

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ УРАНА

А. М. Зозуля¹, В. А. Овсейчук¹

¹ Забайкальский государственный университет, Чита, Россия

Аннотация: ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» более 50 лет отрабатывает запасы урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. За этот период большая часть богатых руд была отработана традиционной горно-физической технологией. Доля же бедных и рядовых руд остается все еще значительной, но традиционная технология не обеспечивает необходимый уровень рентабельности. Поэтому широкое внедрение физико-химической технологии – подземное блочное (БПВ) и кучное выщелачивание (КВ) – может стать решающим моментом в продолжении эксплуатации этих месторождений. Кучное выщелачивание получило достаточно широкое применение на предприятии. Попытка же промышленного внедрения подземного выщелачивания не увенчалась успехом. Причиной неудачи явились неэффективная взрывная рудоподготовка минерального сырья к выщелачиванию и кольтматационные процессы, препятствующие интенсификации протекания химических реакций при взаимодействии выщелачивающего реагента (серной кислоты) с рудными минералами. Научно-исследовательские работы, проводимые совместно сотрудниками ЗаБГУ и ПАО ППГХО, позволили выявить причины неэффективного внедрения технологии БПВ при разработке урановых месторождений Стрельцовского рудного поля и предложить новые пути решения вопроса по широкому применению БПВ для отработки бедных урановых руд. В данной статье рассмотрен вопрос повышения извлечения урана в раствор за счет изменения pH среды и формирования «магазина» выщелачиваемой рудной массы размещением более богатой части руды в нижней части камеры, а бедной руды – в верхней. Как показали опытные работы, это позволит повысить извлечение урана на 10–20 %.

Ключевые слова: бедная урановая руда, замагазинированная горнорудная масса, блочное подземное выщелачивание (БПВ), кислотность среды, физико-химическая геотехнология, продуктивный раствор, гидроксид, уранила, кольтматация.

Для цитирования: Зозуля А. М., Овсейчук В. А. Повышение эффективности подземного выщелачивания за счет снижения технологических потерь урана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-1. – С. 17–25. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_17.

In-situ uranium leaching efficiency improvement by way of in-process loss reduction

A. M. Zozulia¹, V. A. Ovseychuk¹

¹ Transbaikal State University, Chita, Russia

Abstract: Priargun Mining and Chemical Association has been producing uranium on the Streltsovo ore field for more than 50 years. Over this period, the most of high-grade ore is extracted using the conventional physical technology. Low-grade crude ore reserves are large but the conventional technology fails to ensure wanted profitability. For this reason, wide introduction of physicochemical treatment using the methods of in-situ leaching and heap leaching can be a turning point in the further operation of this field. Heap leaching is widely applied at Priargun MCA. Commercial-scale introduction of in-situ leaching went wrong. The cause of the misfortune was inefficient blasting pre-treatment of ore before leaching; for another thing, mudding prevented speeding-up of chemical reactions in interaction of a leaching agent (sulfuric acid) and ore minerals. The research and development implemented jointly by the Transbaikal State University and Priargun MCA revealed the causes of in-situ leaching ineffectiveness in uranium production on the Streltsovo ore field. Furthermore, new ways are proposed for the wider application of in-situ leaching in uranium production from low-grade ore. This article discusses improvement of uranium recovery in solution by way of adjustment of a pH value in the medium, as well as by shrinkage of leached ore, with placement of higher grade ore at the bottom of a stope and lower grade ore at the top of the stope. The experiments prove that this approach can improve uranium recovery by 10–20%.

Key words: low-grade uranium ore, ore and rock shrinkage, in-situ leaching, acidity, physicochemical geotechnology, pregnant solution, uranyl hydroxide, mudding.

For citation: Zozulia A. M., Ovseychuk V. A. In-situ uranium leaching efficiency improvement by way of in-process loss reduction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3-1):17–25. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_17.

Введение

Технология выщелачивания урановых, руд замагазинированных в подземных камерах, является объектом исследований, изложенных в данной статье. Предметом исследований является процесс потери урана при переводе его в подвижное состояние, т. е. в раствор, в процессе химических реакций выщелачивания происходят за счет образования нерастворимого гидроксида уранила, выпадающего в осадок. Величина потерь достигает 20–25 %. Исходя из этого формулируется цель исследований: повышение извлечения урана в раствор. Для достижения этой цели были поставлены задачи:

1. Установить условия образования гидроксида уранила, места его локализации в пределах камеры-магазина.

