

References

1. Svyatetskii V. S., Polonyankina S. V., Ermakov A. G. Uranium-mining industry of Russia: the state and prospects of development. *Prospect of mineral resources*. 2017. No. 11. pp. 22–26.
2. Mitrofanov E. A. Building-up hydrogenic uranium resources toward improvement of uranium supplies base structure. *Proceedings of IV International Symposium. Uranium: Geology, Resources, Production*. Moscow : VIMS, 2017. pp. 68–69.
3. Uranium Geotechnology (Russian Experience): Monograph. I. N. Solodov and E. N. Kamnev (Eds.). Moscow : Universitetskaya kniga, 2017. pp. 21–62.
4. Smirnov K. M., Molchanova T. V., Krylova O. K. et al. Chemical technology for uranium-bearing polymetallic ore processing: State-of-the-art and prospects. *VNIKHIT is 65: Collection of Scientific Papers*. Moscow : Vinpress, 2016. pp. 113–123.
5. Tirskiy A. V., Morozov A. A., Bakharev V. Yu. Development of concentration technology of silicate uranium ores. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 8-2. pp. 40–44.
6. *Technological mineralogy of natural and technogenic deposits : collection of articles of the 9-th Russian technological mineralogy seminar, Magnitogorsk, 22–24 April 2014*. Under the editorship of V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk : Karelia Science Center RAS, 2015. 171 p.
7. Tsybin E. F. Dressing in ore preparation stages. Ekaterinburg : Izdatelstvo UGGU, 2015. 303 p.
8. Tarkhanov A. V., Bugrieva E. P. Value and Prospects of Mineable Geological Uranium Reserves. Moscow : VIMS, 2017. 106 p.
9. Ryabov V., Shepeta E., Kretov V., Golikov V. New dialkyldithiophosphates for the flotation of copper, gold and silver containing ores. *XXVII International Mineral Processing Congress (IMPC) : Proceedings*. Santiago, 2014. Chapter 3. pp. 1–8.
10. Litvinenko V., Morozov A. Improvement of the technology of treatment of uranium ores from the Streltsovsky group of deposits. *Proceedings of the International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014), 23–27 June 2014*. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2014. p. 99.
11. In Situ Leach Uranium Mining: An Overview of Operations. *IAEA Nuclear Energy Series*. No. NF-T-1.4. Viena, 2016. 59 p.
12. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology – current state, innovations and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016. Vol. 37, No. 2. pp. 73–119.
13. Pirmatov E. A., Shmagarev V. K., Rakhmetov M. E. et al. Optimization of uranium–molybdenum processing technology at Stepnogorsk Mining and Chemical Works. *Current Problems of Uranium Industry: Proceedings of VI International Scientific–Practical Conference*. Almaty, Kazakhstan, 2010. pp. 74–78.
14. Pismennaya O. B., Pismennyi B. V. Resource-saving technologies of uranium mining and their economical justification. *Problems of Uranium Industry: Proceedings of VI International Scientific–Practical Conference*. Almaty, Kazakhstan, 2010. pp. 132–136.
15. Koltsov V. Yu., Krinov D. I., Kuznetsov I. V. Use of sulfuric acid in the time of pelletization of uranium ores before their heap leaching. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 7. pp. 90–93.
16. Chemistry of Uranium. B. N. Laskorin and V. F. Myasoedov (Eds.). Moscow : Nauka, 1989. pp. 206–214.
17. Tarkhanov A. V., Bugrieva E. P. Value and Prospects of Mineable Geological Uranium Reserves. Moscow : VIMS, 2017. 106 p.
18. Smirnov K. M., Menshikov Yu. A., Zyukova G. A. Influence of zirconium on difficulty of uranium minerals. *VNIKHIT is 60: Collection of Scientific Papers*. G. A. Sarychev (Ed.). Moscow : Leonardo-Dizain, 2011. pp. 136–144.
19. Shurmel L. B., Shatalov V. V., Molchanova T. V. et al. IR spectroscopy analysis of properties of ionites during uranium sorption and processing of siliferous solutions and pulps. *Atomnaya energiya*. 2001. Vol. 90, Iss. 3. pp. 207–212.

