

УДК 622.775

DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-4-16-28-34

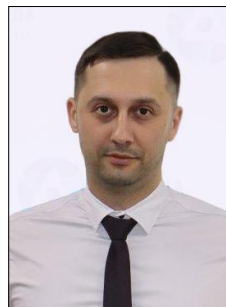
ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОКИСЛИТЕЛЕЙ ПРИ СКВАЖИННОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ ГИДРОГЕННЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ ХИАГДИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

SEMI-INDUSTRIAL TESTS OF THE USE OF OXIDANTS IN THE DOWNHOLE LEACHING OF HYDROGENIC ORES OF THE DEPOSITS OF THE KHIAGDINSKY ORE FIELD



В. А. Овсейчук,
Забайкальский государственный
университет, д-р техн. наук,
профессор, г. Чита
MKS3115637@Yandex.ru

V. Ovseychuk,
Transbaikal State University, Doctor of
Technical Sciences, Professor,
Chita



А. Н. Михайлов,
Забайкальский государственный
университет, аспирант,
г. Чита
Mikhailov.A.N@hiagda.ru

A. Mikhailov,
Transbaikal State University, post
graduate student,
Chita

При добыче природного урана из гидрогенных месторождений одной из проблем эффективности отработки является низкая интенсивность перевода полезного компонента в продуктивный раствор при подземном скважинном выщелачивании, что значительно удлиняет срок эксплуатации месторождения и повышает общие затраты на получение готовой продукции [1; 2]. *Объект исследования* – технологические установки по подземному скважинному выщелачиванию гидрогенных руд. *Цель исследования* – закрепить полученные знания при проведении лабораторных исследований в условиях промышленной эксплуатации и разработать режимы применения данной технологии при отработке запасов гидрогенных руд хиагдинского типа. *Задачи исследования* – установить наиболее эффективные режимы применения перекиси водорода в качестве окислителя. *Методика исследования* – сбор накопленной информации, математико-статистическая ее обработка, разработка регламента проведения процесса выщелачивания с применением перекиси водорода; проведение исследовательских работ и установление связи между горно-геологическими, гидрогеологическими и технологическими. *Методы исследований*: математико-статистический анализ, полупромышленные испытания. Причинами низкой интенсивности выщелачивания служат как сложные горно-геологические и гидрогеологические условия локализации гидрогенных руд, так и низкая температура подземных вод. Одним из эффективных технологических приемов повышения эффективности выщелачивания является применение химических активаторов процесса извлечения урана из рудных минералов [10–14]. Лабораторные исследования¹ [7] применения химических окислителей на рудах месторождений Хиагдинского рудного поля показали, что наиболее эффективным активатором выщелачивания является перекись водорода. Для проверки результатов лабораторных исследований в натуральных условиях на одной из рудных залежей Хиагдинского месторождения проведены опытно-промышленные испытания результатов этих исследований. В результате выполненных работ удалось установить оптимальные режимы сернокислотного выщелачивания хиагдинских руд с применением в качестве активатора перекиси водорода

Ключевые слова: подземное скважинное выщелачивание, технологическая скважина, коэффициент фильтрации, окислитель, выщелачивающий раствор, продуктивный раствор, концентрация серной кислоты, концентрация урана, отношение Ж/Т, окислительно-восстановительный потенциал, перекись водорода, нитрит натрия

¹ Овсейчук В. А. Зависимость извлечения урана в раствор при кучном выщелачивании от петрографического состава руд // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2021. – Т. 27, № 7. – С. 27–31.