2. Разработать технологию предотвращения образования гидроксида уранила в процессе выщелачивания.

В процессе решения поставленных задач авторы провели анализ опыта проведения работ по подземному выщелачиванию на предприятиях Минсредмаша СССР и ГК «Росатом» [1], исследовали химизм процесса выщелачивания, температурный режим среды, где протекают эти реакции, вещественный и минеральный состав выщелачиваемых руд и их физико-механические свойства.

В процессе исследований был использован такие методы, как анализ, лабораторные испытания, опытные работы, метод реконструкции и компьютерного моделирования.

Анализ процесса выщелачивания урана. Процесс выщелачивания урана можно разделить на три этапа:

- закисление замагазинированной рудной массы;
- активная стадия выщелачивания;
- довыщелачивание замагазинированной руды.

На стадии закисления отмечается рост концентрации урана, переходящего в раствор, при этом кислотность среды находится на высоком уровне, концентрация серной кислоты поддерживается на уровне 30–35 г/л.

При переходе в стадию активного выщелачивания концентрация серной кислоты падает до 10–15 г/л, и именно на этот период приходится максимальная величина урана, переходящего в раствор. Далее концентрация серной кислоты в выщелачивающем растворе понижается до 5–7 г/л и через некоторое время количество урана, переходящего в раствор, резко падает. Можно было предположить, что падение количества урана, переходящего в раствор, связано со снижением концентрации серной кислоты в выщелачивающем растворе, но простое повышение концентрации серной кислоты не приводит к увеличению выхода урана в раствор.

Анализ химизма процесса выщелачивания показывает, что на момент резкого падения концентрации урана в растворе сокращается доля шестивалентного урана, который легко поддается выщелачиванию и возрастает доля четырехвалентного урана, более упорного к процессу выщелачивания серной кислотой.

Динамика накопления урана в продуктивном растворе показана на рис. 1, 2 на примере работы эксплуатационного блока при выщелачивании скальных руд и при подземном скважинном выщелачивании на гидрогенном месторождении «Хиагда».

Традиционно для повышения извлечения урана используют в качестве дополнительного окислителя трехвалентное железо. В процессе химических реакций трехвалентное железо переходит в двухвалентное состояние и теряет свои окислительные свойства. Чтобы вернуть его в трехвалентное

состояние применяется нитрит натрия [2], воздействие которого возвращает железо в трехвалентную форму. Использование трехвалентного железа как дополнительного окислителя достаточно дорого и не приводит к значительному повышению эффективности выщелачивания.

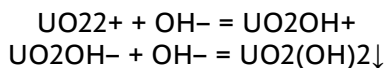
В процессе дальнейшего активного выщелачивания концентрация урана в растворе постепенно падает по мере сработки запасов урана в замагазинированной массе руды [1, 3].

Таким образом, появилась необходимость поиска путей повышения эффективности сернокислотного выщелачивания урановых руд.

Образование гидроксида уранила — причина снижения эффективности выщелачивания. При орошении замагазинированной урановой руды рабочие растворы, содержащие серную кислоту, двигаются сверху вниз. В процессе выщелачивания уран в ионной форме переходит в раствор, образуя фронт продуктивных растворов, который также движется сверху вниз. В процессе движения фронтов выщелачивающих и продуктивных растворов концентрация серной кислоты в выщелачивающем растворе падает, а концентрация урана в продуктивной растворе возрастает [4, 5].

Зависимости концентрации образовавшихся ионов урана от кислотности среды приведены на рис. 3.

Установлено, что при выщелачивании образуется гидроксид уранила по схеме [11, 16]:



Образовавшийся гидроксид уранила выпадает в осадок в нижней части камеры-магазина. Если повысить кислотность раствора, переотложенное