УДК 622.349.5:622.723

ТЕХНОЛОГИЯ РУДОПОДГОТОВКИ И РЕНТГЕНРАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ БЕДНЫХ УРАНОВЫХ РУД В ПОДЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ



А. В. БЕЙДИН,
старший преподаватель,
канд. техн. наук,
beydin@mail.ru

Забайкальский государственный университет,
Чита, Россия



В. А. ОВСЕЙЧУК,
проф.,
д-р техн. наук



А. А. МОРОЗОВ,
директор по науке, технологическому
и инновационному развитию,
канд. техн. наук,
ПАО «ППГХО», Краснокаменск, Россия

Введение

В связи с уменьшением доли богатых руд в отработку все больше вовлекаются рядовые и бедные руды, добыча которых по существующим технологиям становится низкорентабельной или даже убыточной. Ситуация усугубляется также тем, что снижение

Рассматривается технология рудоподготовки бедных урановых руд в условиях подземного рудника, включающая предварительное разделение на классы по крупности с последующей покусковой рентгенорадиометрической сепарацией. Полученные продукты сортировки направляются на дальнейшую переработку по технологиям, позволяющим извлекать уран из руды с получением максимальных объемов готовой продукции в виде концентрата минерального сырья.

Ключевые слова: подземная разработка, бедные урановые руды, грохочение рудной массы, рентгенорадиометрическая сепарация, технологические сорта, выщелачивание урана.

DOI: 10.17580/gzh.2018.07.12

содержания металла сопровождается усложнением горно-геологических и горнотехнических условий. Применение для отработки таких руд высокопроизводительных систем и горного оборудования снижает, как правило, качество добываемого сырья, поступающего на переработку. Компенсация недополученного металла обеспечивается большим объемом добычи, что, в свою очередь, снижает извлечение полезного компонента и увеличивает затраты на гидрометаллургическую переработку. Основным направлением сокращения производственных издержек является создание комбинированных технологий на основе предва-

