild chloride solutions. *Journal of Cleaner Production*. 2019;234:9-17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.197>.

16. Hasab M. G., Rashchi F. Chloride–hypochlorite leaching and hydrochloric acid washing in multi-stages for extraction of gold from a refractory concentrate. *Hydrometallurgy*. 2014;142:56-59. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.11.015>.

17. Barani K., Kogani Y., Nazarian F. Leaching of complex gold ore using a cyanide-glycine solution. *Minerals Engineering*. 2022;180:107475. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107475>.

18. Samikhov S. R. Studying kinetic of gold and silver cyanidation from the Mosarif deposit ores. *Nauka i innovaciya = Science and Innovation*. 2014;1:88-92. (In Russ.).

19. Khabibulina R. E., Lobanov V. G. Environmentally friendly technology of gold leaching from anthropogenic raw materials. In: *Aktual'nye problemy razvitiya tekhnicheskikh nauk: sbornik statej uchastnikov XXIV Oblastnogo konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot "Nauchnyj Olimp" po napravleniyu "Tekhnicheskie nauki" = Topical problems of engineering sciences development: collected articles of the participants of the 24th Regional competition*

of research works "Scientific Olympus" in the direction of "Engineering Sciences". Ekaterinburg: Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; 2021, p. 31-35. (In Russ.).

20. Khabibulina R. E., Lobanov V. G., Kolmachikhina O. B., Konovalov M. V., Druzhinin D. I. Environmentally friendly extraction of gold from concentrates. *Sovremennye tekhnologii proizvodstva cvetnyh metallov: materialy*

Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 80-letiyu S. S. Nabojchenko = Modern production technologies for non-ferrous metals: materials of the International scientific conference dedicated to the 80th anniversary of S. S. Naboychenko (24 March 2022, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; 2022, p. 192-196. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лобанов Владимир Геннадьевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия

Хабибулина Раиса Энверовна,

аспирант,
Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия

Колмачихина Ольга Борисовна,

кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия

Маковская Ольга Юрьевна,

кандидат технических наук, доцент кафедры
металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 11.11.2022; принята к публикации 20.12.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir G. Lobanov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia

Raisa E. Khabibulina,

Postgraduate Student,
Ural Federal University named after the first President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia

Olga B. Kolmachikhina,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the first President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia

Olga Yu. Makovskaia,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the first President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 10.10.2022; approved after reviewing 11.11.2022; accepted for publication 20.12.2022.