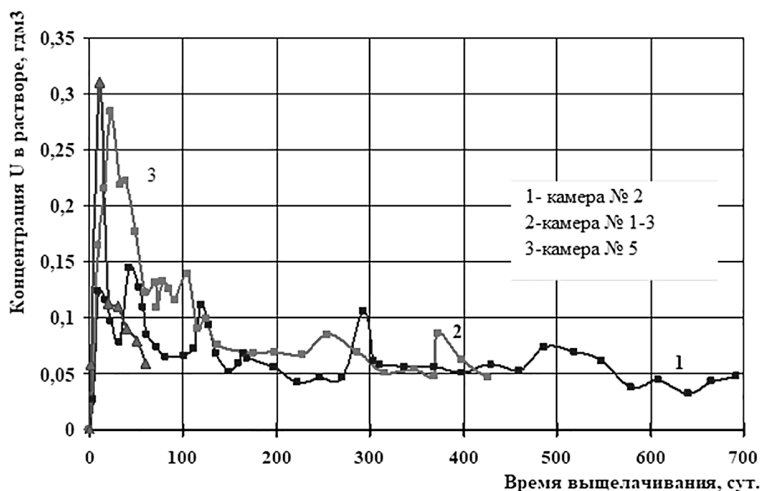


Рис. 1. Содержание урана в ПР* при отработке блока 4Д-701 (ПАО «ППГХО им. Е. П. Славского»): ПР* – продуктивный раствор
 Fig. 1. Uranium content in PS* at working off of the block 4D-701 (JSC «PIMCU them. E. P. Slavsky»): PS* – productive solution

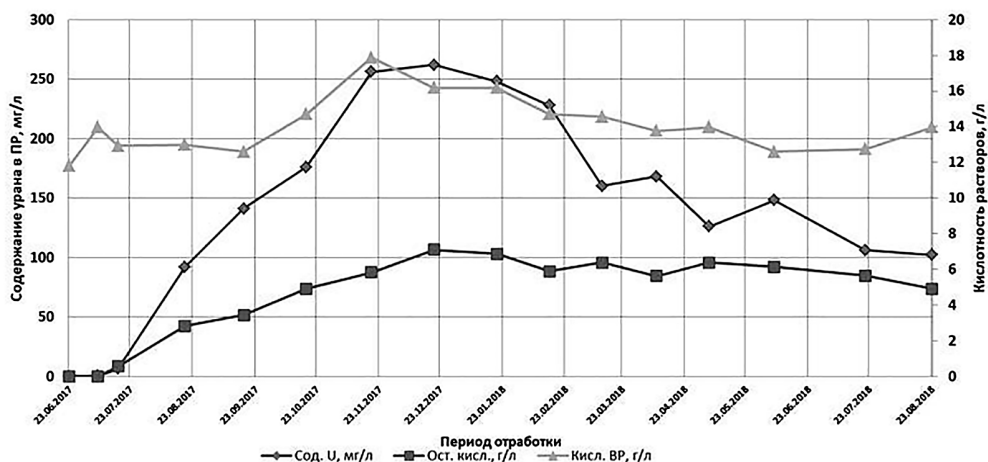


Рис. 2. Содержание урана в ПР одной из скважин (АО «Хиагда»)
 Fig. 2. Uranium content in PR of one of the wells (JSC «Khiagda»)

вещество снова растворяется, переходя в подвижное состояние.

Из зависимостей на рис. 3 видна динамика накопления урана в продуктивном растворе по мере движения фронта сверху вниз. При содержании серной кислоты в растворе 10–15 г/л

рН составляет 1,8–2,0, остаточная кислотность 5,0–5,5 г/л [2]. Установлено, что по мере снижения кислотности раствора повышается доля гидроокиси урана, выпадающей в осадок, что приводит к дополнительным потерям урана [6, 7].

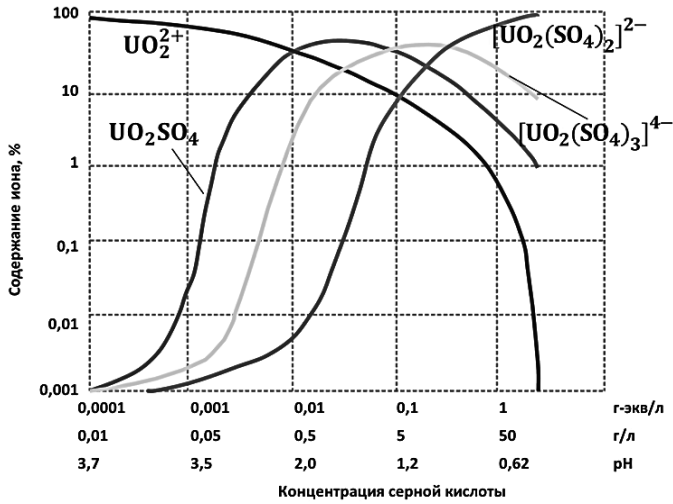


Рис. 3. Зависимости концентрации образовавшихся ионов урана от кислотности среды
 Fig. 3. Dependencies of the concentration of ions formed of the uranium from the acidity of the medium