When extracting natural uranium from hydrogenic deposits, one of the problems of development efficiency is the low rate of conversion of a useful component into a productive solution during underground well leaching, which significantly lengthens the life of the field and increases the total cost of obtaining finished products [1; 2]. *The object of the research* is technological installations for in-situ borehole leaching of hydrogenous ores. *The purpose of the research* is to consolidate the knowledge obtained in laboratory studies under industrial operating conditions and to develop modes of application of this technology in the development of reserves of hydrogenous ores of Khiagda type. *Research objective* is to establish the most effective modes of hydrogen peroxide application as an oxidizer. *Research methodology* is presented by the collection of accumulated information, its mathematical and statistical processing, and development of regulations of the leaching process with hydrogen peroxide; conducting research work and establishing the relationship between the mining, geological, hydrogeological and technological *Research methods*: mathematical and statistical analysis, semi-industrial tests. The reasons for the low intensity of leaching are both complex mining, geological and hydrogeological conditions for the localization of hydrogenic ores and low groundwater temperature. One of the effective technological techniques for increasing leaching efficiency is the use of chemical activators of the uranium extraction process from ore minerals [10–14]. Laboratory studies [7] of the use of chemical oxidizers in the ores of the Khiagdinsky ore field deposits have shown that hydrogen peroxide is the most effective activator of leaching. To verify the results of laboratory tests in situ at one of the ore deposits of the Khiagdinskoye deposit, pilot tests of the results of these studies were carried out. As a result of the work performed, it has become possible to establish the optimal modes of sulfuric acid leaching of chiagdin ores using hydrogen peroxide as an activator

Key words: *underground well leaching, technological well, filtration coefficient, oxidizer, leaching solution, productive solution, sulfuric acid concentration, uranium concentration, F/T ratio, redox potential, hydrogen peroxide, sodium nitrite*

Введение. Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью проверки результатов лабораторных исследований по интенсификации процесса подземного скважинного выщелачивания применением химического активатора в промышленных условиях.

Объект исследования – технологические установки по подземному скважинному выщелачиванию гидрогенных руд.

Цель исследования – закрепить полученные знания при проведении лабораторных исследований в условиях промышленной эксплуатации и разработать режимы применения данной технологии при отработке запасов гидрогенных руд хиагдинского типа.

Задачи исследования – установить наиболее эффективные режимы применения перекиси водорода в качестве окислителя.

Методика исследования – сбор информации, математико-статистическая ее обработка, разработка регламента проведения процесса выщелачивания с применением перекиси водорода; проведение исследовательских работ и установление связи между горно-геологическими, гидрогеологическими и технологическими.

Методы исследований: математико-статистический анализ, полупромышленные испытания.

Разработанность темы. Лабораторные испытания по выщелачиванию рудных проб, характеризующих усредненные показатели гидрогенных месторождений Хиагдинского рудного поля, показали, что применение химических активаторов процесса перевода урана в подвижное состояние при ПСВ позволяет значительно интенсифицировать процесс выщелачивания. При этом наиболее эффективным окислителем хиагдинских руд является перекись водорода [5].

Рекомендуемые к проведению опытно-промышленных работ технологические показатели:

– на стадии закисления кислотность выщелачивающих растворов не менее 25 г/л, концентрация перекиси водорода 0,5 г/л (на 100 % вещества), ОВП до 450 мВ и выше.

Рекомендуемые технологические параметры испытаны при отработке рудного блока залежи X5-6-C1 Хиагдинского месторождения гексагональной схемой радиусом 30 м и применением в качестве окислителя перекисью водорода [8].

В табл. 1 представлены технологические параметры выщелачивания опытного блока.

Технологические параметры выщелачивания опытного блока залежи Х5-6-С₁ Хиагдинского месторождения с применением в качестве окислителя перекиси водорода / Process parameters of the experimental block leaching at the deposit Kh5-6-S1 the Khiagdinskoye field using hydrogen peroxide as an oxidizing agent

Наименование показателей / Name of indicators	Ед. измер. / U. measure	Величины показателей / Sizes Indicators	Примечание / Note
Концентрация серной кислоты при закислении / Concentration of sulfuric acid at acidification	мг/л / mg/l	25,5	
Концентрация серной кислоты при выщелачивании / Concentration of sulfuric acid during leaching	мг/л / mg/l	13,1	
Расход серной кислоты / Sulfuric acid consumption	кг/т / kg/t	13,3	
Расход перекиси водорода / Hydrogen peroxide consumption	кг/т / kg/t	0,88	
Средняя концентрация урана в продуктивном растворе / Average concentration of uranium in the productive solution	мг/л / mg/l	88	
Средняя величина ОПВ / Mean OPV	мВ / mV	576	
Средняя концентрация ионов Fe(II) / Average ion concentration Fe (II)	мг/л / mg/L	55	
Средняя концентрация ионов Fe(III) / Average Fe (III) ion concentration	мг/л / mg/L	216	
Продолжительность закисления / Duration of acidification	сутки / day	62	
Продолжительность выщелачивания до извлечения 80 % урана в продуктивный раствор / Duration of leaching until extraction of 80 % uranium into the productive solution	сутки / day	700	
Средняя величина Ж/Т / Average F/T	д. ед. / unit	3,5	

На рис. 1 представлена схема зависимости изменения концентрации урана в продуктивном растворе от времени выщелачивания.

