

УДК 669.21/23;57.66; 622
DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-3-34-41

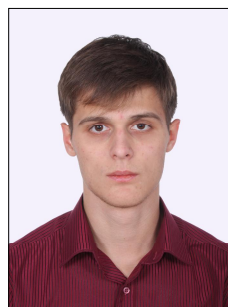
ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УСПЕШНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БЛОЧНОГО ПОДЗЕМНОГО И КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

MINING-GEOLOGICAL AND PHYSICO-CHEMICAL INDICATORS DETERMINING THE SUCCESS OF THE USE OF BLOCK UNDERGROUND AND HEAP LEACHING



В. А. Овсейчук,
Забайкальский
государственный
университет, г. Чита
Mks3115637@yandex.ru

V. Ovseychuk,
Transbaikal State University,
Chita



А. М. Зозуля,
Забайкальский
государственный
университет, г. Чита
mr.hunter.82@mail.ru

A. Zozulya,
Transbaikal State University,
Chita

В исследовании рассматриваются способы применения физико-химических технологий добычи минерального сырья.

Объект исследований – рудники уранодобывающего предприятия.

Предмет исследований – технологические операции при рудоподготовке минерального сырья к блочному подземному и кучному выщелачиванию и при выщелачивании урановых руд.

Целью исследования является определение способов повышения эффективности процессов подготовки урановых руд месторождений Стрельцовского рудного поля для блочного подземного и кучного выщелачивания.

Задача исследования – выявить физико-механические, геологические и технологические особенности урановых руд, влияющих на эффективность их отработки физико-химическими методами.

В работе применялись физические методы анализа минерального вещества, включающие блок аналитических лабораторных методов диагностики, определения (качественного и количественного состава и структуры пород и руд) на основе изучения физических свойств и непосредственного измерения физических параметров минерального вещества; анализ результатов исследований; установление зависимостей между ФМС и минералого-петрографическим составом пород. Исследования физико-механических свойств горных пород позволили выявить количественные параметры физического состояния среды, в которой происходят процессы рудообразования. исследование физико-механических свойств (ФМС) руд и вмещающих пород.

Успешность применения физико-химических технологий при разработке рудных месторождений, таких как подземное и кучное выщелачивание, зависит от петрографического и минерального состава руд и вмещающих пород, типа выщелачивающих, полезного компонента реагентов, технологии рудоподготовки и режимов орошения кусковых руд. Эффективность выщелачивания ураново-рудных минералов определяется физико-химическими закономерностями взаимодействия реагентов с рудным материалом. В процессе исследований установлена взаимосвязь содержания кремнезема во вмещающих породах и их физико-механических свойств. Это позволяет, при знании типа пород, прогнозировать условия рудоподготовки буровзрывным способом с получением оптимального для выщелачивания размера куска. Экспериментальным способом доказано влияние текстуры руд на эффективность выщелачивания. Предыдущими исследователями установлено, что скорость перевода урана в подвижное состояние при выщелачивании зависит от скорости проникновения выщелачивающего реагента внутрь куска, отображаемой эффективным коэффициентом диффузии ($K_{эф}$). Проведенный анализ горно-геологической информации позволил установить взаимосвязь $K_{эф}$ с типом вмещающих пород через содержание SiO_2 и типом урановых минералов через содержание в них урана. Полученные знания дают возможность прогнозировать благоприятные условия для применения физико-химической геотехнологии при отработке скальных бедных урановых месторождений

Ключевые слова: урановые минералы; породообразующие минералы; растворопроницаемость; подземное и кучное выщелачивание; радиоактивность; диффузионный процесс; гетерогенный процесс; размер куска руды; эффективный коэффициент диффузии; содержание урана; содержание кремнезема

