

УДК 622.775:622'17

## ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ХВОСТОВ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НАВОЙСКОГО ГМК



**К. С. САНАКУЛОВ,**  
генеральный директор,  
проф., д-р техн. наук,  
info@ngmk.uz



**М. М. ИСМАГИЛОВ,**  
заместитель главного  
инженера

ГП «Навоийский горно-металлургический комбинат», Навои, Узбекистан



**В. Е. ДЕМЕНТЬЕВ,**  
генеральный директор,  
канд. техн. наук



**В. М. МУЛЛОВ,**  
ведущий научный сотрудник,  
канд. техн. наук

АО «Иргиредмет», Иркутск, Россия

### Введение

Научно-технический прогресс в горной промышленности направлен на комплексное освоение богатства недр [1–3]. Одним из направлений является переработка бедного золотосодержащего сырья методом кучного выщелачивания [4–7].

В связи с ростом трудоемкости добычи минеральных ресурсов природного происхождения и их постепенным истощением все больший интерес теории и практики горного дела привлекают техногенные минеральные образования прошлых лет, содержащие значительное количество полезных компонентов [8–19]. К числу таких образований относятся хвосты кучного выщелачивания.

Более 20 лет на Навойском ГМК действует цех кучного выщелачивания золота (ЦКВЗ) по переработке забалансовых руд месторождения Мурунтау.

Укладка руды, дробленной до крупности 5 мм, осуществлялась ярусами высотой 10 м с предельным числом слоев, равном шести. Общая масса руды на отработанной подушке выщелачивания составляет 217 млн т. Выделение золота из продуктивных растворов велось методом цементации на цинковую пыль. По результатам геологического опробования среднее остаточное содержание золота в хвостах 0,7 г/т. Запасы золота в хвостах ЦКВЗ позволяют отнести их к разряду техногенного месторождения.

*Разработана и испытана в промышленных условиях технология извлечения металла из техногенных отходов цеха кучного выщелачивания золота.*

**Ключевые слова:** хвосты кучного выщелачивания, технологические исследования, переработка хвостов, извлечение золота, цианирование, сорбент, технологический регламент, десорбция.

**DOI:** 10.17580/gzh.2018.09.09

В связи с выработкой за 45-летний период работы гидрометаллургического завода № 2 (ГМЗ-2) основных запасов руды месторождения Мурунтау приобрела актуальность проблема вовлечения в переработку техногенных отходов. Поэтому в инновационную программу развития Навойского ГМК была включена задача строительства нового предприятия для переработки лежалых хвостов ЦКВЗ.

В качестве соисполнителя для разработки технологии переработки хвостов ЦКВЗ был выбран институт АО «Иргиредмет», имеющий почти 150-летнюю историю. Институт является давним партнером НГМК и занимает лидирующие позиции в СНГ по внедрению современных технологий извлечения золота из рудного сырья.

### Методика и результаты исследований

Для проведения технологических исследований с борта «подушки выщелачивания» была отобрана проба хвостов массой 300 т. В течение 2016 г. специалистами АО «Иргиредмет» и НГМК на базе Центральной научно-исследовательской лаборатории (ЦНИЛ) и опытного цеха комбината был проведен комплекс исследований по разработке рациональной технологии переработки хвостов ЦКВЗ.

Изучение гранулометрического состава хвостов показало, что иловая фракция ( $-0,071$  мм) более истощена по золоту и по выходу составляет в среднем 20 %. Доля цианируемого золота в этой фракции не превышает 30 %.

Чтобы оценить возможность сокращения объемов гидрометаллургической переработки, был выполнен GRG-тест. По результатам опытов при суммарном выходе концентрата центробежной концентрации 1,83 % извлечение золота в него составило 58,47 %. Содержание золота в концентрате достигло уровня 19,57 г/т при остаточном содержании в хвостах 0,26 г/т.

Испытания гравитационной технологии были продолжены в полупромышленном масштабе по двухстадиальной схеме, включающей отсадочную машину на сливе шаровой мельницы и концентратор Knelson с постоянной разгрузкой (CVD) на сливе спи-

рального классификатора. Результаты испытаний (см. таблицу) показали, что даже при массовом выходе общего концентрата 47 % содержание золота в хвостах осталось на уровне 0,48 г/т. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на разработку технологии прямого цианирования лежалых хвостов ЦКВЗ.

