

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ТЕХНОГЕННЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ ОБРАЗОВАНИЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

А. Г. Секисов¹, А. В. Рассказова¹, А. В. Лаврик¹

¹ Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация: Актуальна проблема большого количества отходов горного производства. На примере хвостов золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ) Илинского рудника, расположенного в Дальневосточном федеральном округе (ДФО), показаны одновременно ценность техногенного сырья в качестве источника золота и его опасность в качестве носителя токсикантов. Оба фактора указывают на необходимость его повторной переработки и обезвреживания. В связи с низкими содержаниями золота в хвостах ЗИФ Илинского рудника рационально применение геотехнологического методов кучного и скважинного выщелачивания. Был проведен модельный эксперимент по перколяционному выщелачиванию в лабораторной установке. Процесс выщелачивания включал три стадии: предокисления электро-фото активированными растворами; диффузионного внутрипорового выщелачивания; активного орошения и перехода золото-цианистых комплексов из внутрипорового пространства в поверхностную пленочную воду. По результатам эксперимента извлечение золота за 20 суток составило 82 %, причем наибольший рост извлечения наблюдался до 16 суток. Процесс характеризуется быстрым протеканием в сравнении со стандартной длительностью процессов перколяционного выщелачивания, а также высокими результатами извлечения. В процессах цианирования наряду с растворением золота и серебра протекают процессы перехода ртути в продуктивные растворы, что обеспечивает демеркуризацию. Геотехнологическое тестирование, моделирующее процессы кучного выщелачивания, продемонстрировало эффективность доизвлечения золота и снижения содержания ртути методом перколяционного выщелачивания.

Ключевые слова: техногенное минеральное сырье, техногенные месторождения, золото, токсикант, ртуть, кучное выщелачивание, перколяционное выщелачивание, электро-фото активация, рабочие растворы, извлечение, демеркуризация.

Для цитирования: Секисов А. Г., Рассказова А. В., Лаврик А. В. Применение методов геотехнологии при переработке техногенных золотосодержащих образований Дальневосточного федерального округа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 55–61. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_55.

Application of geotechnological methods for the processing of secondary gold-bearing mineral resources of the Far Eastern federal district

A. G. Sekisov¹, A. V. Rasskazova¹, A. V. Lavrik¹

¹ Mining Institute, Far-East Branch of RAS, Khabarovsk, Russia

Abstract: the problem of a large amount of mining waste is urgent. Tailings from the Ilin mine gold processing plant is a common example. This object is located in the Far Eastern Federal District (FEFD). It is valuable as a gold-bearing secondary mineral raw material and it is a hazard carrier of toxicants. It is necessary to recycle and neutralize these secondary mineral raw materials. It is rational to use geotechnological methods of heap and borehole leaching since low gold content in the tailings of the Ilin gold processing plant. A model experiment was carried out on column leaching in the laboratory setup. The leaching process included three stages: pre-oxidation with electro-photo-activated solutions; diffusion intra-pore leaching; active irrigation and leaching of gold-cyanide complexes on the surface. According to the results of the experiment, the gold recovery was 82% in 20 days, and the highest increase in extraction was observed up to 16 days. The process is characterized by a fast kinetics in comparison with the standard duration of percolation leaching processes, as well as high recovery results. In the gold-cyanide process (GCP), the cyanide anions act to solubilize the gold and silver present in the ore. However, mercury is also solubilized in the process. Geotechnological testing simulating heap leaching processes has demonstrated the efficiency of additional gold recovery and mercury reduction by column leaching.

Key words: secondary mineral raw materials, secondary mineral deposits, gold, toxicant, mercury, heap leaching, column leaching, electro-photo activation, leaching solutions, extraction, demercurization.

For citation: Sekisov A. G., Rasskazova A. V., Lavrik A. V. Application of geotechnological methods for the processing of secondary gold-bearing mineral resources of the Far Eastern federal district. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):55–61. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_55.

Введение

Большие запасы заскладированных отходов переработки руд в хвостохранилищах бывшего ЗИФ Илинского рудника, расположенного в Дальневосточном федеральном округе (ДФО), содержат и полезные, и токсичные компоненты, что позволяет отнести их, по современным классификациям, к техногенным месторождениям [1].