The success of the physico-chemical technologies' application in the development of ore deposits, such as underground and heap leaching, depends on the petrographic and mineral composition of the ores and their host rocks, type of reagents leaching the useful component, technology of ore preparation and irrigation modes of lumpy ores. The efficiency of leaching of uranium-ore minerals is determined by the physico-chemical laws of the interaction of reagents with the ore material. In the course of the research, the relationship between the silica content in the rocks containing mineralization and their physical and mechanical properties was established. This makes it possible, knowing the type of rocks, to predict the conditions of ore preparation by drilling and blasting to obtain the optimal piece size for leaching. In addition, the influence of the ore texture on the leaching efficiency was proved experimentally. Previous researchers found that the rate of conversion of uranium to the mobile state during leaching depends on the rate of penetration of the leaching reagent into the piece, displayed by the effective diffusion coefficient (K_{ef}). The analysis of mining and geological information made it possible to establish the relationship between the K_{ef} and the type of host rocks through the SiO₂ content and the type of uranium minerals through the uranium content. The obtained knowledge makes it possible to predict favorable conditions for the use of physico-chemical geotechnologies in the development of rock-poor uranium deposits

Key words: uranium minerals; rock-forming minerals; rock permeability; underground and heap leaching; radioactivity; diffusion process; heterogeneous process; ore lump size; effective diffusion coefficient; uranium content; silica content

Актуальность. За период 1970–2020 гг. богатые руды урановых месторождений Стрельцовского рудного поля в значительной степени отработаны, оставшиеся запасы руд представлены бедным оруденением, отработка которого традиционными методами стала нерентабельной в современных экономических условиях. Широкое применение физико-химических геотехнологий, одной из которых является блочное подземное и кучное выщелачивание, могло бы стать решением возникшей проблемы доработки оставшихся запасов.

Объект исследований – рудники уранодобывающего предприятия.

Предмет исследований – технологические операции при рудоподготовке минерального сырья к блочному подземному и кучному выщелачиванию и при выщелачивании урановых руд.

Целью работы является выявление процессов повышения эффективности процессов подготовки урановых руд месторождений Стрельцовского рудного поля для блочного подземного и кучного выщелачивания.

Задача исследования – установить физико-механические, геологические и технологические особенности урановых руд, влияющих на эффективность их отработки физико-химическими методами

Методы исследования: физический анализ минерального вещества, включающий блок аналитических лабораторных методов диагностики, определения (качественного, количественного состава; структуры пород и руд) на основе изучения физиче-

ских свойств и непосредственного измерения физических параметров минерального вещества; анализ результатов исследований; установление зависимостей между ФМС и минералого-петрографическим составом пород. Исследования физико-механических свойств горных пород, дающих количественные параметры физического состояния среды, в которой происходят процессы рудообразования. исследование физико-механических свойств (ФМС) руд и вмещающих пород; исследование физико-механических свойств (ФМС) руд и вмещающих пород; анализ результатов исследований, установление зависимостей между ФМС и минералого-петрографическим составом пород; выявление зависимостей между геологическими, технологическими показателями руд и эффективностью применения физико-химических методов добычи уранового сырья; компьютерное моделирование технологических схем подготовки рудных тел к БПВ и процессов выщелачивания магазинированной руды.

Широко использован метод аналитических исследований. Проверка результатов аналитических исследований осуществлялась путём сопоставления расчётных данных с экспериментальными и фактическими.

Разработанность темы, результаты исследования. Горно-геологические показатели, определяющие успешность применения БПВ и КВ

Использование физико-химических геотехнологий (ФХТ) при добыче минерального сырья основано на разрушении структуры

рудных минералов химическими реагентами. При взаимодействии этих агентов происходит разрыв химических связей минерала, и полезный компонент переходит в водный раствор. Успешность этого процесса зависит от многих природных факторов.

Выщелачивающий реагент взаимодействует не только с рудными, но и с породообразующими минералами, являющимися основой пород, вмещающих оруденение. При этом в раствор переходит большое количество химических элементов. На эти химические процессы тратится большое количество выщелачивающего реагента.