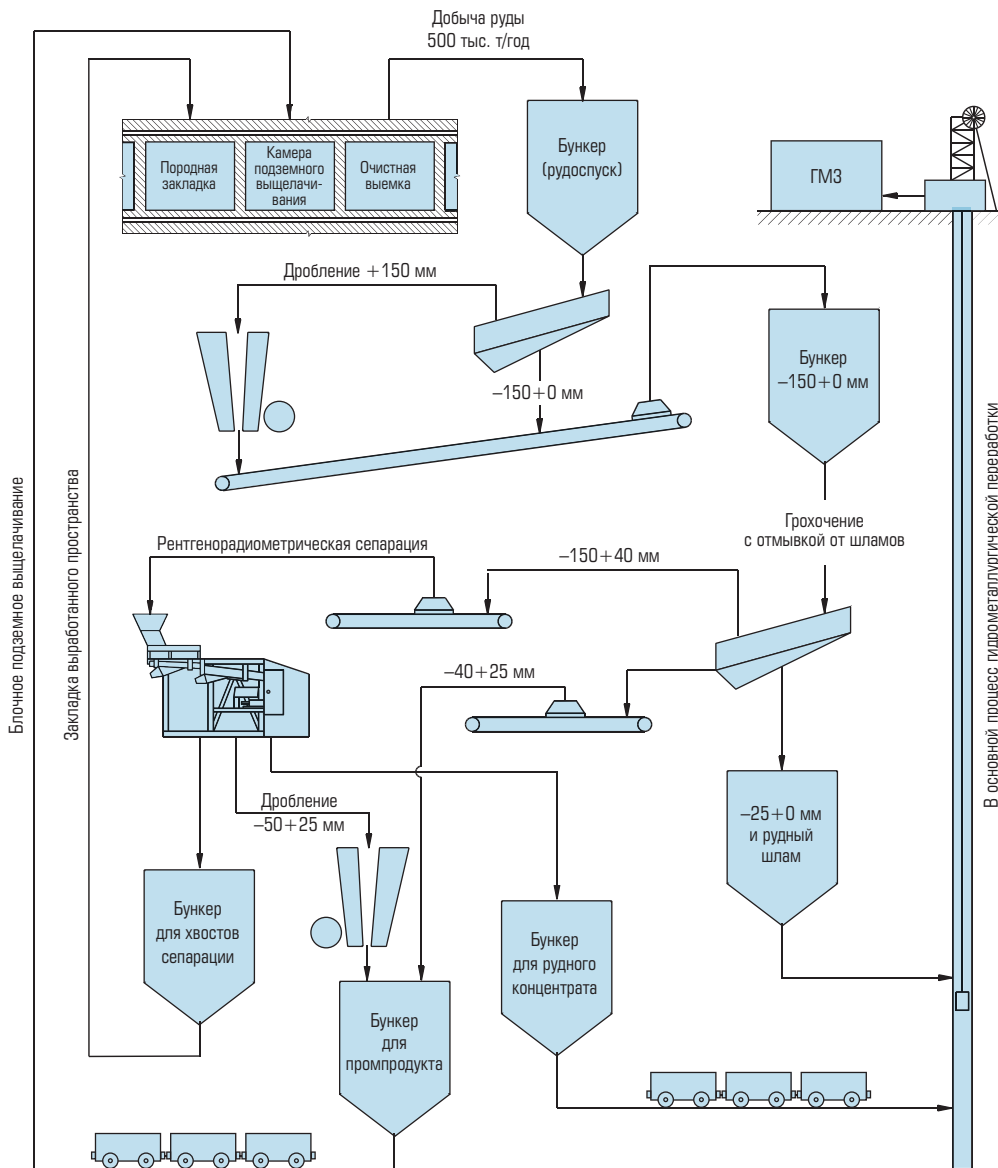


Рис. 1. Технологическая схема рудоподготовки бедных урановых руд в подземных условиях

рительного обогащения добытой рудной массы радиометрическими методами с выделением технологических сортов, переработка которых осуществляется по раздельным технологиям, обеспечивающим максимальный выпуск готовой продукции при минимальных затратах на производство [1–4].

Современные способы рудоподготовки, реализуемые ПАО «ППГХО»

В настоящее время при переработке бедных руд и техногенного сырья наиболее перспективна рудоподготовка на основе радиометрических методов сортировки и сепарации. Использование данных методов позволяет выделить из рудной массы от 20 до 80 % отвального продукта, который может использоваться в качестве строительного или закладочного материала [5–7].

В ПАО «ППГХО» при сортировке бедных и рядовых урановых руд наиболее широкое распространение получил рентгенорадиометрический метод, который при проведении опытно-промышленных испытаний показал эффективность выделения хвостов на уровне 89–93 % [8, 9]. Однако существующая технологическая схема рудоподготовки не всегда обеспечивает экономическую эффективность данного процесса из-за низкого содержания металла в исходной руде. На качество добываемого сырья, помимо горногеологических и технологических показателей, существенно влияют особенности технологических процессов добычи и транспортирования руды. По этим причинам совершенствование технологических схем добычи и переработки урана, направленных на формирование руды повышенного качества, является актуальной научно-технической задачей.

Наличие положительных результатов при испытаниях рентгенометрических средств сепарации, в том числе опытно-промышленных, на предприятиях по добыче руд цветных, редких и благородных металлов позволяет рассмотреть возможность создания технологий с внутрирудничной предконцентрацией [7–9]. Предлагаемая технологическая схема рудоподготовки в подземных горных выработках (рис. 1) предусматривает вовлечение в отработку руд с низким содержанием урана. Отличительной особенностью данной схемы является использование в процессе подземной добычи руды промежуточных и хвостовых продуктов, полученных в результате предварительной сортировки [10]. Технологическое оборудование для предварительного обогащения добытой рудной массы размещают в подземном рудосортировочном комплексе (рис. 2), который включает: накопительный рудоспуск, аккумулирующий добытую рудную массу; подземный бункерный комплекс, включающий камеры дробления, грохочения и сортировки руды; горнотранспортные системы. Рудосортировочный комплекс размещают в непосредственной близости от главных вскрывающих выработок за пределами зон разрушающих сейсмических воздействий от взрывных работ и возможного сдвижения горных пород при добыче руды. Такое расположение комплекса обеспечит безопасность работ и сохранность подземных камер, эффективное их проветривание, наименьшие затраты на транспортирование и подъем рудного концентрата. Транспортные системы рудосортировочного комплекса, связывающие между собой потоки руды, базируются как на уже существующем внутришахтном оборудовании, так и на использовании новых высокопроизводительных комплексов конвейерного, самоходного и локомотивного транспорта.