В лабораторных условиях были изучены зависимости показателя извлечения золота от крупности измельчения хвостов, концентрации цианида натрия и продолжительности выщелачивания. По результатам опытов оптимальными режимными условиями были признаны: крупность измельчения – 80 % класса –0,071 мм; концентрация NaCN – 0,5 г/л; продолжительность выщелачивания – 16 ч. В этих режимах из продукта с содержанием золота 0,7 г/т достигалось извлечение в среднем 65 %.

Методом переменных навесок сорбента были изучены изотермы сорбции золота из пульпы на смолу ДЗ01Ж (аналог АМ-2Б) и активированный уголь Goldsorb 6×12. Полученные усредненные равновесные коэффициенты распределения золота между сорбентами и раствором оказались близки:  $K_p = 4770$  и  $K_p = 4090$  соответственно. Ожидаемая рабочая емкость насыщенных сорбентов по золоту, согласно изотермам, составила 0,4 мг/г.

Были также изучены условия сгущения пульпы при крупности измельчения до 80 % класса –0,071 мм. Лучшие результаты были получены при использовании флокулянта Praestol 2500 с удельным расходом 20 г/т. Расчетная удельная производительность для радиального сгустителя составила 3,9 т/м<sup>2</sup> в сутки.

С целью уточнения расходных показателей и определения операционного уровня извлечения на площадке ЦНИЛ были проведены заверочные пилотные испытания полной технологической схемы переработки хвостов ЦКВЗ с использованием эксклюзивной методики и аппаратуры Ирриредмета.

Схема испытаний включала операции измельчения хвостов в цианистой среде, классификацию с возвратом песков в мельницу, сгущения, цианирования параллельно по СІР- и RІР-технологиям в непрерывном противоточном режиме движения пульпы и сорбента и фильтрацию хвостов цианирования с возвратом растворов в оборот. Продолжительность испытаний составила 280 ч для достижения установившегося динамического сорбционного режима. В ходе испытаний продолжали оптимизировать режимные условия, в том числе крупность измельчения была повышена до 86 % класса –0,071 мм, концентрация NaCN на операции предварительного цианирования 0,5 г/л при удельном расходе реагента 0,41 кг/т, расход CaO 3,6 кг/т, удельный поток сорбентов 1,2 кг/т, общая продолжительность цианирования 24 ч.

В результате пилотных испытаний по обеим веткам получено одинаковое извлечение золота на сорбенты – 63,9 %. Емкость насыщенного угля по золоту составила 0,49 кг/т, емкость смолы – 0,41 кг/т при среднем содержании золота в исходном сырье 0,71 г/т. Потери золота с жидкой фазой хвостов не превышали 0,02 г/м<sup>3</sup>.

Анализы насыщенных сорбентов показали, что смола в значительной мере заражена металлами-примесями, особенно цинком (8,1 г/кг) и медью (6,4 г/кг).

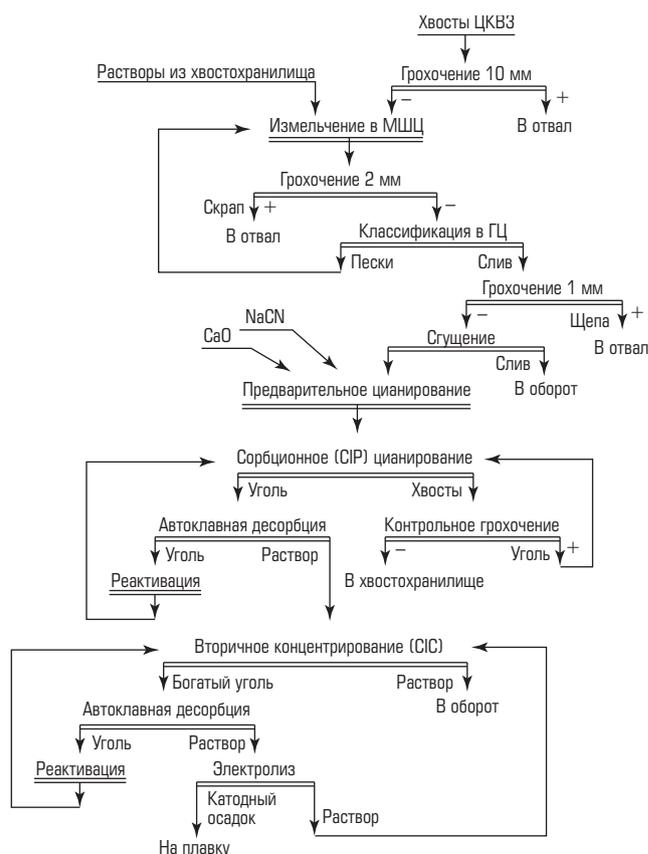
**Результаты полупромышленных испытаний схемы гравитационного обогащения хвостов ЦКВЗ**