Таким образом, важным фактором успешного выщелачивания является петрографический состав вмещающих пород и минеральный состав руд. Рудные урановые минералы на месторождениях Стрельцовского рудного поля представлены настураном, уранинитом, браннеритом, коффини-

том, в меньшей степени – гидронастураном и урановыми чернями [5], легче разрушается структура гидронастурана и урановых черней, труднее – браннерита и коффинита.

Из нерудных минералов легко подвергаются разрушению гидрослюда, хлориты и карбонаты, которые и являются источником насыщения продуктивных растворов, мешающим переводу в подвижное состояние урана. Практически не подвергаются разрушению полевые шпаты и кварц. Установлено: чем кислее породы, тем они более благоприятны для применения физико-химических технологий добычи минерального сырья, т. е. содержание SiO_2 в руде является одним из индикаторов её пригодности к БПВ и КВ. Одним из решающих показателей пригодности руд к выщелачиванию является их текстура. Более успешно выщелачиваются прожилковые руды, менее – вкрапленные (рис. 1).

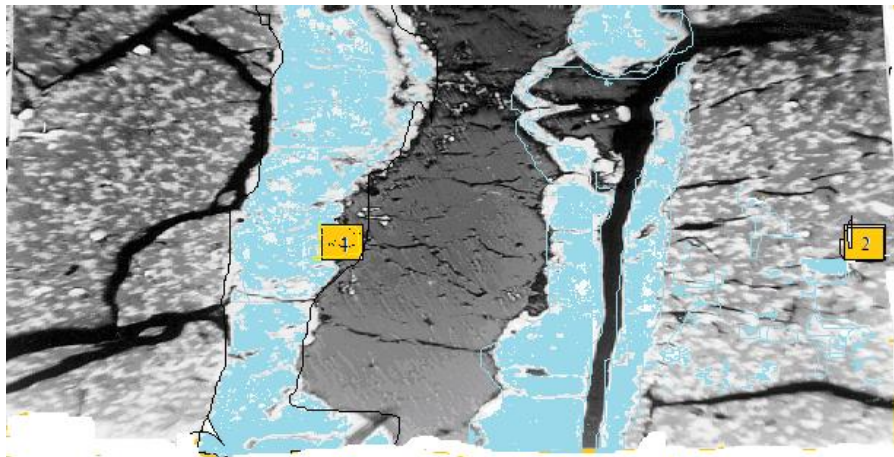


Рис. 1. Аншлиф образца урановой руды прожилково-вкрапленной текстуры:

1 – прожилковая минерализация; 2 – вкрапленная минерализация /

Fig. 1 Anshliff of a veined-interspersed uranium ore sample:

1-veined mineralization; 2 – interspersed mineralization

Важными показателями, определяющими успешность применения ФХТ, являются крепость руд и пород и их трещиноватость. Для получения оптимального размера куска выщелачиваемой руды применяется взрывной метод рудоподготовки [10].

Чем выше коэффициент крепости f и чем более трещиноваты руды, тем меньше затраты для подготовки её к выщелачиванию. Установлено: чем больше содержание кремнезема в рудах, тем выше её крепость

(рис. 2) и хрупкость [3; 6]. Не трещиноватые монолитные породы практически не подвергаются воздействию выщелачивающих реагентов.

Зависимость описывается формулой

$$\sigma_{\text{расп}} = 19,99078 - 210,9039/C_{SiO_2} - 628,90855/C_{SiO_2}^2, \quad (1)$$

где C_{SiO_2} – содержание кремнезема во вмещающих оруденение породах, %.