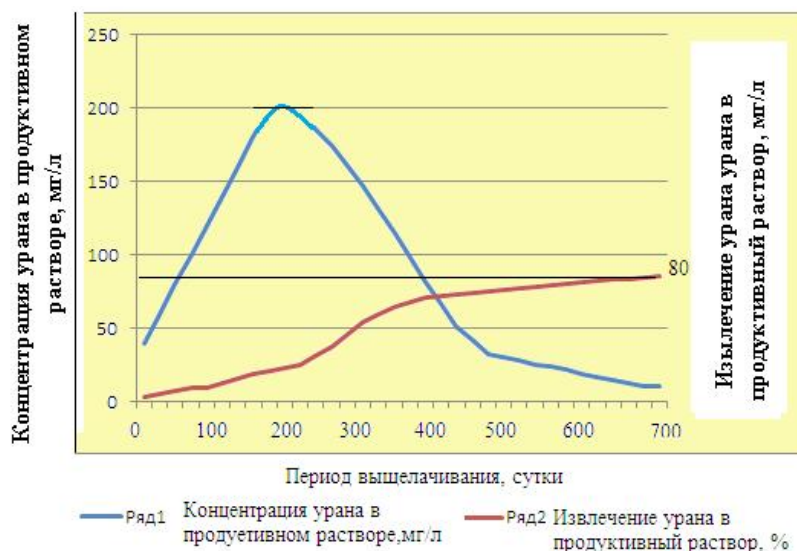


Рис. 1. Зависимость изменения концентрации урана и извлечения урана в продуктивный раствор от времени выщелачивания / Fig. 1. Dependence of uranium concentration change and uranium extraction into productive solution on leaching time

Концентрация урана в продуктивном растворе в процессе выщелачивания постепенно возрастает до 200 мг/л, затем начинается снижение концентрации до 30 мг/л на 480-е сутки. В последующий период выщелачивания (до 700 суток) концентрация падает до 10 мг/л, после чего процесс выщелачивания прекращается.

Зависимость концентрации от времени выщелачивания урана описывается формулой

$$C_u = -1,8 + 1,7 * T - 0,006 * T^2, \text{ мг/л}, \quad (1)$$

где T – период выщелачивания, сутки.

Извлечение урана в продуктивный раствор постепенно возрастает в течение первых 220 суток выщелачивания до уровня 25 %, затем процесс ускоряется и к 390-м суткам извлечение достигает значения в 70 %, после этого интенсивность перехода урана в продуктивный раствор замедляется и к 700 суткам достигает уровня 80 %.

На рис. 2 представлена схема зависимости изменения Ж/Т, концентрации серной кислоты, концентрации серной кислоты и расхода серной кислоты и перекиси водорода от времени выщелачивания.

Как видно из рис. 2, величина Ж/Т в процессе выщелачивания постепенно изменяется от 1,5 до 6,7 м³/т, составляя в среднем 3,5 м³ раствора на 1 т горно-рудной массы. Поведение величины Ж/Т отражается зависимостью

$$\varepsilon_{с.к.} = 1,7 + 0,005 * T, \text{ кг/т}. \quad (2)$$

Концентрация серной кислоты в растворе в течение первых 100 суток постепенно нарастает до 33 г/л раствора, а затем снижается до уровня 10 г/л на 250-е сутки и остается на этом уровне в течение всего последующего периода выщелачивания. Средняя концентрация серной кислоты составляет 14,2 г/л. Зависимость изменения концентрации серной кислоты в продуктивном растворе от времени выщелачивания описывается формулой

$$\varepsilon_{с.к.} = 17,7 + 0,2 * T - 0,001 * T^2, \text{ мг/л}. \quad (3)$$

Поведение расхода серной кислоты полностью повторяет изменения ее концентрации в продуктивном растворе. Расход перекиси водорода в процессе выщелачивания изменяется от 1,6 до 2,0 кг/т в течение пер-