Обоснование технических, технологических и экономических возможностей для переработки хвостов ЗИФ является актуальной задачей [2]. Отходами ЗИФ заняты большие территории, являющиеся постоянно действующим источником техногенного загрязнения окружающей среды, содержащими токсиканты, что только обостряет актуальность их повторной переработки и обезвреживания [2]. Определение распределения тяжелых металлов в окружающей среде необходимо для прогнозирования их подвиж-

ности и биодоступности [3]. На протяжении ряда лет при переработке руд Илинского месторождения использовалась амальгамация, что влечет за собой повышенные содержания ртути в хвостах обогащения. При переработке данного техногенного материала важно учесть необходимость демеркуризации хвостохранилища [4]. Реагентная обработка, в частности, хлоридами, позволяет снизить уровень ртути до допустимых значений [5]. Экстракция окислителями — также перспективное направление демеркуризации [6]. Ртутное загрязнение является одним из наиболее токсичных видов техногенного загрязнения, создающих серьезные экологические проблемы [7].

Учитывая относительно низкие остаточные содержания золота в хвостах обогащения Илинского месторождения, рационально рассмотреть возможность кучного выщелачивания золота из данного техногенного сырья [8].

Технологическая схема КВ золото-содержащих руд и материалов достаточно проста, и состоит из следующих операций:

- поставка руды (исходного материала);
- подготовка исходного материала, рудоподготовка, включая агломерацию;
- подготовка площадки КВ;
- отсыпка штабеля;
- орошение штабеля выщелачивающим раствором;
- обустройство системы сбора и хранения продуктивных и маточных (оборотных) растворов;
- цикл извлечения металлов;
- охрана среды и обезвреживание штабеля с рекультивацией полигона КВ.

Основные типы используемых при *кучном выщелачивании руд*:

- окисленные руды с рассеянным золотом;
- сульфидные руды, в которых золото не ассоциировано с сульфидными минералами;
- руды жильных или пластовых месторождений, содержащие тонкие частицы золота с высоким отношением их площади поверхности к массе.

При переработке других источников сырья, указанных выше, информация должна быть дополнена сведениями о гранулометрическом составе, о содержании влаги в исходном сырье, о степени окисленности руды. При положительном решении вопроса о пригодности данной руды к отработке способом КВ (которая устанавливается путем лабораторных и опытных работ) осуществляется горная добыча и складирование поступающей руды.

Наиболее благоприятными для организации КВ золота цианированием являются условия, когда руда:

- успешно выщелачивается цианидом;
- содержит крайне мелкие и плоские частицы золота;

- приурочена к пористой и проницаемой среде;

- не содержит углистые или другие поглощающие извлекаемый металл составляющие, которые вызывают преждевременную адсорбцию или осаждение растворенных ценных компонентов;
- относительно свободна от «цианидидов», которые потребляют цианид или влияют на реакцию растворения;
- не содержит тонкие частицы и глины, которые препятствуют равномерной перколяции растворов. В противном случае требуется предварительная агломерация.

- не содержит кислотообразующих составляющих, которые вызывают повышенный расход цианида и щелочи [9].

В данном геотехнологическом методе извлечения ценных компонентов из бедного, забалансового и техногенного сырья принята минимальная крупность куска условно равна 5 мм. Для среднезернистых и тонкодисперсных отвальных хвостов ЗИФ необходимо применять окомкование или сочетание орошения минеральной массы (без ее переэкскавации) с поверхности воблерами или предпочтительно эмиттерами, с периодической дополнительной подачей выщелачивающих растворов через закачные скважины, пробуренные в зонах с повышенным содержанием илесто-глинистой фракции хвостохранилища. Использование этих технических решений необходимо для обеспечения приемлемой фильтруемости штабеля кучного выщелачивания.

Измельченное техногенное минеральное сырье, находящееся в хвостохранилище, может быть наиболее экономично разработано методами скважинного выщелачивания. Применение комбинированных систем разработки месторождений позволит избежать дополнительных расходов на выемку, окомкование и сооружение штабеля куч-

ного выщелачивания. Перспективной представляется разработка комбинированной геотехнологии, включающей кучное выщелачивание забалансового сырья и скважинного выщелачивания техногенных отвалов отработанных хвостов Илинского месторождения.