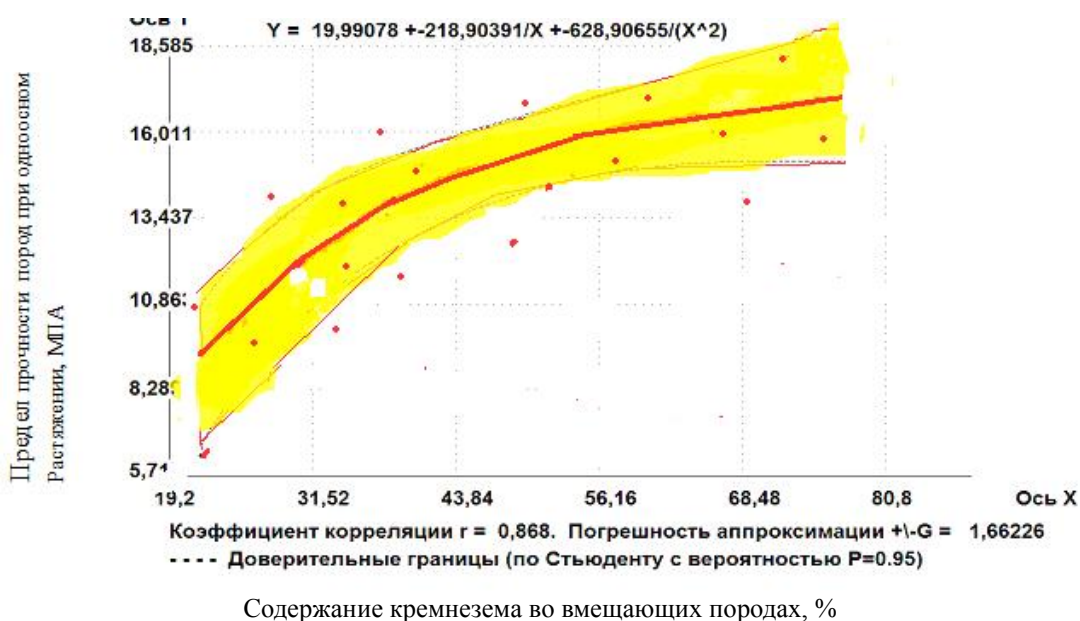


Рис. 2. Зависимость предела прочности при одноосном растяжении от содержания SiO_2 / Fig. 2. Dependence of the uniaxial tensile strength on the SiO_2 content

Физико-химические показатели, определяющие успешность применения ФХТ

Выщелачивание урана из дроблёной руды – это процесс, протекающий на поверхности границы раздела фаз: твёрдая, жидкая и газовая. Скорость протекания процесса зависит от концентрации выщелачивающего реагента, насыщенности кислородом и площади соприкосновения рудного минерала с реагентом. Скорость проникновения выщелачивающего реагента внутрь куска зависит от его трещиноватости и пористости, т. е. происходит диффузия реагента внутрь куска, а после разрушения рудного минерала – диффузия урана за его пределы. Исходя из этого положения, процесс выщелачивания можно описать уравнением диффузии, при этом скорость протекания диффузионного процесса следует выразить в виде эффективного коэффициента диффузии ($K_{эф}$) [1; 4], который зависит от природных и технологических особенностей руд и определяется экспериментально.

Для горной массы скальных грунтов в штабелях П. Ф. Долгих предложен расчёт по результатам экспериментально выявленной зависимости изменения извлечения урана от времени [4], в основе которого сложившиеся

модели описания кучного выщелачивания и использование уравнений диффузии.

Обработка экспериментальных результатов показала, что процесс выщелачивания металла из рудных кусков в форме пластины описывается уравнением диффузии вещества:

$$C = C_0 \text{ при } 0 < x < h \text{ и}$$

$$t = 0, C = 0 \text{ при } x = h, x = 0, t > 0 \text{ [3];}$$

$$C_{(x,t)} = 4C_0 / \pi * \sum_{j=0}^{\infty} 1/(2j+1) * \sin[(2j+1) * h] \exp[-\{(2j+1) * \pi/h\}^2 * K_{эф} * t], \quad (2)$$

где C_0 – средняя концентрация металла в куске руды, г/см²;

$C_{(x,t)}$ – содержание металла в куске руды на глубине x , г/см²;

t – время, сут;

x – глубина проникновения растворителя, см;

h – средний размер куска, см;

j – поток диффундирующего вещества через 1 см² поверхности, г/см².