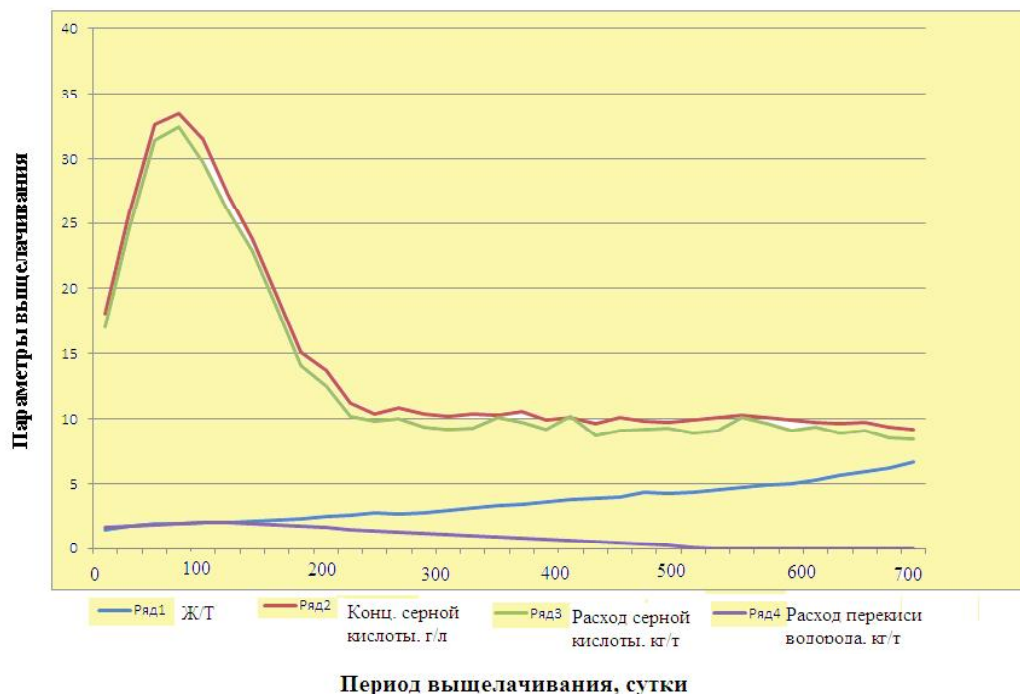


Рис. 2. Зависимость изменения Ж/Т, концентрации серной кислоты, расхода серной кислоты и перекиси водорода от времени выщелачивания / Fig. 2. Dependence of change in W/T, concentration of sulfuric acid, and consumption of sulfuric acid and hydrogen peroxide on leaching time

вых 100 суток, а затем расход постепенно уменьшается и на 540-е сутки достигает нулевого значения.

На рис. 3 представлена схема зависимости перехода в раствор в процессе выщелачивания ионов двухвалентного и трехвалентного железа и изменение окислительно-восстановительного потенциала среды от времени выщелачивания [9].



Рис. 3. Зависимости перехода в раствор в процессе выщелачивания ионов двухвалентного и трехвалентного железа и изменение окислительно-восстановительного потенциала среды от времени выщелачивания / Fig. 3. Dependence of transition to solution during leaching of ferrous and ferric ions and change of redox potential of medium on leaching time

В процессе выщелачивания происходит постепенное повышение концентрации трехвалентного железа и в течение первых 340 суток его значение достигает величины 690 мг/л. Далее концентрация понижается и к 220-м суткам падает до уровня 210 мг/л. В течение последующего периода выщелачивания происходит постепенное уменьшение концентрации Fe(III) до уровня 100...90 мг/л. Поведение ионов двухвалентного железа по характеру кривой зависимости схоже с поведением ионов Fe(III). В течение первых 130 суток концентрация Fe(II) повышается до уровня 210 мг/л. Далее концентрация ионов начинает падать и к 350-м суткам достигает нулевого значения.