Выпущенную из очистных камер руду транспортируют в накопительный рудоспуск и подвергают предварительному грохочению. Выделенные куски крупностью +150 мм дополнительно измельчают в щековой дробилке и затем объединяют с подрешетным продуктом в общем аккумулирующем бункере объемом не менее 1500 м³. На второй стадии грохочения руду отмыывают от шламовых и илистых частиц, разделяют на три потока: надрешетный продукт (машинный класс крупности –150+40 мм); подрешетный продукт (несортируемый класс крупности –40+25 мм – не подвергается рентгенометрической сепарации из-за низкой производительности и эффективности процесса); подрешетный продукт (обогащенная рудная мелочь крупности –25+0 мм и шлам).

Обогащенную часть руды размещают в рудоспуске, откуда в последующем выдают на поверхность и перерабатывают по гидрометаллургической технологии. Классы крупности –150+40 мм и –40+25 мм по наклонным конвейерным выработкам направляют в технологическую камеру сортировки. Машинный класс сортируют на рентгенометрических сепараторах российского производства типа СРФ (ООО «РАДОС», ООО «КРАСРАДОС», Красноярск) с разделением руды на три технологических типа: концентрат, промпродукт, хвосты [11]. Каждый продукт, полученный в результате сортировки руды, размещают в отдельном накопительном бункере (рудоспуске). Объемы рудоспусков должны

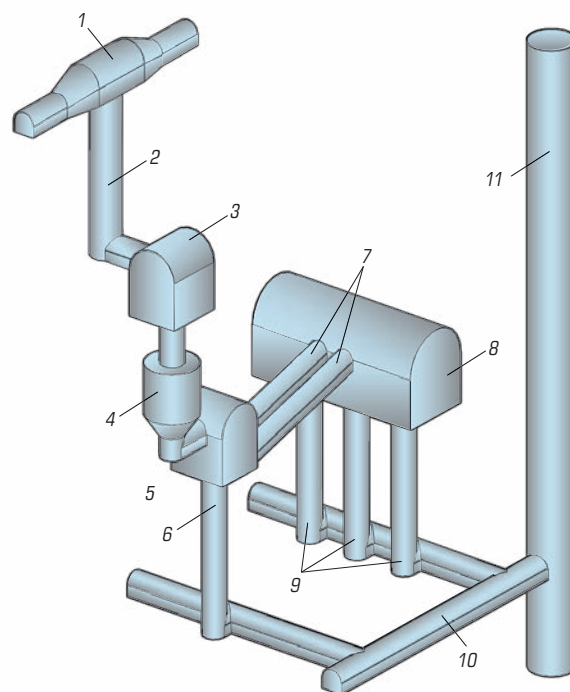


Рис. 2. Структурная схема подземного рудосортировочного комплекса:

1 – разгрузочный пункт с опрокидывателем; 2 – накопительный рудоспуск; 3 – камера дробления руды; 4 – аккумулирующий бункер; 5 – камера грохочения руды; 6 – рудоспуск для обогащенной руды; 7 – транспортные наклонные выработки; 8 – камера сортировки руды с рентгенометрическими сепараторами; 9 – рудоспуски для концентрата, промпродукта и хвостов сепарации; 10 – выработки откаточного горизонта; 11 – рудовыдачный ствол

Таблица 1. Результаты ситового анализа бедной урановой руды

| Класс крупности, мм | Масса, кг | Выход, % | Содержание U, % | Извлечение U, % |
|---------------------|-----------|----------|-----------------|-----------------|
| +300 | 774,3 | 9,54 | 0,011 | 0,95 |
| –300+200 | 363,6 | 4,48 | 0,016 | 0,65 |
| –200+100 | 598,5 | 7,37 | 0,030 | 2,01 |
| –100+60 | 787,6 | 9,70 | 0,070 | 6,17 |
| –60+25 | 1361,6 | 16,77 | 0,098 | 14,94 |
| –25+10 | 1359,2 | 16,74 | 0,129 | 19,63 |
| –10+5 | 610,6 | 7,52 | 0,142 | 9,71 |
| –5+0 | 2078 | 25,59 | 0,177 | 41,18 |
| Шлам | 185,3 | 2,28 | 0,228 | 4,73 |
| Итого | 8118,8 | 100 | 0,110 | 100 |

быть рассчитаны на прием продуктов, обеспечивающих двухступенчатую производительность комплекса.