Средняя концентрация оставшегося полезного компонента ($C_{ср}$) определяется из выражения [4; 9]

$$C_{cp}/C_0 = 8/\pi^2 * \exp(-\pi^2 * K_{эф} * t/h^2), \quad (3)$$

где $K_{эф}$ – коэффициент диффузии (эффективный), $см^2/сут$.

Преобразуя формулу (2), можно получить $K_{эф}$ для горно-рудных материалов различных месторождений.

$$K_{эф} = LN(8 * C_0) * h^2 / -22,56 * t * LN C_{cp}. \quad (4)$$

Как показали опытные работы, формула корректна при извлечении металла в пределах 40...70 %. Сходимость эксперименталь-

ных и расчетных данных в этом диапазоне составляет 95...98 %.

На этом основана методика опробования горной массы для выщелачивания урана [2; 5; 7; 8]. Сначала подбираются условия выщелачивания, а затем ведётся определение $K_{эф}$ по нескольким пробам для получения средней величины, представительной для данного рудного тела. Определение коэффициентов диффузии по предложенной методике объективно отражает комплекс природных и горно-технических свойств руды.

Значение $K_{эф}$ для руд различного состава и структуры /
The value of the $K_{эф}$ for ores of different composition and structure

Вмещающие породы / Host Rocks	Содержание SiO_2 , % / Content SiO_2 , %	Главные рудные минералы / Main ore minerals	Доля урана в минерале, % / Share of uranium in the mineral, %	Структуры / Structure	Наименование месторождений / Name of deposits	Величина $K_{эф}$, $см^2/сут$ / Value of the $K_{эф}$, $см^2/day$
Гигматоидные граниты / Gigmatoid granites	79	Уранинит, браннерит / Uraninite, Brannerite	60	Пятнистая / spotted	Южное / Ugnoe	$1,48 * 10^{-3}$
Окварцованные и альбитизированные сланцы / Quartz and albitized shales	75	Настуран, аршиновит / Nasturan, arshinovite	40	Прожилково-вкрапленная / Veined-interspersed	Маньбай / Manybai	$2,2 * 10^{-3}$
То же / The same	75	Настуран, браннерит / Nasturan, brannerite	56	То же / The same	Грачёвское / Grachevskoe	$2,2 * 10^{-3}$
Сланцы и аргиллиты / Shale and mudstone	45	Настуран, коффенит / Nasturan, coffenite	67	Вкрапленная / Interspersed	Звёздное / Zvezdnoe	$4,7 * 10^{-3}$ $5,3 * 10^{-3}$
Гранитоиды / Granitoids	81	Урановые черни, коффенит / Uranium cherni, coffenite	48	Прожилковая / veined	Орловское, Черкасар / Orlovskoe, Cherkasar	$8,4 * 10^{-3}$ $1,48 * 10^{-2}$
Фельзиты, Конгломераты / Felsites, Conglomerates	75	Настуран, коффенит / Nasturan, coffenite	67	Прожилково-вкрапленная / Veined-interspersed	Новогоднее / Movogodnye	$4,5 * 10^{-3}$
Трахидациты / Trachydacites	65	Настуран, коффенит, браннерит / Nasturan, coffenite, brannerite	59	Прожилково-вкрапленные / Veined-interspersed	Стрельцовское / Streltsovskoe	$1,5 * 10^{-3}$
Конгломераты / Conglomerates	50	Настуран, коффенит / Nasturan, coffenite	67	Прожилково-вкрапленные / Veined-interspersed	Лучистое / Luchistoe	$3,8 * 10^{-3}$

Анализ данных таблицы показывает, что существует определённая зависимость эффективного коэффициента диффузии при выщелачивании урановых руд от типа вмещающих оруденение пород через содержание кремнезёма (SiO_2) и доли урана в рудном минерале. Зависимости приведены на рис. 3, 4.

