

3. Shumilova L. V. Testing of the combined methods of leaching gold from technogenic deposits in Trans-Baikal semiindustrial conditions. *Bulletin of Russian Academy of Natural Sciences*. 2013. No. 6. pp. 139–143.
4. Fedoseev I. V., Barkan M. Sh. Extraction of platinum and non-ferrous metals from old tails of Norilsk concentration plant. *Tsvetnye Metally*. 2014. No. 5. pp. 33–38.
5. Karpov Yu. A., Baranovskaya V. B., Loley S. I., Belyaev V. N. Analytical control of secondary metal-bearing raw materials. *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 12. pp. 36–41. DOI: 10.17580/tsm.2015.12.06
6. Muzafarov A. M., Oslopovskiy S. A., Sattarov G. S. Radiometric investigations of technogenic objects. *Tsvetnye Metally*. 2016. No. 2. pp. 15–19. DOI: 10.17580/tsm.2016.02.02
7. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves. The JORC Code 2012 Edition. Joint Ore Reserves Committee, 2012. 44 p.
8. Bloshenko T. A. Taxation of Mineral Products in Russian Federation. *Review of European Studies*. 2014. Vol. 6, No. 4. pp. 91–99.
9. Hall B. Cut-off Grades and Optimising the Strategic Mine Plan. Carlton Victoria : The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. 301 p.
10. Poniewierski J. Negatively Geared Ore Reserves – A Major Peril of the Break-even Cut-off Grade. *Good Practice and Communication : Proceedings of the Project Evaluation 2016*. Adelaide, 2016. pp. 236–248.
11. Konyaev V. P., Kryuchkova L. A. Mining waste and utilization trends in Russia. *Informatsionnyi sbornik*. Moscow. 1994. Iss. 1.
12. Shemetov P. A., Sytenkov V. N., Naimova R. Sh. Improvement of Efficient Use of Deep Open Pit Mining Waste. Tashkent : Fan, 2011. 181 p.
13. Lad R. J., Samant J. S. Environmental and social impacts of stone quarrying – a case study of Kolhapur District. *International Journal of Current Research*. 2014. Vol. 6, Iss. 3. pp. 5664–5669.
14. Legwaila I. A., Lange E., Cripps J. Quarry reclamation in England: a review of techniques. *Journal of The American Society of Mining and Reclamation*. 2015. Vol. 4, No. 2. pp. 55–79.
15. Jarvie-Eggart M. E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. Colorado : Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
16. Aristov I. I., Rubtsov S. K., Snitka N. P. Experience of stagewise improvement in procedures of ore loss and dilution rating and accounting at open pit mines of the Navoi Mining and Metallurgical Combinat. *Gornyi vestnik Uzbekistana*. 2006. No. 4(27). pp. 38–42.
17. Raimzhanov B. R., Naimova R. S. Use of nonstandard mining waste for the replenishment of the mineral and raw materials base of the mining and processing enterprise. *Ratsionalnoe osvoenie nedr*. 2016. No. 5-6. pp. 74–79.

УДК 669.213(575.1)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛИСТЫХ ЗОЛОТОМЫШЬЯКОВИСТЫХ УПОРНЫХ РУД УЗБЕКИСТАНА



К. С. САНАКУЛОВ,
ректор,
проф., д-р техн. наук,
rektor@ndki.uz,
Навоийский
государственный горный
институт, Навои,
Узбекистан



У. А. ЭРГАШЕВ,
начальник
технологического отдела,
д-р техн. наук,
ГП «Навоийский горно-
металлургический
комбинат», Навои,
Узбекистан



А. ДОБЕРСЕК,
генеральный директор,
канд. техн. наук,
компания Engineering
Dobersek GmbH,
Мёнхенгладбах,
Германия

Введение

Современный мировой рынок золота переживает период явного дефицита качественного минерального сырья. Запасы месторождений с легкоизвлекаемыми формами золота в настоящее время практически истощены, а в переработку вовлекаются сложные по своему вещественному составу руды, относящиеся к категории упорных и особо упорных, извлечение золота из которых традиционными методами крайне затруднено. Поэтому поиск эффективной технологии извлечения золота из таких руд в условиях наблюдающейся тенденции роста мировых цен на золото является актуальной научной проблемой, имеющей важное народно-хозяйственное значение [1].

Изложены результаты работ по поиску ресурсосберегающей технологии извлечения золота из труднообогатимых руд месторождений Кызылкумского региона Узбекистана.

Ключевые слова: золото, мышьяк, углеродистые образования, вещественный состав, упорные руды, переработка руды, извлечение золота, технология бактериального окисления.