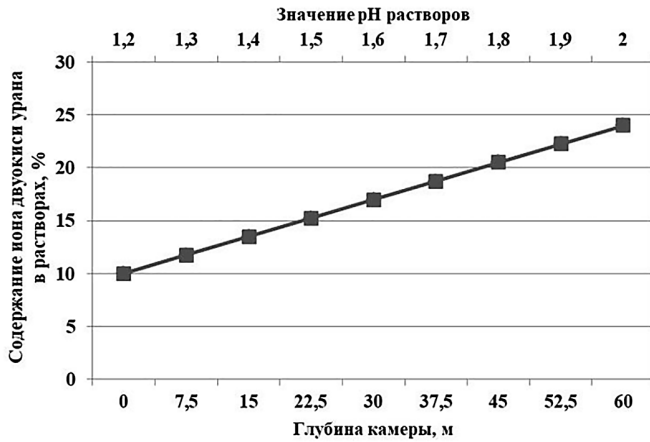


Рис. 4. График переотложения $UO_2(OH)_2$ в зависимости от глубины камеры-магазина
 Fig. 4. Resampling schedule $UO_2(OH)_2$ in dependence from the depth of the camera store

Зависимость доли урана, выпадающего в осадок, от высоты камеры и значения pH приведена на рис. 4.

Предлагаемая технология повышения кислотности среды выщелачивания. Предлагается заложить дополнительный горизонт орошения в камере-магазине. Место заложения обосновывается технико-экономическим расчетом.

На уровне заложения нового горизонта орошения бурятся горизонтальные скважины, которые обсаживаются перфорированными полиэтиленовыми трубами. Через скважины подается выщелачивающий раствор с расчетной концентрацией серной кислоты, достаточной для перевода гидроокиси урана в подвижное состояние [8, 9].

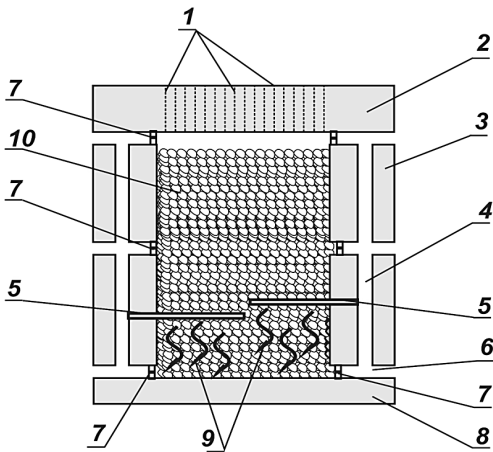


Рис. 5. Схема подкисления нижней части блока ПВ: 1 – оросительная система; 2 – потолочина; 3 – междукамерный целик; 4 – вентиляционно-ходовой восстающий; 5 – перфорированный трубопровод; 6 – дренажный штрек; 7 – герметичная перемычка; 8 – днище камеры; 9 – линии тока ВР; 10 – замагазинированная горнорудная масса

Fig. 5. Acidification scheme of the lower part of the UL block: 1 – irrigation system; 2 – ceiling; 3 – inter-chamber pillar; 4 – ventilation-way raise; 5 – perforated pipeline; 6 – drainage of the roadway; 7 – sealed crosspiece; 8 – the bottom of camera; 9 – the line of current BP; 10 – loosened ore