Окислительно-восстановительный потенциал за период первых 60 суток поднима-

ется до уровня 660 мВ, затем в течение последующих 20 суток его величина падает до 580 мВ, далее происходит постепенное снижение величины ОПВ до 550 мВ по окончании процесса выщелачивания.

Выводы. В результате проведенных полупромышленных испытаний установлено:

1. Наиболее эффективным активатором выщелачивания руд месторождений Хиаг-

динского рудного поля является перекись водорода.

2. Рекомендуемыми параметрами выщелачивания с применением перекиси водорода являются:

- расход серной кислоты на стадии окисления – 25 кг/т;
- расход серной кислоты на стадии выщелачивания – 7 кг/т;
- расход перекиси водорода на стадии закисления – 1,6 кг/т;
- Ж/Т – 3,5 м³/т;
- отношение Fe(III)/Fe(II) – более 1;
- минимальная концентрация урана в продуктивном растворе – 10 мг/л;
- извлечение урана в продуктивный раствор не менее 80 %.

3. В результате испытаний получены следующие результаты:

– срок отработки запасов опытного блока составил 700 суток, что в среднем на 400 суток меньше, чем по принятой технологии;

– извлечение урана в продуктивный раствор составило 80 %, что на 4 % выше, чем при базовой технологии выщелачивания.

Список литературы

1. Аликулов Ш. Ш. Исследование кинетики продуктивных растворов при подземном выщелачивании урана // Неделя горняка-2017: материалы XXV Междунар. науч. симпозиума. Отд. вып. (Москва, 23–27 января 2017 г.). М.: Уголь, 2017. С. 140–143.
2. Аликулов Ш. Ш., Курбанов М. А., Шарафутдинов У. З., Халимов И. У. Исследование гидродинамических параметров при подземном выщелачивании путем физического моделирования // Горный вестник Узбекистана. 2019. № 1. С. 77–82.
3. Полиновский К. Д. Комплексный подход к изучению проблем интенсификации процесса ПСВ урана // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 7.
4. Рычков В. Н. Проведение опытно-промышленных испытаний по интенсификации процесса подземного выщелачивания урана на ЗАО «ДАЛУР». Екатеринбург: Фонды УГТУ – УПИ, 2005. 91 с.
5. Тарасов Н. Н., Кочкин Б. Т., Величкин В. И., Дойникова О. А. Условия образования и факторы рудоконтроля месторождений Хиагдинского рудного поля // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60, № 4. С. 392–400.
6. Хамидов С. Б., Аликулов Ш. Ш., Халимов И. У., Алимов М. У. Интенсификация параметров подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд на примере урановых месторождений Узбекистана // Universum: технические науки. 2020. № 6. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/9704> (дата обращения: 20.04.2022).
7. Ходжиев, С. К., Назаров Х. М., Эрматов К. А., Мирсаидов И. У., Бобоёров М. Д. Эффективность действия пероксида водорода как окислителя диоксида урана, в зависимости от pH среды // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. Химические науки. 2018. Т. 61, № 3. С. 275–281.
8. Charalambous F. A., Ram R., McMaster S., Pownceby M. I., Tardio J., Bhargava S. K. Leaching behaviour of natural and heat-treated brannerite-containing uranium ores in sulphate solutions with iron(III) // Minerals Engineering. 2014. Vol. 57. H. 25–35.
9. Kaixuan Tan, Chunguang Li, Jiang Liu, Huiqiong Qu. A novel method using a complex surfactant for in-situ leaching of low permeable sandstone uranium deposits. Hengyang 421001: School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, China 2014.
10. Khawassek Y. M., Taha M. H., Eliwa A. A. Kinetics of Leaching Process Using Sulfuric Acid for Sella Uranium Ore Material, South Eastern Desert // Egypt International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering. 2016.
11. Ma Q., Feng Z.G., Liu P., Lin X.K., Li Z.G., Chen M.S. Uranium speciation and in situ leaching of a sandstone-type deposit from China / Q. Ma, // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2017, Vol. 311. P. 2129–2134.
12. Solodov I. N. In Situ Leach Mining of Uranium in the Permafrost Zone, Khiagda Mine, Russain Federatin // URAM-2014. IAEA. International Symposium (23–27 June, 2014). On Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environment issues. Vienna, Austria. 2014. Vol. 6. P. 62–73.