Зависимость имеет вид гиперболоидной кривой и описывается формулой

$$K_{\phi} = 2,92985 + 0,14809 * C_{\text{SiO}_2} - 0,00196 * C_{\text{SiO}_2}^2, \quad (5)$$

где C_{SiO_2} – содержание кремнезёма во вмещающих оруденение породах, %.

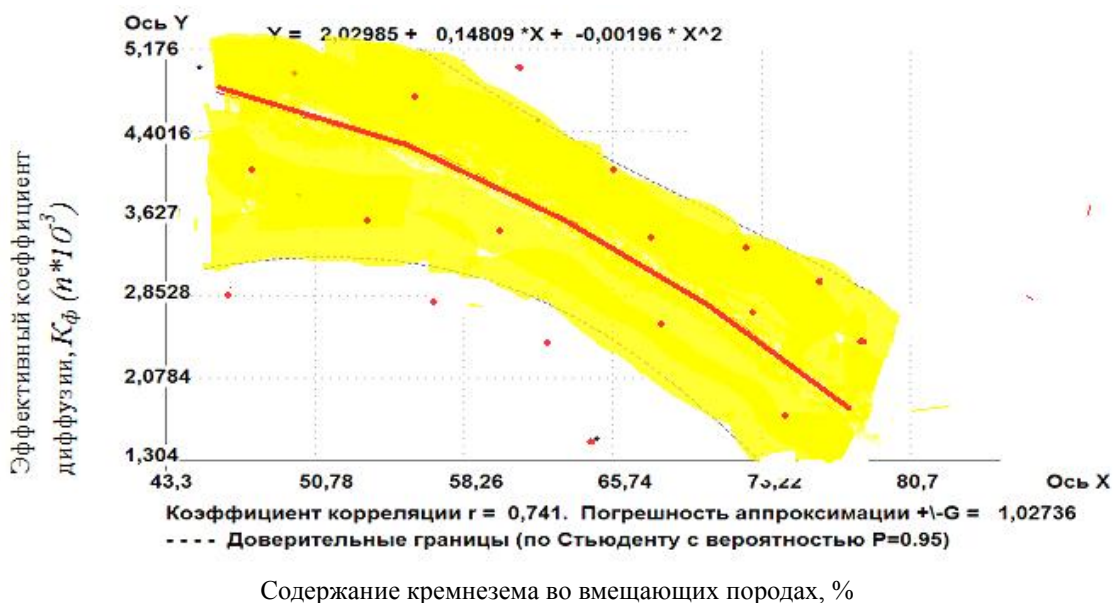


Рис. 3. Зависимость K_{ϕ} ($n \cdot 10^{-3}$) от содержания SiO_2 во вмещающих оруденение породах, % / Fig. 3. Dependence of K_{ϕ} ($n \cdot 10^{-3}$) on the SiO_2 content in the rocks containing mineralization, %