DOI: 10.17580/gzh.2018.09.08

Золото в упорных рудах распределено на атомарном уровне в матрице ряда сульфидных минералов (пирит, арсенипирит). Специфической особенностью существования частиц золота в кристаллической решетке указанных минералов являются их малые размеры – от десятков до тысячных долей микрона. Поэтому золото не растворяется цианированием при стандартной технологии. Вторая по распространенности причина упорности – наличие в руде значимых количеств углеродистого вещества, которое может сорбировать золото из цианистых растворов, увеличивая тем самым потери золота с хвостами технологического процесса.

Эти два фактора могут проявляться одновременно, что особо усложняет технологию переработки. Такие руды принято называть рудами двойной упорности (особо упорные).

Большинство научных разработок и публикаций последних лет в области обогащения и металлургической переработки руд и

концентратов благородных металлов так или иначе связаны с проблемами извлечения упорного золота. В их решении принимают участие научно-исследовательские организации, предприятия и компании многих стран, являющиеся основными (или просто крупными) производителями этого металла из рудного сырья [2–9].

Одним из главных путей повышения эффективности процесса выщелачивания золота из труднообогатимого сырья является интенсификация процесса вскрытия упорной матрицы физическими, химическими и, особенно, биологическими методами.

Исследования процессов биоокисления золотосодержащих продуктов месторождений Кокпатас и Даугызтау

Для переработки труднообогатимых сульфидных руд месторождений Кокпатас и Даугызтау проектом предусмотрена технология бактериального окисления, при которой золото должно освободиться и быть доступным для цианосодержащих растворов.

Решение о применении технологии биоокисления в Узбекистане было принято в 1993–1995 гг. В 2008 г. завершено строительство первой очереди установки бактериального окисления золотосодержащих концентратов на базе месторождений Кокпатас и Даугызтау.

Установка с проектной производительностью 1069 т/сут при содержании сульфидной серы 20 % включала четыре модуля, в свою очередь, каждый модуль имел три первичных и три вторичных реактора (всего 24 реактора) [10]. С вводом второй очереди установки ее производительность превысила 2000 т/сут с вовлечением в переработку флотационного концентрата месторождения Даугызтау, отличающегося высоким содержанием углеродистых составляющих.

В ходе работы установки по проектной технологической схеме не удалось достичь намеченных показателей переработки золотомышьяковистых сульфидных руд. Причинами этому послужили:

- во первых – несоблюдение жестких требований по постоянству вещественного состава перерабатываемых флотоконцентратов, направляемых на биоокисление, из-за разнообразия руд месторождений Кокпатас и Даугызтау (40 различных рудных залежей);
- во вторых – наличие значительного количества (15–20 %) в рудах месторождений Кокпатас и Даугызтау золота, ассоциированного с углеродистым веществом (углистое золото);
- в третьих – тесная ассоциация по типу «взаимопрорастание» сульфидов и углистого вещества.

Практика работы заводов по переработке упорных золотосодержащих руд с использованием технологии биоокисления показывает, что на сегодняшний день, по мнению авторов статьи, недостаточно глубоко изучено поведение биокеков при их дальнейшей переработке. В связи с этим на предприятиях, использующих данную технологию, часто встречаются проблемы различного характера.

По результатам исследований АО «Иргиредмет» (Россия), в кеках биоокисления остается до 14 % неизвлекаемого цианиро-

ванием золота, из которых 12 % составляет углистое золото. Последующие исследования показали, что доля углистого золота в сульфидных рудах месторождения Даугызтау достигает 30 %. Исследования, выполненные специалистами НГМК, выявили наличие до 15 % углистого золота в рудах месторождений Кокпатас и Даугызтау [11].

Углеродистые образования, которые являются характерной особенностью руд глубоких горизонтов этих месторождений, по данным исследований, представляют агрегаты тонкодисперсных частиц органических веществ в субмикроскопическом рассеянном состоянии, пигментирующие поверхность других минералов и цементирующие их. По характеру нахождения в руде каждое такое образование классифицируется как рассеянное углеродистое вещество, состоящее из растворимых (битумоиды) и нерастворимых (кероген) компонентов.

Установлено, что наличие в рудах месторождений рассеянных углеродистых образований оказывает блокирующее действие на золото и сульфиды при ведении технологических операций. Это обусловлено тесной природной ассоциацией углеродистого вещества с золотом и сульфидами, а также образованием вторичных (техногенных) покрытий на поверхности минералов [12].

Для оптимизации технологических показателей переработки руд двойной упорности проведены многочисленные исследования специалистами Навоийского ГМК, научно-исследовательскими организациями Республики Узбекистан и Российской Федерации. Кроме того, к исследованиям были привлечены зарубежные компании: Outotec (Финляндия), Engineering Dobersek GmbH (Германия), Gencor Process (ЮАР). Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод, что специальный подход при окислительном обжиге биокека позволяет существенно изменить положение по улучшению показателей технологических процессов.