References

1. Alikulov Sh. Sh. *Nedelya gornyaka-2017: materialy XXV Mezhdunar. nauch. simpoziuma. Otd. vyp.* (Moskva, 23–27 yanvaryaya 2017 g.) (Miner's Week-2017: materials of the XXV Intern. scientific symposium. Dep. issue (Moscow, January 23–27, 2017)). M.: Ugol, 2017, pp. 140–143.
2. Alikulov Sh. Sh., Kurbanov M. A., Sharafutdinov U. Z., Khalimov I. U. *Gorny vestnik Uzbekistana* (Mining Bulletin of Uzbekistan), 2019, no. 1. pp. 77–82.
3. Polinovsky K. D. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* (Mining information and analytical bulletin), 2012, no. 7.
4. Rychkov V. N. *Provedeniye opytno promyshlennyh ispytaniy po intensivatsii protsesssa podzemnogo vyschelachivaniya urana na ZAO «DALUR»* (Carrying out pilot tests on intensification of the process of underground leaching of uranium at CJSC DALUR). Yekaterinburg: Funds of USTU - UPI, 2005, 91 p.
5. Tarasov N. N., Kochkin B. T., Velichkin V. I., Doynikova O. A. *Geologiya rudnyh mestorozhdeniy* (Geology of ore deposits), 2018, vol. 60, no. 4. pp. 392–400.

6. Khamidov S. B., Alikulov Sh. Sh., Khalimov I. U., Alimov M. U. *Universum: tehnikeskiye nauki* (Universum: technical sciences), 2020, no. 6. Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/9704> (date of access: 20.04.2022).

7. Khodzhiev, S. K., Nazarov Kh. M., Ermatov K. A., Mirsaidov I. U., Boboyorov M. D. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan. Khimicheskiye nauk* (Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Chemical Sciences), 2018, vol. 61, no. 3, pp. 275–281.

Charalambous F. A., Ram R., McMaster S., Pownceby M. I., Tardio J., Bhargava S. K. *Minerals Engineering* (Minerals Engineering), 2014, vol. 57, pp. 25–35.

Kaixuan Tan, Chunguang Li, Jiang Liu, Huiqiong Qu. *A novel method using a complex surfactant for in-situ leaching of low permeable sandstone uranium deposits* (A novel method using a complex surfactant for in-situ leaching of low permeable sandstone uranium deposits). Hengyang 421001: School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, China 2014.

Khawassek Y. M., Taha M. H., Eliwa A. A. *EgyptInternational Journal of Nuclear Energy Science and Engineering* (EgyptInternational Journal of Nuclear Energy Science and Engineering), 2016.

Ma Q., Feng Z.G., Liu P., Lin X.K., Li Z.G., Chen M.S. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2017, Vol. 311. P. 2129–2134.

URAM-2014. IAEA. *International Symposium (23–27 June, 2014). On Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environment issues* (URAM-2014. IAEA. International Symposium (23–27 June, 2014). On Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environment issues). Vienna, Austria. 2014. Vol. 6. P. 62–73.

Информация об авторе

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

Михайлов Анатолий Николаевич, аспирант. Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: физико-химическая геотехнология урана
Mihailov.A.N@hiagda.ru

Information about the author

Vasily Ovseichuk, doctor of technical sciences, professor, Transbaikalian State University, Chita, Russia. Research interests: physical–technical and physical–chemical geotechnologies, pre–concentration of mineral raw materials, mine geology

Anatoly Mikhailov, postgraduate, Transbaikalian State University, Chita, Russia. Research interests: physical and chemical geotechnology of uranium

Для цитирования

Овсейчук В. А., Михайлов А. Н. Полупромышленные испытания применения окислителей при скважинном выщелачивании гидrogenных руд месторождений Хиагдинского рудного поля // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 4. С. 28–34. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-4-16-28-34.

Ovseychuk V., Mikhailov A. *Semi-industrial tests of the use of oxidants in the downhole leaching of hydrogenic ores of the deposits of the Khiagdinsky ore field // Transbaikalian State University Journal, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 28–34. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-4-16-28-34.*

Статья поступила в редакцию: 22.04.2022 г.

Статья принята к публикации: 27.04.2022 г.