Продукт	Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
Концентрат МОД	37,1	0,98	53,1
Концентрат CVD	9,9	0,68	9,8
Концентрат общий	47	0,92	62,9
Хвосты гравитации	53	0,48	37,1
Хвосты исходные	100	0,69	100

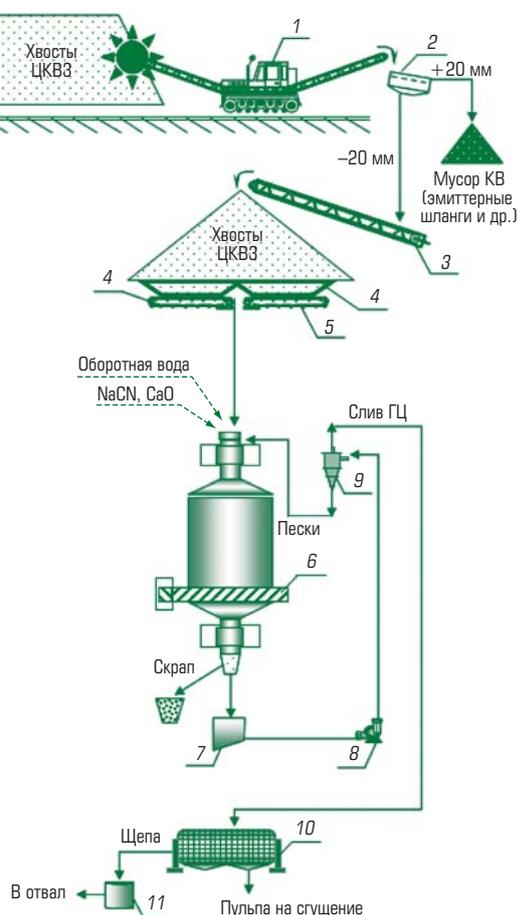
Поскольку уголь проявил по отношению к золоту значительные селективные свойства, этот сорбент был рекомендован к применению в промышленном масштабе. Кроме того, использование автоклавной схемы десорбции золота по технологии Ирриредмета позволяет организовать процесс вторичного концентрирования золота из относительно бедных первичных элюатов, с получением товарной продукции в виде катодных осадков от электролиза вторичных богатых элюатов.

По результатам выполненных исследований в АО «Ирриредмет» был разработан технологический регламент, который стал основой проекта строительства предприятия по переработке хвостов ЦКВЗ. Проектом предусматривается поэтапный ввод предприятия на максимальную производительность 15 млн т в год.

Принципиальная схема переработки хвостов ЦКВЗ, рекомендованная в регламенте, представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Схема переработки хвостов ЦКВЗ**



**Рис. 2. Технологическая-аппаратурная схема узла рудоподготовки ГМЗ по переработке хвостов ЦКВЗ:**  
 1 – роторный экскаватор; 2 – вибрационный грохот;  
 3 – транспортер; 4 – питатель; 5 – транспортер;  
 6 – МШЦ-5,5×7,5; 7 – зумпф; 8 – насос; 9 – батарея ГЦ-500; 10 – барабанный грохот; 11 – контейнер для щепы

Выбранная в регламенте схема рудоподготовки учитывает наличие остатка эмиттерной системы, используемой в технологии кучного выщелачивания, металлического скрапа, щепы и других нерудных включений в перерабатываемых хвостах кучного выщелачивания. В схеме рудоподготовки, представленной на **рис. 2**, рекомендовано разборку подушки выщелачивания вести с использованием высокопроизводительного роторного экскаватора.