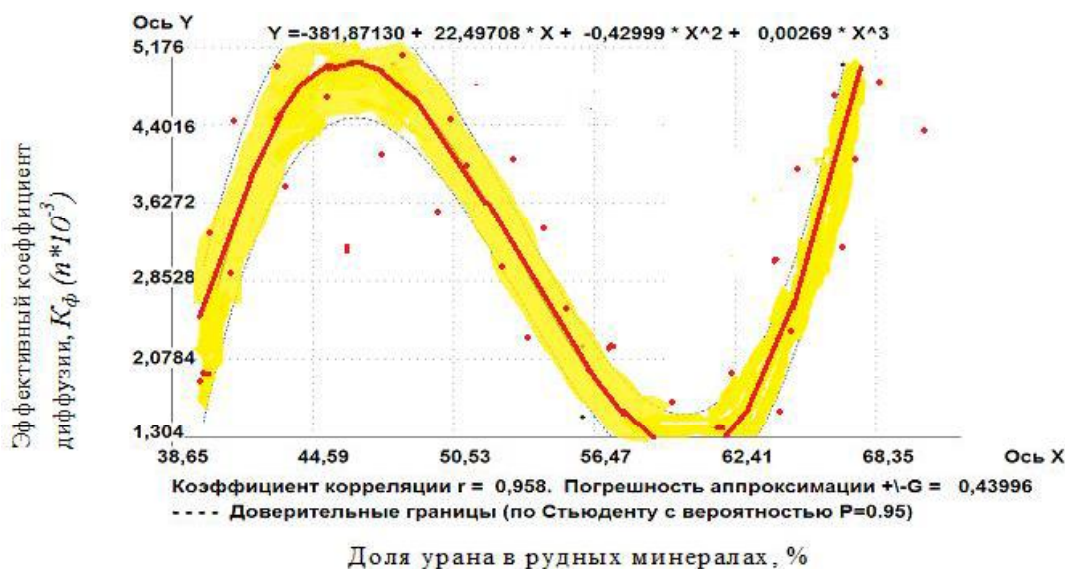


Рис. 4. Зависимость K_{ϕ} ($n \cdot 10^{-3}$) от доли урана в рудных минералах, % / Fig. 4. Dependence of K_{ϕ} ($n \cdot 10^{-3}$) on the proportion of uranium in ore minerals, %

Зависимость имеет вид логнормальной кривой и описывается формулой

$$K_{\phi} = -381,6713 + 22,49708 * C_u - 0,42999 * C_u^2 + 0,00269 * C_u^3, \quad (6)$$

где C_u – доля урана в рудных минералах, %.

Выводы. 1. Установлено: чем кислее породы, тем они более благоприятны для применения физико-химических технологий до-

бычи минерального сырья, т. е. содержание SiO_2 в руде является одним из индикаторов её пригодности к БПВ и КВ.

2. Предлагаемая методика расчётного определения эффективного коэффициента диффузии позволяет прогнозировать геотехнологические свойства руды при предварительной оценке новых рудных залежей на предмет эффективности использования подземного или кучного выщелачивания.

Список литературы

1. 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.
2. Аликулов Ш. Ш., Халимов И. У. Интенсификация параметров подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд на примере урановых месторождений Узбекистана // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 3. С. 37–48. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-37-48.
3. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Ляшенко В. И. Особенности конструирования систем подземного выщелачивания металлов // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». 2018. Т. 19, № 1. С. 80–91.
4. Долгих П.Ф., Остроумова И.Д., Бубнов В.К. Математическое моделирование процесса выщелачивания полезных компонентов из кускового рудного материала // Комплексное использование минерального сырья. 1981. № 5. С. 36–38.
5. Ищукова Л. П., Игошин Ю. А., Авдеев Б. В. Геология Урулунгевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. М.: Геоинформмарк, 1998. 382 с.
6. Ляшенко В. И., Андреев Б. Н., Куча П. М. Развитие горнотехнических технологий подземного блочного выщелачивания металлов из скальных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 4. С. 11–18.
7. Botz, M., Marsden J. Heap Leach Production Modeling: a Spreadsheet-Based Technique // Mining Metallurgy & Exploration. 2019. Т. 36. Pp. 1041–1052.
8. Hoummady E., Golfier F., Cathelineau M., Neto J., Lefevre E. A study of uranium-ore agglomeration parameters and their implications during heap leaching // Minerals Engineering. 2018. Vol. 127. Pp. 22–31.
9. Kuhar L. L., Bunney K., Jackson M., Oram J., Rao A. Assessment of amenability of sandstone-hosted uranium deposit for in-situ recovery // Hydrometallurgy. 2018. Vol. 179. Pp. 157–166.
10. Lü Y., Lü J., Zhou J., Shen J. Surfactant study on promoting leaching rate of uranium // Chinese Journal of Rare Metals. 2016. Vol. 40. No 2. Pp. 182–187.