Рудный концентрат по шахтному стволу выдают на поверхность и перерабатывают на гидрометаллургическом заводе, промпродукт после дополнительного дробления объединяют с

несортируемым классом крупности $-40+25$ мм в одном рудоспуске и направляют в ранее подготовленную камеру для подземного выщелачивания. Хвосты сепарации (пустую породу) размещают в отработанных очистных камерах в качестве сухого закладочного материала. Таким образом, каждый отсортированный продукт направляют на дальнейшую переработку по технологии, позволяющей извлечь уран из руды с получением максимальных объемов готовой продукции в виде концентрата минерального сырья.

Дополнительное дробление промпродукта обусловлено необходимостью максимального извлечения урана из выщелачиваемой руды. Проведенные исследования позволили установить, что оптимальным для руд, локализованных в трахидацитах, является

размер куска $-50+25$ мм, при выщелачивании которого можно извлечь до 80 % запасов урана [12].

Результаты исследований по обоснованию предлагаемой технологии

При обосновании предлагаемой технологии было изучено влияние крупности сортируемого материала на основные технологические показатели рудоподготовки [13]. Объектом исследований являлась представленная силикатным типом бедная по содержанию урана рудная масса, сформированная в процессе скважинной отбойки в очистном блоке 4Д-809, разрабатываемом по системе подэтажных штреков. Гранулометрический состав отбитой рудной массы определяли методом ситового анализа (табл. 1).

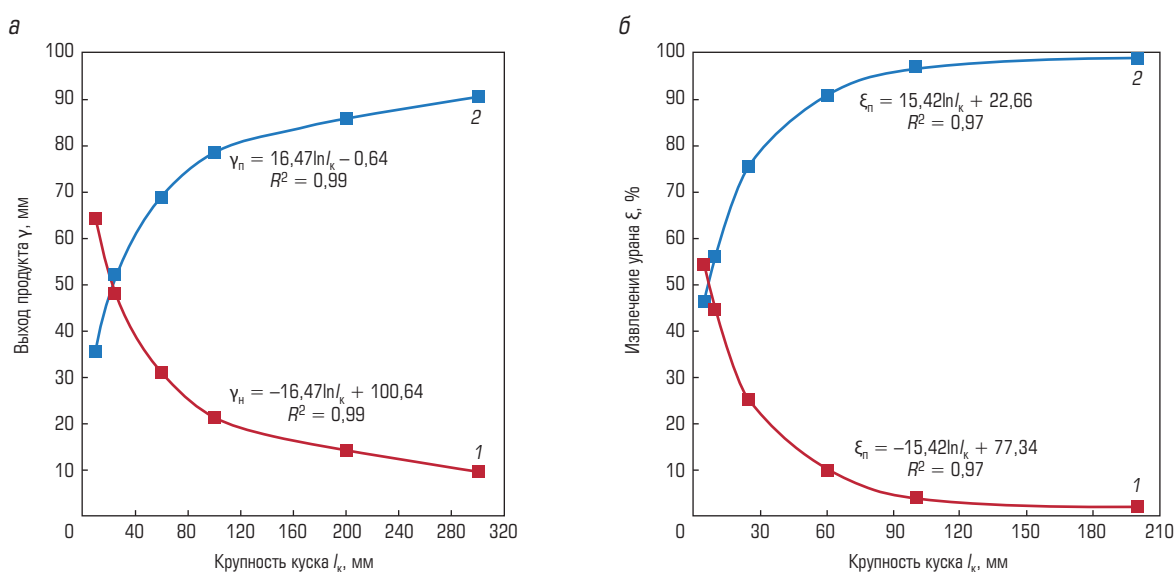


Рис. 3. Выход (а) и извлечение (б) урана в надрешетный (1) и подрешетный (2) продукты в зависимости от крупности куска при грохочении бедных урановых руд