Выделение постороннего мусора предполагается вести на вибрационном грохоте с ячейкой сетки 10 мм. Образующийся при шаровом измельчении металлический скрап рекомендуется выводить с использованием бутары, смонтированной на разгрузоч-

ной цапфе мельницы. Щепоотделение организуется на сливе гидроциклонов с использованием барабанных грохотов с ячейкой сетки 0,8 мм производства НМЗ НГМК. В процессе сгущения пульпы рекомендовано использовать флокулянт марки Praestol при его удельном расходе 15–20 г/т.

Предварительное цианирование в секции предусмотрено в одну цепочку, состоящую из трех пневмомеханических агитаторов JJCB 140150 с рабочим объемом по 1500 м<sup>3</sup> каждый. Для сорбционного выщелачивания в проекте принято использование пневмомеханических агитаторов  $D \times H = 8000 \times 8500$  рабочим объемом 400 м<sup>3</sup> с механическим приводом мешалки Kephix и межстадиальным грохотом MPS 400 (P). В секции устанавливаются три цепочки из шести агитаторов в каждой.

Низкая емкость по золоту (0,4 мг/г), выводимого из сорбционного процесса насыщенного угля, определила выбор технологии десорбции, исключающей циркуляцию элюата через электролизер. Для использования была рекомендована высокотемпературная (165–170 °С) автоклавная десорбция, разработанная в АО «Иргиредмет» и широко применяемая на предприятиях России.

По этой технологии продолжительность десорбции составляет 2 ч. Получаемый относительно «бедный» по золоту элюат направляют на операцию вторичного концентрирования в отдельном цикле с получением достаточно высокоемкого по содержанию золота угля и со сниженным содержанием примесей в нем.

Десорбцию золота с «богатого» по золоту угля ведут по той же технологии с фракционированием элюата на две части. Первую фракцию «богатого» по золоту элюата направляют на электролиз, вторую фракцию «бедного» элюата возвращают на операцию вторичного концентрирования.

Для электроосаждения золота рекомендованы к применению проточные электролизеры ГНЦ-40М, разработанные Иргиредметом и также широко применяемые на российских золотодобывающих предприятиях.

Проектным решением предусмотрено складирование хвостов переработки в действующем хвостохранилище ГМЗ-2. Водоснабжение нового перерабатывающего предприятия предусмотрено обратными растворами хвостохранилища, что позволит снизить фактические расходы реагентов и несколько повысить показатель извлечения золота за счет доизвлечения его из обратных растворов.

### Заключение

Таким образом, в результате проведенного комплекса научно-исследовательских работ разработаны оптимальные режимы гидromеталлургической переработки хвостов ЦКВЗ, а также технологический регламент для проектирования предприятия, предусматривающий использование современного технологического оборудования.