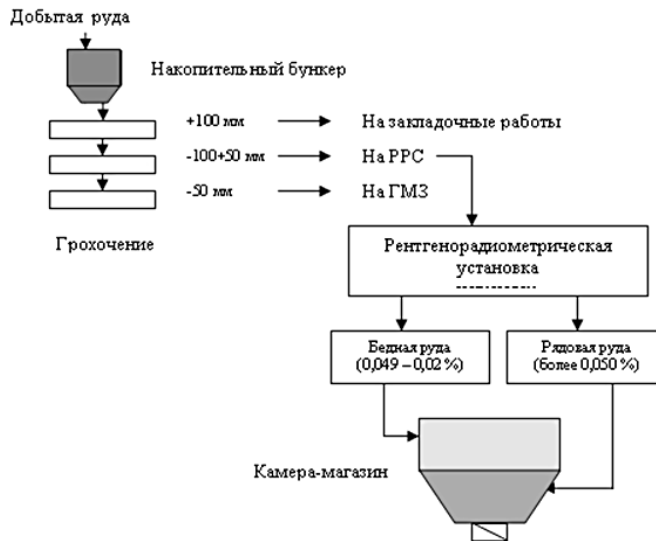


Рис. 6. Схема рудоподготовки камеры к выщелачиванию

Fig. 6. The scheme of an ore dressing of the scoop to leaching

Схема дополнительного орошения камеры приведена на рис. 5.

Предотвращение переотложения урана в камере при выщелачивании.

Предлагается формировать магазин-камеру размещением богатой руды в нижней части камеры, бедной руды – в верхней [10, 11]. Это позволит выщелочить относительно небольшое количество урана из бедной части руды и транспортировать продуктивные растворы из верхней части камеры вниз.

Суммарно повышенная кислотность выщелачивающих растворов, поданных через дополнительный горизонт орошения и остаточная кислотность растворов, поступивших из верхней части «магазина», позволят повысить показатель извлечения урана в раствор за счет предотвращения переотложения урана в виде гидроксида [12, 13].

Учитывая низкую карбонатность руд (менее 4,5 %) значительного повышения расхода серной кислоты при при-

менении предлагаемой технологии не происходит [14, 15].

Схема рудоподготовки представлена рис. 6.

Рудоподготовку горнорудной массы для выщелачивания предлагается производить методом грохочения [16, 17]. Отбитая руда с заданным гранулометрическим составом подается на грохоты с разделением на три класса крупности:

–50 мм (обогащенная рудная мелочь) выдается на поверхность и направляется на гидрометаллургическую переработку;

+50–100 мм подвергается рентгенорадиометрической покусковой сепарации с выделением обогащенного про-

дукта (содержание урана более 0,05 %) для заполнения нижней части камеры и бедной фракции (содержание урана менее 0,05 % до 0,02 %) для заполнения верхней части камеры;

+100 мм (содержание урана менее 0,02 %) направляется на приготовление пороодо-бетонной закладки.

Вывод

Внедрение предложенной технологии повышения эффективности подземного выщелачивания позволяет повысить извлечение урана в раствор на 15–20 % за счет предотвращения его переотложения в виде гидроокиси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солодов И. Н., Полонянкина С. В., Воробьева Л. Ю., Носков М. Д., Иванов А. Г. Устранение потерь и разубоживания урана при скважинном подземном выщелачивании // Разведка и охрана недр. Москва: ВНИИМС им. Н. М. Федоровского, 2018. Вып. № 7. С. 52 – 58.

2. Кочкин Б. Т., Солодов И. Н., Ганина Н. И., Рекун М. Л., Тарасов Н.Н., Шугина Г. А., Шулик Л. С. Геохимические особенности рудовмещающей среды на месторождениях урана Хиагдинского рудного поля // Геология рудных месторождений. Москва: РАН, 2017. Вып. № 5. С. 349 – 362.

3. Сакиро Г. К., Истомин А. Д., Носков М. Д., Чеглоков А. А. Оптимизация отработки блоков при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания // Известия высших учебных заведений. Физика. Томск: НИ ТПУ, 2014. Том 57 № 2–2. С. 67–70.

4. Шрайнер А. Э. Применение нерегулярных схем расположения скважин при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания // Сборник статей по материалам XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М. И. Кучина. Томск: НИ ТПУ, 2017. С. 606 – 607.

5. L. Castro, M. L. Blázquez, F. González, J. A. Muñoz, and A. Ballester, “Reductive leaching of jarosites by *Aeromonas hydrophila*,” *Minerals Engineering*, vol. 95, pp. 21–28, 2016.

6. Голик В. И. Анализ полноты выщелачиваемости урана в кучах / Маркшейдерия и недропользование. Москва: ООО «Геомар Недра», 2017. Вып. № 3 (89). С. 24 – 33.

7. Аликулов Ш. Ш. Математическое моделирование фильтрации растворов подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд // Известия высших учебных заведений. Екатеринбург: УрГГУ, 2017. Вып. № 5. С. 95 – 101.