Учитывая положительную роль процесса биоокисления, связанную с выводом значительной части мышьяка из продукта биоокисления, было принято решение о комбинированном варианте окисления сульфидных руд. На начальном этапе окисление флотоконцентрата осуществляется по схеме биоокисления, при котором вскрывается сульфидное золото, значительная часть мышьяка растворяется и затем переводится в твердое состояние в виде нерастворимого скородита (FeAsO_4). Затем продукт биоокисления с низким содержанием мышьяка подвергается окислительному обжигу, при котором вскрывается углистое золото, окисляется взаимосросшая с углеродом сульфидная сера. Огарок окислительного обжига направляется на сорбционное цианирование золота. Согласно результатам лабораторных испытаний, наиболее высокие показатели сквозного извлечения золота достигаются при направлении на окислительный обжиг хвостов сорбционного выщелачивания продукта биоокисления.

Результаты исследований запатентованы в патентном ведомстве Республики Узбекистан. В 2017 г. на международном конкурсе за данный патент присуждена Золотая медаль Всемирной организации интеллектуальной собственности при ООН «За изобретательство».

В настоящее время комбинат совместно со специалистами компании Engineering Dobersek GmbH (Германия) проводит опытно-промышленные испытания с использованием современной высокоэффективной печи обжига с циркулирующим кипящим слоем, с последующим внедрением в производство.

Заключение

В результате производственных экспериментов и детальных научных исследований обоснована наиболее эффективная технология переработки труднообогатимого золотосодержащего сырья.

Библиографический список

1. Санакулов К. С. Особенности технологии извлечения металла из упорных и особо упорных золото-сульфидномышьяковистых руд // Горный вестник Узбекистана. 2014. № 2(57). С. 33–36.
2. Зайцев П. В., Фоменко И. В., Чугаев Л. В., Шнейерсон Я. М. Автоклавное окисление сырья двойной упорности в присутствии известняка // Цветные металлы. 2015. № 8. С. 41–49. DOI: 10.17580/tsm.2015.08.05
3. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследования обогатимости упорных первичных и смешанных руд золоторудного месторождения Красноярского края // Обогащение руд. 2017. № 3. С. 21–26. DOI: 10.17580/or.2017.03.04
4. Игнатов Д. О., Каюмов А. А., Игнаткина В. А. Селективное разделение мышьяксодержащих сульфидных минералов // Цветные металлы. 2018. № 7. С. 32–38. DOI: 10.17580/tsm.2018.07.05
5. Hu X., Guo X., He M., Li S. pH-dependent release characteristics of antimony and arsenic from typical antimony-bearing ores // Journal of Environmental Sciences. 2016. Vol. 44. P. 171–179.
6. Lu W.-H., Yin Z.-L. Study on thermal decomposition and arsenic removal of a silver bearing copper ore // International Journal of Mineral Processing. 2016. Vol. 153. P. 1–7.
7. Yang T., Rao S., Liu W., Zhang D., Chen L. A selective process for extracting antimony from refractory gold ore // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 169. P. 571–575.
8. Wang Y., Xiao L., Liu H., Qian P., Ye S., Chen Y. Acid leaching pretreatment on two-stage roasting pyrite cinder for gold extraction and co-precipitation of arsenic with iron // Hydrometallurgy. 2018. Vol. 179. P. 192–197.
9. Natarajan K. A. Biotechnology of Metals: Principles, Recovery Methods and Environmental Concerns. – Amsterdam : Elsevier, 2018. – 502 p.
10. Ян ван Никерк. Совершенствование технологии BIOX // Горный вестник Узбекистана. 2009. № 3(38). С. 69–76.
11. Санакулов К. С., Мустакимов О. М., Эргашев У. А., Ахатов Н. А. О целесообразности применения комбинированных технологий для переработки особо упорных золотосульфидных руд // Горный вестник Узбекистана. 2015. № 2(61). С. 3–7.
12. Санакулов К. С., Эргашев У. А. Теория и практика освоения переработки золотосодержащих упорных руд Кызылкумов. – Ташкент : ГП «НИИМП», 2014. – 286 с. 

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 9, pp. 61–63
DOI: 10.17580/gzh.2018.09.08

Improvement of processing technology for rebellious carbonaceous arsenic-bearing gold ore in Uzbekistan

Information about authors

K. S. Sanakulov¹, Rector, Professor, Doctor of Engineering Sciences, rektor@ndki.uz

U. A. Ergashev², Head of Engineering Department, Doctor of Engineering Sciences

A. Dobersek³, Chief Executive Officer, Candidate of Engineering Sciences

¹ Navoi State Mining Institute, Navoi, Uzbekistan

² Navoi Mining and Metallurgical Combinat, Navoi, Uzbekistan

³ Engineering Dobersek GmbH, Mönchengladbach, Germany

Abstract

The modern global market of gold goes through the time of deficiency of high-quality product. Readily recoverable gold reserves are being gradually depleted, and the processing industry is increasingly more frequently fed with gold which is difficult to extract using conventional techniques. For this reason, it is of the current scientific concern and economic significance to find an efficient technology for such gold recovery.