**Библиографический список**

1. Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Принципы обоснования параметров устойчивого и экологически сбалансированного освоения месторождений твердых полезных ископаемых // Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России. – М. : Горная книга, 2014. Вып. 2. С. 3–10.
2. Чантурия В. А., Вайсберг Л. А., Козлов А. П. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 3–9. DOI: 10.17580/or.2014.02.01
3. Ларичкин Ф. Д., Войтеховский Ю. Л., Воробьев А. Г., Гончарова Л. И. Особенности обоснования параметров кондиций рентабельного извлечения ценных редкоземельных составляющих многокомпонентного минерального сырья // Горный журнал. 2016. № 1. С. 49–53. DOI: 10.17580/gzh.2016.01.10
4. Захаров Б. А., Меретуков М. А. Золото: упорные руды. – М. : ИД «Руда и Металлы», 2013. – 452 с.
5. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов : в 2 т. / под ред. М. И. Фазлуллина. – М. : ИД «Руда и Металлы», 2005. Т. 1: Уран. – 407 с.
6. Филиппов А. П., Нестеров Ю. В. Редокс-процессы и интенсификация выщелачивания металлов. – М. : ИД «Руда и Металлы», 2009. – 543 с.
7. Кожозулов К. Ч., Битимбаев М. Ж., Джумабаев Е. И. Постановка задачи необходимости качественного улучшения технико-экономических показателей кучного выщелачивания золота // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 8-2. С. 131–135.
8. Аксенов Е. М., Садыков Р. К., Алискеров В. А., Киперман Ю. А., Комаров М. А. Техногенные месторождения – проблемы и перспективы вовлечения в хозяйственный оборот // Разведка и охрана недр. 2010. № 2. С. 17–20.
9. Корнилов С. В., Яковлев В. Л., Саканцев С. Г., Селеванов Е. Н. Технологии формирования и обработки техногенных месторождений. Проблемы и решения // Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов (Техноген-2012) : тр. междунар. конгресса. – Екатеринбург : ООО «УИПЦ», 2012. С. 31–41.
10. Меретуков М. А., Санакулов К. С., Зимин А. В., Арустамян М. А. Золото: химия для металлургов и обогатителей. – М. : ИД «Руда и Металлы», 2014. – 412 с.
11. Шумилова Л. В. Гравитационно-электрохимический способ извлечения золота из техногенных россыпей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. Спец. выпуск № 19. Комбинированные процессы переработки минерального сырья: теория и практика. С. 186–191.
12. Абдыкирова Г. Ж., Бектурганов Н. С., Дюсенова С. Б., Танекеева М. Ш., Сукуров Б. М. Исследование возможности извлечения золота из лежалых хвостов золотоизвлекательной фабрики // Обогащение руд. 2015. № 3. С. 46–50. DOI: 10.17580/or.2015.03.08
13. Алексеев В. С., Банщикова Т. С. Извлечение упорных форм золота из гравитационных концентратов и хвостов обогащения россыпей с применением химических реагентов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 4. С. 159–164.
14. Anderson C. G. Alkaline sulfide gold leaching kinetics // Minerals Engineering. 2016. Vol. 92. P. 248–256.
15. Yin S.-H., Wang L.-M., Chen X., Wu A.-X. Effect of ore size and heap porosity on capillary process inside leaching heap // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2016. Vol. 26. Iss. 3. P. 835–841.
16. Zhang S., Liu W. Application of aerial image analysis for assessing particle size segregation in dump leaching // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 171. P. 99–105.
17. Brüger A., Fafilek G., Restrepo B. O. J., Rojas-Mendoza L. On the volatilisation and decomposition of cyanide contaminations from gold mining // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 627. P. 1167–1173.
18. Arpalahiti A., Lundström M. The leaching behavior of minerals from a pyrrhotite-rich pentlandite ore during heap leaching // Minerals Engineering. 2018. Vol. 119. P. 116–125.
19. Lu J., Dreisinger D., West-Sells P. Acid curing and agglomeration for heap leaching // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 167. P. 30–35. **TX**

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 9, pp. 64–68  
DOI: 10.17580/gzh.2018.09.09

**Processing technology for heap leaching tailings at the Navoi Mining and Metallurgical Combinat**

**Information about authors**

**K. S. Sanakulov**<sup>1</sup>, Chief Executive Officer, Professor, Doctor of Engineering Sciences, info@ngmk.uz

**M. M. Ismagilov**<sup>1</sup>, Deputy Chief Engineer

**V. E. Dementiev**<sup>2</sup>, Chief Executive Officer, Candidate of Engineering Sciences

**V. M. Mullov**<sup>2</sup>, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences

<sup>1</sup> Navoi Mining and Metallurgical Combinat, Navoi, Uzbekistan

<sup>2</sup> Irgiredmet, Irkutsk, Russia

**Abstract**

One of the trends in efficient subsoil management is processing of low-grade gold-bearing materials (uneconomic ore reserves) by heap leaching. Tailings after the process yet contain considerable metal.

This situation is typical of the Navoi Mining and Metallurgical Combinat, Republic of Uzbekistan – a leading gold and uranium producer in the country. For 20 years of operation, the gold heap leaching shopfloor has accumulated 217 Mt of tailings with the residual gold content of 0.7 g/t. In connection with the deficient supply of natural raw materials for operating Hydrometallurgical Works 2, the question of re-treatment of heap leaching tailings to reextract gold came up. In such a way, the tailings pond became a man-made deposit.

The scientific analysis of the problem and development of economically efficient processing technology for the tailings was charged to the Irgiredmet Institute, Russia – an internationally recognized leader in the field of integrated mineral processing and a business partner of Navoi MMC. The Irgiredmet's experts together with the fellows of the Central Research Laboratory of Navoi MMC accomplished a series of lab-scale and full-scale research into dressability of heap leaching tailings. As a result, the production procedures were elaborated for the construction of a dedicated plant for processing of tailings and the

related technology was proposed. The technology passed commercial trial: gold yield from the tailings reached 65%.

**Keywords:** heap leaching tailings, technological research, tailings processing, gold recovery, cyanidation, sorbent, production procedures, desorption.