8. Акимов А. М., Котельникова С. А. Разработка и испытание исследовательского комплекса для выщелачивания урана из горных отвалов уранодобывающих шахт // Сборник статей по материалам научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности». Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2016. С. 238 – 241.

9. Гусаров М. А., Юров А. В., Щипков А. А., Леонов С. В. Анализ применимости законов распределения для оценки надежности системы оперативного управления добычей урана методом скважинного подземного выщелачивания / Сборник статей по материалам научно-практической конференции «Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий». Москва: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 94.

10. Голик В. И., Заалишвили В. Б., Разоренов Ю. И. Опыт добычи урана выщелачиванием / Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва: ООО «Горная книга», 2014. Вып. № 7. С. 97 – 103.

11. Гончарова Н. А., Гуцул М. В., Носков М. Д. Предпроектное геотехнологическое моделирование отработки блока месторождения урана методом скважинного подземного выщелачивания // Известия высших учебных заведений. Физика. Томск: НИ ТПУ, 2017. Том 60 № 9–2. С. 29 – 32.

12. Лизункин М. В. Технологические схемы подготовки руды для блочного подземного выщелачивания при отработке месторождений Стрельцовского рудного поля // Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва: ООО «Горная книга», 2016. Вып. № 3. С. 297 – 305.

13. Солодов И. Н., Гладышев А. В., Иванов А. Г. Опыт добычи урана методом скважинного подземного выщелачивания в криолитозоне // Разведка и охрана недр. Москва: ВНИИМС им. Н. М. Федоровского, 2017. Вып. № 11. С. 65 – 70.

14. Солодов И. Н., Морозов А. А., Физико-химические геотехнологии – главный вектор развития уранодобывающей отрасли // Горный журнал. Москва: Руда и металлы, 2017. Вып. № 8. С. 5 – 10.

15. G. Zou, S. Papirio, X. Lai et al., “Column leaching of low-grade sulfide ore from Zijinshan copper mine,” International Journal of Mineral Processing, vol. 139, article 2730, pp. 11–16, 2015.

16. V. Fonti, A. Dell’Anno, and F. Beolchini, “Does bioleaching represent a biotechnological strategy for remediation of contaminated sediments?” Science of the Total Environment, vol. 563–564, pp. 302–319, 2016.

17. Y. Yang, W. Liu, S. K. Bhargava, W. Zeng, and M. Chen, “A XANES and XRD study of chalcopyrite bioleaching with pyrite,” Minerals Engineering, vol. 89, pp. 157–162, 2016. **PMSE**

REFERENCES

1. Solodov I. N., Polonyankina S. V., Vorob’eva L. Yu., Noskov M. D., Ivanov A. G. *Ustranenie poter’ i razubozhivaniya urana pri skvazhinnom podzemnom vishchelachivani* x Elimination of losses and dilution of uranium during borehole subsurface leaching x. Razvedka i ohrana neдр. Moskva: VNIIMS im. N. M. Fedorovskogo, 2018. Vyp. no. 7. pp. 52–58. [In Russ]

2. Kochkin B. T., Solodov I. N., Ganina N. I., Rekun M. L., Tarasov N.N, Shugina G. A., Shulik L. S. Geochemical features of ore-bearing environments on uranium deposits of the Khiagda ore field. *Geologiya rudnyh mestorozhdenij*. 2017. Vyp. no. 5. pp. 349–362. [In Russ]

3. Sakiro G. K., Istomin A. D., Noskov M. D., Cheglovkov A. A. Optimization of block mining during uranium extraction by the method of borehole underground leaching. news of higher educational institutions. *Fizika*. 2014. Tom 57 no. 2-2. pp. 67–70. [In Russ]

4. Shrajner A. E. *Primenenie neregulyarnykh skhem raspolozheniya skvazhin pri dobyche urana metodom skvazhinного podzemного vishchelachivaniya* [Use of irregular well location schemes for uranium extraction by the method of borehole underground leaching]. Sbornik statej po materialam XXI Mezhdunarodного simpoziuma imeni akademika M. A. Usova studentov i molodyh uchyonyh, posvyashchennogo 130-letiyu so dnya rozhdeniya professora M. I. Kuchina. Tomsk: NI TPU, 2017. pp. 606–607. [In Russ]

5. Castro L., Blázquez M. L., González F., Muñoz J. A., and Ballester A. Re-ductive leaching of jarosites by *Aeromonas hydrophila*. *Minerals Engineering*, vol. 95, pp. 21–28, 2016. [In Russ]