References

1. Alikulov Sh. Sh. *Izvestiya vysshchikh uchebnykh zavedeniy* (News of higher educational institutions). Yekaterinburg: USGU, 2017, Issue no. 5, pp. 95–101.
2. Alikulov Sh. Sh., Khalimov I. U. *Gorny informatsionno-analicheskiy byulleten* (Mining information and analytical bulletin), 2021, No. 3, pp. 37–48. DOI: 10.25018 / 0236-1493-2021-3-0-37-48.
3. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Lyashenko V. I. *Vestnik RUDN. Seriya «Inzhenernye issledovaniya»* (Bulletin of the RFUR. Series “Engineering research”). 2018, vol. 19, no. 1, pp. 80–91.
4. Dolgikh P. F., Ostroumova I. D., Bubnov V. K. *Complex use of mineral raw materials* (Complex use of mineral raw materials), 1981, no. 5, pp. 36–38.
5. Ischukova L. P., Igoshin Yu. A., Avdeev B. V. *Geologiya Urulyunguevskogo rudnogo rayona i molibden-uranovykh mestorozhdeniy Streltsovskogo rudnogo polya* (Geology of the Urulyunguev ore district and the molybdenum-uranium deposits of the Streltsovsky ore field). Moscow: Geoinformmark, 1998. 382 p.
6. Lyashenko V. I., Andreev B. N., Kucha P. M. *Razvitie gornotekhnicheskikh tehnologii podzemnogo blokno-gochelachivaniya metallov iz skalnykh rud* (Development of mining technologies for underground block leaching of metals from rock ores), 2018, no. 4, pp. 11–18.
7. Botz M. *Mining Metallurgy & Exploration* (Mining Metallurgy & Exploration), 2019, т. 36, pp. 1041–1052.

8. Hoummady E., Golfier F., Cathelineau M., Neto J., Lefevre E. *Minerals Engineering* (Minerals Engineering), 2018, vol. 127, pp. 22–31.
9. Kuhar L. L., Bunney K., Jackson M., Oram J., Rao A. *Hydrometallurgy* (Hydrometallurgy), 2018, vol. 179, pp. 157–166.
10. Lü Y., Lü J., Zhou J., Shen J. *Chinese Journal of Rare Metals* (Chinese Journal of Rare Metals), 2016, vol. 40, no 2, pp. 182–187.

Коротко об авторах

Овсейчук Василий Афанасьевич, д-р техн. наук, профессор кафедры подземной разработки месторождений полезных ископаемых, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: физико-техническая и физико-химическая геотехнологии, предконцентрация минерального сырья, рудничная геология
mks3115637@yandex.ru

Зозуля Артем Михайлович, аспирант, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: физико-техническая и физико-химическая геотехнологии
mr.hunter.82@mail.ru

Briefly about the authors

Vasily Ovseytchuk, doctor of engineering sciences, professor, Underground Extractions of Mineral Deposits department, Transbaikal State University, Chita, Russia. Scientific interests: physico-technical and physico-chemical geotechnology, pre-dressing of mineral raw materials, miner geology,

Artem Zozulya, postgraduate, Transbaikal State University, Chita, Russia. Scientific interests: physico-technical and physico-chemical geotechnology

Образец цитирования

Овсейчук В. А., Зозуля А. М. Горно-геологические и физико-химические показатели, определяющие успешность применения блочного подземного и кучного // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 3. С. 34–41. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-3-34-41.

Ovseytchuk V., Zozulya A. Выщелачивания/ Mining-geological and physico-chemical indicators determining the success of the use of block underground and heap leaching// Transbaikal State University Journal, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 34–41. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-3-34-41.

Статья поступила в редакцию: 24.03.2021 г.
Статья принята к публикации: 30.03.2021 г.