Материалы исследования

Формы нахождения золота в минеральном веществе Илинского хвостохранилища разнообразны. Обнаруживается тонкораспыленное субмикроскопическое свободное золото; значительная часть золота, в том числе и тонкодисперсного, химически связанного, заключена в частично окисленном пирите и оксидах-гидроксидах железа, переотложенного совместно с золотом на поверхности частиц кварца. Не исключено также присутствие золота в составе мелких включений техногенных амальгам. Присутствует свободное золото, которое обнаруживается в мелкообломочном кварцево-карбонатном материале, прожилках. Содержание золота в разрезе хвостохранилища существенно снижается с глубиной (от 1,1–1,7 г/т в поверхностном интервале 0,25–0,5 м до 0,35–0,5 г/т в припочвенной части). По гранулометрическому составу хвосты ЗИФ представлены преимущественно мелко и среднезернистой фракциями (0,25–1,5 мм). По результатам пробирно-атомно-абсорбционного анализа содержание золота в хвостах составило 1,16–1,33 г/т. Ртуть имеет тенденцию к миграции в нижние слои хвостохранилища; содержание ртути в пробах, отобранных из поверхностной части хвостов, составляет 80 мг/т.

Методы исследования

Выщелачивание лежалых хвостов амальгамации Илинского рудника проведено в лабораторном перколяторе

в три стадии. Перколяционное выщелачивание является моделью процессов, протекающих при кучном выщелачивании в штабеле. На первой стадии проведено окисление и доокисление железосодержащих минералов-концентраторов золота в материале пробы активным пероксидно-карбонатным раствором, приготовленным в фотоэлектрохимическом реакторе [10]. Проба в перколяторе пропитывалась окисляющим раствором до полного насыщения и выдерживалась 5 сут. Для полной пропитки раствор подавался снизу-вверх.

1. На второй стадии в перколятор добавили раствор цианида натрия высокой концентрации. Пропитанная комплексообразователем проба выдерживалась 5 сут для более полного протекания процессов диффузионного выщелачивания с переводом золотоцианидных комплексных анионов в поверхностную пленку воды, а затем и во внутрипоровое и межзерновое пространство минеральной массы.

2. На третьей стадии производилось орошение минеральной массы водой. При этом образующийся раствор в процессе своего перемещения смешивается с продуктивным раствором межзернового пространства, что способствует появлению концентрационного градиента между поровой жидкостью и межзерновым раствором, соответственно, обеспечивая переход сформированных на предшествующей стадии золотоцианидных комплексов из области с их большей концентрацией в область с меньшей концентрацией, т. е. из внутрипорового пространства минералов в формируемый движущийся рабочий раствор.

Продуктивные растворы, содержащие золотоцианидные комплексы, анализировались на золото методом атомной абсорбции. Продолжительность выщелачивания — 20 сут. Общая продолжительность эксперимента, включающая про-

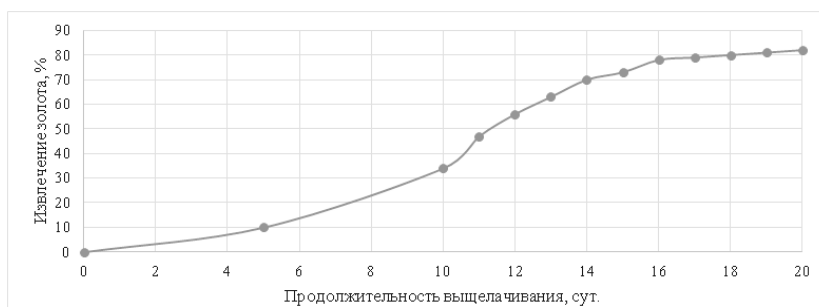


Рис. 1. Динамика извлечения золота при перколяционном выщелачивании

Fig. 1. Dynamics of gold recovery during percolation leaching

цессы предокисления и диффузионного выщелачивания, составила 30 сут.

Методика приготовления активного пероксидно-карбонатного раствора. Раствор гидрокарбоната натрия (NaHCO_3) с концентрацией 10 г/л подвергается электролизу продолжительностью 30 мин/л, с рабочим током 8 А и с параллельным барботажем кислородом воздуха. На следующей стадии выполняется фотоактивация раствора (продолжительность 5 мин/л). Процессы электро-фотоактивации растворов позволяют повышать окислительные свойства растворов [11].

Результаты геотехнологического тестирования.

Динамика выщелачивания приведена на рис. 1.

По результатам эксперимента извлечение золота за 20 сут составило 82 %, причем наибольший рост извлечения наблюдался до 16 сут. Процесс характеризуется быстрым протеканием в сравнении со стандартной длительностью процессов перколяционного выщелачивания, а также существенно более высоким извлечением золота. При цианировании, наряду с растворением золота и серебра, протекают процессы перехода ртути в продуктивные

растворы, что обеспечивает демеркуризацию [12 – 13]. Содержание ртути снижено с 80 до 20 мг/т.