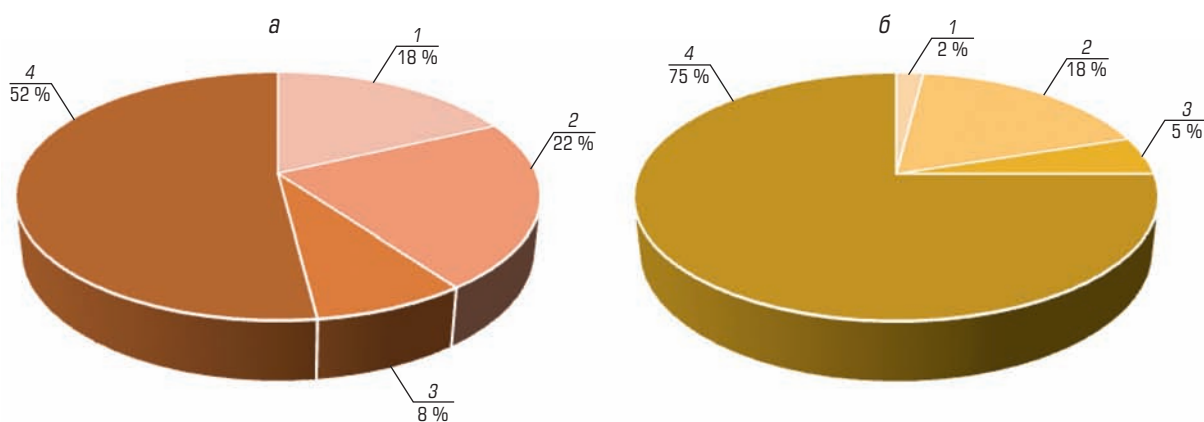


Рис. 4. Распределение сортов руды по технологиям для последующей переработки (а) и количество урана, содержащегося в них (б) после стадии грохочения:

1 – хвосты сортировки; 2 – промпродукт для РРС; 3 – промпродукт для ПВ; 4 – концентрат для ГМТ

Проведенный анализ показал, что на стадии предварительного грохочения класс крупности +150 мм может быть выведен из технологического процесса сортировки, так как содержит забалансовые концентрации металла (0,02 % U). Доля данного продукта в среднем составляет 18 % всей рудной массы, в нем содержится около 2 % урана от имеющегося в исходной руде (рис. 3). Непосредственно в машинный класс –150+40 мм, формируемый для рентгенорадиометрической сепарации, выделяется 22 % общего объема рудной массы, в которой заключено 18 % урана со средним содержанием 0,054 %. В классе крупности –40+25 мм формируется 8 % руды, в которой находится 5 % урана. Данный продукт не содержит илов, затрудняющих фильтрацию рабочих растворов, и является благоприятным для подземного выщелачивания.

Класс крупности –25+0 мм имеет наибольший выход рудной массы (50 %) и в большей степени обогащен ураном по сравнению с исходной рудой (70 %). Увеличение количества урана в мелких классах объясняется тем, что крепость вмещающих пород выше, чем минеральных образований, содержащих уран, и поэтому в процессе их отбойки происходит интенсивное измельчение. По содержанию урана продукт относится к богатым рудам (0,15 %) и может эффективно перерабатываться с использованием гидрометаллургической технологии. Выход шламов, образовавшихся в процессе отмывки рудной массы, составляет около 2 % исходной руды; в них сосредоточено 5 % урана с содержанием 0,228 % (рис. 4).

Дальнейшие исследования были направлены на определение технологических показателей покусковой рентгенорадиометрической сепарации бедных урановых руд в трех классах крупности: –200+100, –100+60 и –60+25 мм [13]. Всего на технологических пробах было проведено восемь опытов (табл. 2).

В ходе проведенных исследований установлено, что технологические показатели рентгенорадиометрической сепарации бедных урановых руд в зависимости от класса крупности рудной массы изменяются следующим образом: выход концентрата колеб-

Таблица 2. Технологические показатели покусковой рентгенорадиометрической сепарации бедных урановых руд

| Класс крупности, мм | Продукт сепарации | Масса, кг | Выход, % | Содержание U, % | Извлечение U, % |
|---|-------------------|-----------|----------|-----------------|-----------------|
| <i>Объединенные показатели по опытам 1, 2</i> | | | | | |
| –200+100 | Концентрат | 134,3 | 11,23 | 0,126 | 61,5 |
| | Хвосты | 1061,6 | 88,77 | 0,010 | 38,5 |
| | Исходный | 1195,9 | 100 | 0,023 | 100 |
| <i>Объединенные показатели по опытам 3, 4, 5, 6</i> | | | | | |
| –100+60 | Концентрат | 190,9 | 12,28 | 0,134 | 60,9 |
| | Хвосты | 1363,7 | 87,72 | 0,012 | 39,1 |
| | Исходный | 1554,6 | 100 | 0,027 | 100 |
| <i>Объединенные показатели по опытам 7, 8</i> | | | | | |
| –60+25 | Концентрат | 29,4 | 25,5 | 0,373 | 92,3 |
| | Хвосты | 85,7 | 74,5 | 0,011 | 7,7 |
| | Исходный | 115,5 | 100 | 0,103 | 100 |