6. Golik V. I. *Analiz polnoty vishchelachivaemosti urana v kuchah. Markshejderiya i nedropol’zovanie* [Analysis of the completeness of videochiamate uranium heap. mark-saderia and subsoil use]. Moscow: ООО «Geomar Nedra», 2017. Vyp. no. 3 (89). pp. 24 – 33. [In Russ]

7. Alikulov Sh. Sh. Mathematical modeling of filtration of underground leaching of uranium from weakly permeable ores. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij*. 2017. Vyp. no. 5. S. 95 101. [In Russ]

8. Akimov A. M., Kotel'nikova S. A. *Razrabotka i ispytanie issledovatel'skogo kompleksa dlya vyshchelachivaniya urana iz gornyh otvalov uranodobyvayushchih shaht* [Development and testing of a research complex for leaching uranium from mining dumps of uranium mining mines]. Sbornik statej po materialam nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye voprosy yaderno-himicheskikh tekhnologij i ekologicheskoy bezopasnosti». Sevastopol': FGAOU VO «SevGU», 2016. pp. 238–241. [In Russ]

9. Gusarov M. A., Yurov A. V., Shchipkov A. A., Leonov S. V. *Analiz primenimosti zakonov raspredeleniya dlya ocenki nadezhnosti sistemy operativnogo upravleniya dobychej urana metodom skvazhinnogo podzemnogo vyshchelachivaniya* [Analysis of the application of distribution laws to assess the reliability of the operational management system for uranium production by the method of borehole underground leaching]. Sbornik statej po materialam nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye problemy innovacionnogo razvitiya yadernyh tekhnologij». Moscow: NIYaU MIFI, 2018. p. 94. [In Russ]

10. Golik V. I., Zaalishvili V. B., Razorenov Yu. I. Experience of uranium mining by leaching. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014. Vyp. no. 7. pp. 97–103. [In Russ]

11. Goncharova N. A., Gucul M. V., Noskov M. D. Pre-project geotechnological modeling of mining a block of a uranium Deposit using the method of deep underground leaching. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Fizika.* Tomsk: NI TPU, 2017. Tom 60 no. 9–2. pp. 29–32. [In Russ]

12. Lizunkin M. V. Technological schemes of ore preparation for block underground leaching when working out deposits of the Streltsovsky ore field. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016. no. 3. pp. 297–305. [In Russ]

13. Solodov I. N., Gladyshev A. V., Ivanov A. G. Experience of uranium extraction by the method of well underground leaching in the cryolithozone. exploration and protection of mineral resources. *Razvedka i ohrana nedr.* 2017. Vyp. no. 11. pp. 65–70. [In Russ]

14. Solodov I. N., Morozov A. A., Physical and chemical geotechnologies the main vector of development of the uranium mining industry. *Gornyj zhurnal.* 2017. Vyp. no. 8. pp. 5–10. [In Russ]

15. G. Zou, S. Papirio, X. Lai et al., “Column leaching of low-grade sulfide ore from Zijinshan copper mine,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 139, article 2730, pp. 11–16, 2015.

16. V. Fonti, A. Dell'Anno, and F. Beolchini, “Does bioleaching represent a biotechnological strategy for remediation of contaminated sediments?” *Science of the Total Environment*, vol. 563–564, pp. 302–319, 2016.

17. Y. Yang, W. Liu, S. K. Bhargava, W. Zeng, and M. Chen, “A XANES and XRD study of chalcopyrite bioleaching with pyrite,” *Minerals Engineering*, vol. 89, pp. 157–162, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зозуля Артем Михайлович¹ — аспирант кафедры «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых», mr.hunter.82@mail.ru;

Овсейчук Василий Афанасьевич¹ — докт. техн. наук, профессор кафедры «Подземной разработки месторождений полезных ископаемых», mks3115637@yandex.ru;

¹ Забайкальский государственный университет, Чита, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zozulia A. M., graduate student Underground Mining department;

Ovseychuk V. A., Dr. Sci. (Eng.), professor of Underground Mining department, Transbaikal State University, Chita, Russia.

Получена редакцией 22.10.2020; получена после рецензии 29.12.2020; принята к печати 10.02.2021.

Received by the editors 22.10.2020; received after the review 29.12.2020; accepted for printing 10.02.2021.