Rebellious ore category includes gold-bearing sulfide ore from the Kokpatas and Daugyztai deposits situated in the Kyzylkum Region of Uzbekistan. The ore features highly variable composition, as well as considerable content of arsenic and carbonaceous matter tightly bonded with sulphides. At this time, ore is processed using a bacterial oxidation plant at deficient gold recovery as against the project. The detailed studies found out that the deficiency was caused by the lack of insight into biocake processing mechanism, which resulted in high loss of recoverable gold. In the studies, some foreign companies were engaged, including Engineering Dobersek GmbH, Germany.

The research findings allowed drawing the conclusion that a dedicated approach to oxidizing roasting of biocakes could essentially improve the process performance. It was decided to use a combination scenario in sulphide ore oxidation. At the first stage, flotation concentrate is to be subjected to biooxidation to dissociate sulphide gold as well as to dissolve considerable portion of arsenic and transfer it into solid state in the form of insoluble scorodite (FeAsO₄). After that, the biooxidation product with low arsenic content undergoes oxidation roasting to dissociate carbonaceous gold and to oxidize sulphide sulphur aggregated with carbon. The roasted product is sent to sorptive cyanidation of gold. By the lab-scale testing data, the highest end-to-end gold recovery is reached in oxidation roasting of tailings after sorptive leaching of biooxidation product. The results of the investigation are patented by the patent entity of the Republic of Uzbekistan.

At the present time, Navoi MMC jointly with the German specialists from Engineering Dobersek GmbH carry out commercial tests of the technology using modern circulating fluidized bed boilers, with a view to subsequent introduction of the method into industry.

Keywords: gold, arsenic, carbonaceous inclusions, material constitution, rebellious ore, ore processing, gold recovery, bacterial oxidation technology.

References

1. Sanakulov K. S. Details of the technology of metal recovery from rebellious and very rebellious arsenic-bearing sulphide gold ore. *Gornyi vestnik Uzbekistana*. 2014. No. 2(57). pp. 33–36.
2. Zaytsev P. V., Fomenko I. V., Chugaev L. V., Shneerson Ya. M. Pressure oxidation of double refractory raw materials in the presence of limestone. *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 8. pp. 41–49. DOI: 10.17580/tsm.2015.08.05
3. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. The Krasnoyarsk Territory primary and complex gold rebellious ores dressability studies. *Obogashchenie Rud*. 2017. No. 3. pp. 21–26. DOI: 10.17580/or.2017.03.04
4. Ignatov D. O., Kayumov A. A., Ignatkina V. A. Selective separation of arsenic-containing sulfide minerals. *Tsvetnye Metally*. 2018. No. 7. pp. 32–38. DOI: 10.17580/tsm.2018.07.05
5. Hu X., Guo X., He M., Li S. pH-dependent release characteristics of antimony and arsenic from typical antimony-bearing ores. *Journal of Environmental Sciences*. 2016. Vol. 44. pp. 171–179.
6. Lu W.-H., Yin Z.-L. Study on thermal decomposition and arsenic removal of a silver bearing copper ore. *International Journal of Mineral Processing*. 2016. Vol. 153. pp. 1–7.
7. Yang T., Rao S., Liu W., Zhang D., Chen L. A selective process for extracting antimony from refractory gold ore. *Hydrometallurgy*. 2017. Vol. 169. pp. 571–575.
8. Wang Y., Xiao L., Liu H., Qian P., Ye S., Chen Y. Acid leaching pretreatment on two-stage roasting pyrite cinder for gold extraction and co-precipitation of arsenic with iron. *Hydrometallurgy*. 2018. Vol. 179. pp. 192–197.
9. Natarajan K. A. Biotechnology of Metals: Principles, Recovery Methods and Environmental Concerns. Amsterdam : Elsevier, 2018. 502 p.
10. Yan van Nickerk. BIOX technology improvement. *Gornyi vestnik Uzbekistana*. 2009. No. 3(38). pp. 69–76.
11. Sanakulov K. S., Mustakimov O. M., Ergashev U. A., Akhmatov N. A. Expediency of combination technologies for processing very rebellious sulphide gold ore. *Gornyi vestnik Uzbekistana*. 2015. No. 2(61). pp. 3–7.
12. Sanakulov K. S., Ergashev U. A. Theory and practice of mastering of processing of gold-bearing refractory Kyzylkumy ores. Tashkent : State Enterprise “Scientific-Research Institute of Mineral Resources”, 2014. 286 p.