лется от 11 до 25 %; выход хвостов сепарации изменяется от 74 до 89 %; извлечение урана в концентрат составляет от 61 до 92 %. Кроме того, отмечено, что извлечение урана повышается с ростом крупности кусков руды от +25 до –200 мм. Это обстоятельство позволяет сделать вывод, что руда забойной крупности не требуют дополнительного дробления. В результате реализации полного комплекса рудоподготовки (рис. 5) получены технологические сорта, которые могут эффективно перерабатываться по технологиям, позволяющим извлекать максимальное количество металла из руд.

Исходя из результатов представленного анализа, для заполнения объема подземной камеры, дополнительно подготовленной для выщелачивания отсортированного промпродукта (12 %), с учетом разрыхления рудной массы потребуются осуществить рудоподготовку пяти аналогичных по объему камер. Общее количество хвостов (35 %), образовавшихся при сортировке рудной

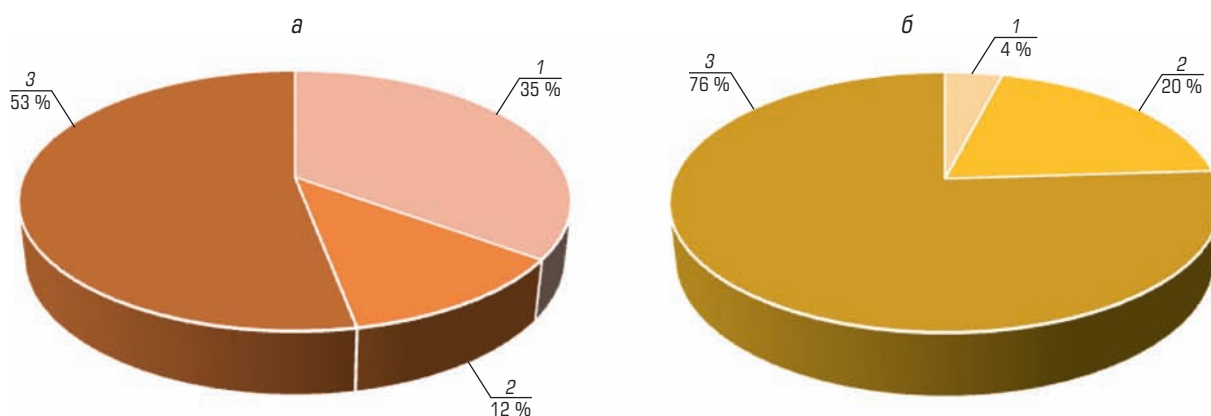


Рис. 5. Распределение сортов руды по технологиям для последующей переработки (а) и количество урана, содержащегося в них (б) после полной рудоподготовки:

1 – хвосты сортировки; 2 – промпродукт для ПВ; 3 – концентрат для ГМТ

массы, добытой из пяти камер, может быть полностью размещено в оставшихся четырех. Рудный концентрат (53 %), состоящий из рудной мелочи, шламов и небольшой доли богатой руды выделенной при рентгенорадиометрической сепарации, будут перерабатывать на поверхности.

Заключение

Таким образом, на ПАО «ППГХО» разработаны технология рудоподготовки бедных урановых руд в подземных условиях, а также структурная схема подземного рудосортировочного комплекса.

Предлагаемая технология рудоподготовки бедных руд в условиях подземного рудника позволит повысить эффективность ра-

боты уранодобывающего предприятия за счет увеличения объемов выпуска готовой продукции, уменьшить количество выдаваемой на поверхность рудной массы, сократить затраты, связанные с ее транспортированием, снизить экологическую нагрузку на окружающую среду в районе деятельности предприятия путем уменьшения числа отвальных и хвостовых сооружений на поверхности.