Выводы

Проведенные исследования процессов окисления и выщелачивания хвостов ЗИФ Илинского рудника позволили обосновать эффективность активационного кучного выщелачивания с предокислением минеральной массы для повторной переработки данного техногенного сырья. Оценка содержания золота в продуктивных растворах и остаточных содержаниях золота в хвостах ЗИФ в ходе геотехнологического тестирования, моделирующего процессы кучного выщелачивания, позволяют считать, что доизвлечение золота и снижение содержания ртути в лежалых хвостах ЗИФ Илинского рудника предлагаемым методом эффективны. Содержание ртути в кеках цианирования было снижено.

Благодарность

Химический анализ и микроскопические исследования были выполнены на базе центра коллективного пользования «Центр исследования минерального сырья» ХФИЦ ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геоэкологические проблемы отработки рудных месторождений золота в восточном Забайкалье / Б. Н. Абрамов, Е. С. Эпова, Д. В. Манзырев // География и природные ресурсы. — 2019. — № 2 С. 103 – 111.

2. Принципы проектирования рекультивации поверхности хвостохранилища, содержащие токсичные отходы, в ДФО / Крупская Л. Т., Голубев Д. А., Гула К. Е., Панфилов О. О. // Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 мая 2015 г.: в 10 томах. — Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком». — 2015. — Том 8. — С. 80—81.

3. Distribution of Heavy Metals Fractionation in Gold Mine Tailing Amended with Non-Coated and Iron-Coated Rice Husk Ash / Samsuri A. W., Sadiq F. S., Singh Karam D. S., Aris A. Z., Graba G. B. // Soil & Sediment Contamination. — DOI: 10.1080/15320383.2020.1867504.

4. Результаты геотехнологического тестирования хвостов ЗИФ Илинского рудника / Секисов А. Г., Манзырев Д. В. // Вестник ЗабГК. — 2014. — № 7. — С.18 — 21.

5. Effect of substitution reaction with tin chloride in thermal treatment of mercury contaminated tailings / Lee ES, Cho SJ, Back SK, Seo YC, Kim SH, Ko JI // Environmental Pollution. — 2020. — Vol. 264. — 114761.

6. A Study on Applicability of Mercury-contaminated Tailing and Soil Remediation around abandoned Mines using Washing Process / Kwon Yo Seb, Park So Young, Koh Il Ha, Ji WH, Lee JS, Ko JI // Economic and environmental geology. — 2020. — Vol. 53(4). — pp. 337—346.

7. Демеркуризация отработанных угольных сорбентов ТОО «ALTYNTAU КОКСHETAU» вакуумтермическим способом / С. А. Требухов, А. В. Ниценко, Н. М. Бурабаева, А. А. Требухов, Ф. Х. Тулеутай // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения — 2017): материалы Междунар. науч. конф., Красноярск, 12—15 сентября 2017 г. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. — С. 373—376.

8. Геотехнологии извлечения дисперсного и «тонкого» золота из техногенных минеральных образований Забайкальского края / Секисов А. Г., Лавров А. Ю., Шевченко Ю. С., Манзырев Д. В., Петухов А. А., Конарева Т. Г. // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2012. — № 1 (80). — С. 34—42.

9. Фазлуллин М. И. Кучное выщелачивание благородных металлов. — М.: Издательство Академии горных наук, 2001. — 647 с.

10. Фотохимические и электрохимические процессы в геотехнологии / Секисов А. Г., Лавров А. Ю., Рассказова А. В. — Чита: ЗабГУ, 2019. — 306 с.

11. Comparative research of cyanide and sulfate-chloride gold leaching from oxidized gold-copper ore / Sekisov A., Rasskazova A., Konareva T., Rasskazov M., Korpi P. // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. — 2018. — С. 35—42.

12. Mercury removal in the gold-cyanide process / Atwood, DA // SME 2003 Conference: Cincinnati, Ohio. —2003. — Vol. 20. — № 4. — P. 211—212.