**References**

1. Trubetsky K. N., Kaplunov D. R., Rylnikova M. V. The principles of parameters justification of sustainable and ecologically balanced exploitation of solid mineral resources. *Terms of stable functioning mineral feed complex of Russia*. Moscow : Gornaya kniga, 2014. Iss. 2. pp. 3–10.
2. Chanturiya V. A., Vaisberg L. A., Kozlov A. P. Promising trends in investigations aimed at all-round utilization of mineral raw materials. *Obogashchenie Rud*. 2014. No. 2. pp. 3–9. DOI: 10.17580/or.2014.02.01
3. Larichkin F. D., Voitekhovskiy Yu. L., Vorobev A. G., Goncharova L. I. Features of substantiation of quality requirements for extraction of valuable rare earth components from multicomponent mineral raw material. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 1. pp. 49–53. DOI: 10.17580/gzh.2016.01.10
4. Zakharov B. A., Meretukov M. A. Gold: refractory ores. Moscow : "Ore and Metals" Publishing House, 2013. 452 p.
5. Underground and heap leaching of uranium, gold and other metals : in two volumes. Ed.: M. I. Fazlullin. Moscow : Ore and Metals Publishing House, 2005. Vol. 1: Uranium. 407 p.
6. Filippov A. P., Nesterov Yu. V. Redox processes and intensification of metal leaching. Moscow : "Ore and Metals" Publishing House, 2009. 543 p.
7. Kozhogulov K. Ch., Bitimbayev M. Zh., Zhumabayev E. I. Improvement of technical and economic characteristics of heap leaching of gold. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016. No. 8-2. pp. 131–135.
8. Aksenov E. M., Sadykov R. K., Aliskerov V. A., Kiperman J. A., Komarov M. A. Technogenic deposits – problems and involving prospects in economic circulation. *Prospect and protection of mineral resources*. 2010. No. 2. pp. 17–20.

9. Kornilov S. V., Yakovlev V. L., Sakantsev S. G., Selevanov E. N. Technologies of formation and processing of anthropogenic deposits. Problems and solutions. *Fundamental basis of technology of processing and utilization of anthropogenic wastes : proceedings of international congress*. Ekaterinburg : LLC «UIPTs», 2012. pp. 31–41.
10. Meretukov M. A., Sanakulov K. S., Zimin A. V., Arustamyan M. A. Gold: chemistry for metallurgists and dressers. Moscow : "Ore and Metals" Publishing House, 2014. 412 p.
11. Shumilova L. V. Gravity-electrochemical method of gold extracting from industrial placers. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2015. Special Issue No. 19. Combined processes of mineral resources beneficiation: theory and practice. pp. 186–191.
12. Abdykairova G. Zh., Bekтурганов N. S., Dyusenova S. B., Tanekeeva M. Sh., Sukurov B. M. A study into the feasibility of gold recovery from aged dump tailings of gold-recovery plants. *Obogashchenie Rud*. 2015. No. 3. pp. 46–50. DOI: 10.17580/or.2015.03.08
13. Alekseev V. S., Bانشchikova T. S. Rebellious Gold Extraction from Gravity Concentrates and Placer Tailings by Chemical Reagents. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, Iss. 4. pp. 756–761.
14. Anderson C. G. Alkaline sulfide gold leaching kinetics. *Minerals Engineering*. 2016. Vol. 92. pp. 248–256.
15. Yin S.-H., Wang L.-M., Chen X., Wu A.-X. Effect of ore size and heap porosity on capillary process inside leaching heap. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. Vol. 26, Iss. 3. pp. 835–841.
16. Zhang S., Liu W. Application of aerial image analysis for assessing particle size segregation in dump leaching. *Hydrometallurgy*. 2017. Vol. 171. pp. 99–105.
17. Brüger A., Faflek G., Restrepo B. O. J., Rojas-Mendoza L. On the volatilisation and decomposition of cyanide contaminations from gold mining. *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 627. pp. 1167–1173.
18. Arpalahti A., Lundström M. The leaching behavior of minerals from a pyrrhotite-rich pentlandite ore during heap leaching. *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 119. pp. 116–125.
19. Lu J., Dreisinger D., West-Sells P. Acid curing and agglomeration for heap leaching. *Hydrometallurgy*. 2017. Vol. 167. pp. 30–35.