Библиографический список

См. англ. блок. ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 7, pp. 63–68
DOI: 10.17580/gzh.2018.07.12

Technology of underground pretreatment and X-ray radiometric separation of low-grade uranium ore

Information about authors

A. V. Beidin¹, Senior Lecturer, Candidate of Engineering Sciences, beydin@mail.ru

V. A. Ovseichuk¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences

A. A. Morozov², Director for Science, technology and Innovative Development, Candidate of Engineering Sciences

¹Transbaikal State University, Chita, Russia

²Priargunsky Mining and Chemical Works, Krasnokamensk, Russia

Abstract

In view of depletion of high-grade ore, extraction of medium- and low-grade ore is started, which is low-profitable or even loss-making in case of using the current technologies.

Priargunsky Mining and Chemical Works has developed an underground pretreatment technology for low-grade uranium ore and a structural layout of underground ore grading. The pretreatment technology is meant for ore with low uranium content. A feature of this technology is application of middlings and tailings of the preliminary grading in the underground mining processes. The use of the proposed low-grade ore pretreatment technology will enhance efficiency of an underground uranium mine owing to increased final product output, decreased quantity of ore lifting to the ground surface, reduced cost of haulage, as well as mitigated environmental pressure in the mining area due to reduction in dumps and tailings storages on the ground surface.

Keywords: underground mining, low-grade uranium ore, ore screening, X-ray radiometric separation, process grades, uranium leaching.

References

1. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Stradanchenko S. G., Haleva Z. M. Principles and economic efficiency of combined technologies of ore extraction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. GeoAssets Engineering*. 2015. Vol. 326, No. 7. pp. 6–14.

- Mantero J., Gázquez M. J., Hurtado S., Bolívar J. P., García-Tenorio R. Application of gamma-ray spectrometry in a NORM industry for its radiometrical characterization. *Radiation Physics and Chemistry*. 2015. Vol. 116. pp. 78–81.
- Gandhi S. M., Sarkar B. C. *Essentials of Mineral Exploration and Evaluation*. Amsterdam : Elsevier, 2016. 406 p.
- Heck S., Rogers M. *Resource Revolution: How to Capture the Biggest Business Opportunity in a Century*. Amazon Publishing, 2014. 256 p.
- Knapp H., Neubert K., Schropp C., Wotruba H. Viable applications of sensor based sorting for the processing of mineral resource. *ChemBioEng Reviews*. 2014. Vol. 1, No. 3. pp. 86–95.
- Chanturia V. A. Innovated processes in refinement technologies for raw materials of complex minerals. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2009. No. 12. pp. 9–25.
- Lizunkin V. M., Tsarev S. A., Fedorov Yu. O. X-ray radiometric separation is the way to raising resource provision of ore mining enterprises. *Gornyi Zhurnal*. 2011. No. 3. pp. 93–96.
- Litvinenko V. G., Sukhanov R. A., Tirskiy A. V., Tupikov D. G. Improvement of the technology of X-ray radiometric concentration of uranium ores. *Gornyi Zhurnal*. 2008. No. 8. pp. 54–58.
- Kobzev A. S. Trends of development and problems related to sensor-based mineral sorting. *Obogashchenie Rud*. 2013. No. 1. pp. 13–17.
- Lizunkin V. M., Morozov A. A., Beidin A. V. Combined extraction geotechnology with X-ray radiometric sorting and leaching of uranium from poor ore mass in underground conditions. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 8(2). pp. 21–25.
- Korotkevich V. A., Kukhareno I. E., Belyak A. A., Korotkevich E. V. Innovative technologies and equipment in mineral pretreatment. *Dobyvayushchaya promyshlennost*. 2017. No. 2. pp. 168–172.
- Beidin A. V., Ovseichuk V. A., Morozov A. A. The researches of leachability of ores mined by chamber systems, depending on subsurface conditions and technological factors. *Vestnik Zabaikalskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017. No. 9. pp. 4–11.
- Beidin A. V., Ovseichuk V. A., Morozov A. A. Researches on washability of ores, procured by chambered systems, depending on dimension of a chunk of sorted ore mining mass. *Vestnik Zabaikalskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017. Vol. 23, No. 8. pp. 33–40.