13. Determination of mercury solvation during cyanidation of artisanal & small-scale gold mining tailings via inductively coupled plasma optical emission spectroscopy in comparison to direct mercury analysis / Seney C. S., Aljic S., Kiefer A. M. // International journal of environmental analytical chemistry. — 2019. — DOI: 10.1080/03067319.2019.1694670. **PLAS**

REFERENCES

1. Abramov B. N., Epova E. S., Manzyrev D. V. Geocological problems of mining of gold ore deposits in the eastern Transbaikalia. *Geography and natural resources*. 2019, no. 2, pp. 103—111. [In Russ]

2. Krupskaya L. T., Golubev D. A., Gula K. E., Panfilov O. O. *Design principles for reclamation of the tailings storage surface containing toxic waste in the Far Eastern Federal District* [Topical issues in scientific work and educational activities] Proceedings of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference, Tambov: Ucom Consulting Company LLC. 2015, Vol. 8. pp. 80—81. [In Russ]

3. Samsuri A. W., Sadiq F. S., Singh Karam D. S., Aris A. Z., Graba G. B. Distribution of Heavy Metals Fractionation in Gold Mine Tailing Amended with Non-Coated and Iron-Coated Rice Husk Ash. *Soil & Sediment Contamination*. DOI: 10.1080/15320383.2020.1867504.
4. Sekisov A. G., Manzyrev D. V. Results of geotechnological testing of tailings of the Ilin mine gold processing plant. *Bulletin of Transbaikal Mining College*. 2014, no. 7, pp. 18–21. [In Russ]
5. Lee E. S., Cho S. J., Back S. K., Seo Y. C., Kim S. H., Ko J. I. Effect of substitution reaction with tin chloride in thermal treatment of mercury contaminated tailings. *Environmental Pollution*. 2020, Vol. 264, 114761.
6. Kwon Yo Seb, Park So Young, Koh Il. Ha., Ji W. H., Lee J. S., Ko Ji. A. Study on Applicability of Mercury-contaminated Tailing and Soil Remediation around abandoned Mines using Washing Process. *Economic and environmental geology*. 2020, Vol. 53(4), pp. 337–346.
7. Trebukhov S. A., Nitsenko A. V., Burabaeva N. M., Trebukhov A. A., Tuleutai F.Kh. *Demercurization of waste coal sorbents of Altyntau Kokshetau LLP by vacuum-thermal method* [Modern problems of complex processing of refractory ores and technogenic raw materials (Plaksin readings 2017)] Proceedings of Intern. scientific. Conf., Krasnoyarsk. 2017, pp. 373–376. [In Russ]
8. Sekisov A. G., Lavrov A.Yu., Shevchenko Yu.S., Manzyrev D. V., Petukhov A. A., Konareva T. G. Geotechnologies for the extraction of dispersed and “fine” gold from technogenic mineral formations of the Trans-Baikal Territory. *Bulletin of the Trans-Baikal State University*. 2012, no. 1 (80), pp. 34–42. [In Russ]
9. Sekisov A. G., Lavrov A.Yu., Rasskazova A. V. *Fotokhimiicheskiye i elektrokhimiicheskiye protsessy v geotekhnologii* [Photochemical and electrochemical processes in geotechnology], Chita, Transbaikal State University, 2019, 306 p. [In Russ]
10. Fazlullin M. I. *Kuchnoye vyshchelachivaniye blagorodnykh metallov* [Heap leaching of noble metals], Moscow, Publishing house of the Academy of Mining Sciences, 2001, 647 p. [In Russ]
11. Sekisov A., Rasskazova A., Konareva T., Rasskazov M., Korpi P. Comparative research of cyanide and sulfate-chloride gold leaching from oxidized gold-copper ore [International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM], 2018, pp. 35–42.
12. Atwood, D. A. Mercury removal in the gold-cyanide process [SME 2003 Conference] Cincinnati, Ohio, 2003, Vol. 20, no. 4, P. 211–212.
13. Seney C. S., Aljic S., Kiefer A. M. Determination of mercury solvation during cyanidation of artisanal & small-scale gold mining tailings via inductively coupled plasma optical emission spectroscopy in comparison to direct mercury analysis. *International journal of environmental analytical chemistry*. 2019, DOI: 10.1080/03067319.2019.1694670.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Секисов Артур Геннадиевич¹ – докт. техн. наук, главный научный сотрудник;
 Рассказова Анна Вадимовна¹ – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: annbot87@mail.ru;

Лаврик Александра Викторовна¹ – младший научный сотрудник, аспирант;

¹ Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sekisov A. G.¹, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Main Researcher;

Rasskazova A. V., Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: annbot87@mail.ru;

Lavrik A. V., Junior Researcher, Graduate Student, e-mail: alexalavrikxx@gmail.com;

¹ Mining Institute, Far-East Branch of RAS, Khabarovsk, Russia.

Получена редакцией 01.03.2021; получена после рецензии 09.04.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 01.03.2021; received after the review 09.04.2021; accepted for printing 10.04.2021.