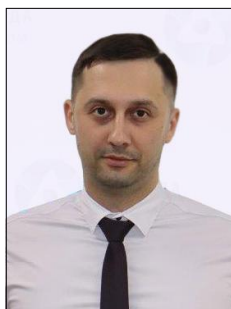


УДК 622.775

DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-4-16-27

**ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕАГЕНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДЗЕМНОГО СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА ИЗ РУД ХИАГДИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ****STUDIES OF THE VARIOUS REAGENTS EFFECT ON THE EFFICIENCY OF UNDERGROUND BOREHOLE LEACHING OF URANIUM FROM THE ORES OF THE KHIAGDINSKY DEPOSIT**

**А. Н. Михайлов,**  
Забайкальский  
государственный  
университет, г. Чита  
Mihailov.A.N@hiagda.ru

**A. Mikhailov,**  
Transbaikal State  
University,  
Chita



**В. А. Овсейчук,**  
Забайкальский  
государственный  
университет, г. Чита  
MKS3115637@Yandex.ru

**V. Ovseychuk,**  
Transbaikal State  
University,  
Chita

Для обеспечения энергетической безопасности России необходимо освоить производство дешевой электроэнергии. Одним из направлений развития отечественной энергетики является использование атомных электростанций [2]. Источником сырья для запитки атомных реакторов является природный уран, добываемый из скальных и гидрогенных (локализованных в рыхлых отложениях) месторождений. В Забайкалье разведаны гидрогенные месторождения, объединенные в единое Хиагдинское рудное поле и характеризующиеся идентичными горно-геологическими, гидрогеологическими и технологическими параметрами<sup>1</sup> [2]. Добыча природного урана связана с определенными трудностями: геологическое строение месторождений, температурный режим подземных вод, экономические показатели работы предприятия и др. В результате стечения этих обстоятельств проблемным является вопрос перевода урана в подвижное состояние при подземном скважинном выщелачивании с необходимой динамикой, обеспечивающей концентрации урана в продуктивном растворе, при переработке которого будет получена рентабельная продукция горного предприятия. Данная статья посвящена интенсификации процесса выщелачивания применением химических активаторов, ускоряющих перевод урана в продуктивный раствор [3]. *Актуальность работы* обосновывается необходимостью активизации процесса выщелачивания урана при ПСВ для обеспечения более полного извлечения урана и сокращения срока отработки месторождения с применением химических окислителей. *Объект исследования* – технологические процессы подземного скважинного выщелачивания с применением химических активаторов. *Цель исследования* – повышение эффективности разработки гидрогенных месторождений урана, снижение эксплуатационных затрат. *Задачи исследования* – выявить наиболее эффективные окислители и режимы их использования, повышающие объем извлечения урана в продуктивный раствор. *Методика исследований* – сбор информации, математико-статистическая ее обработка, проведение исследовательских работ и установление связи между горно-геологическими, гидрогеологическими и технологическими параметрами выщелачивания руд. *Методы исследований*: математико-статистический анализ, лабораторные исследования и использование полученных результатов для проведения опытно-промышленных работ

**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

<sup>1</sup> Назарова З. М., Овсейчук В. А., Лементы О. Ю. Рынок урана: современное состояние, проблемы и перспективы его развития // Проблемы современной экономики. – 2016. – № 2. – С. 159–162.

To ensure Russia's energy security, it is necessary to produce cheap electricity. One of the directions of domestic energy development is its production at nuclear power plants. The source of raw materials for powering nuclear reactors is natural uranium extracted from rocky and hydrogenic (localized in loose sediments) deposits. Hydrogenic deposits have been explored in Transbaikalia, united into a single Khiagdin ore field and characterized by identical mining-geological, hydrogeological and technological parameters. During the operation, certain difficulties have been identified in the extraction of natural uranium, related both to the geological structure of the deposits and the temperature regime of groundwater, and to the economic performance of the enterprise. As a result of the confluence of these circumstances, the issue of transferring uranium to a mobile state during underground borehole leaching with the necessary dynamics that ensures the concentration of uranium in a productive solution, the processing of which will produce profitable mining enterprise products, is problematic. This article is devoted to the intensification of the leaching process using chemical activators that accelerate the conversion of uranium into a productive solution. *The relevance of the work* is due to the need to activate the process of uranium leaching with the help of underground borehole leaching to ensure a more complete recovery of uranium and to reduce the period of field development with the use of chemical oxidants. *The object of the study* is technological processes of underground in-situ leaching with the use of chemical activators. *The purpose of the study* is improving the development efficiency of hydrogenous uranium deposits, reducing operating costs. *The research objectives* are to identify the most effective oxidants and regimes of their use, increasing the volume of uranium recovery in the productive solution. *The research methodology* included collecting information, its mathematical and statistical processing, carrying out research work and establishing a connection between mining-geological, hydrogeological and technological parameters of ore leaching. *Research methods*: mathematical and statistical analysis, laboratory research and the use of the results for experimental and industrial works

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

**В**ведение. Обеспечение энергетической безопасности России связано с освоением атомной энергетики, источником запитки атомных реакторов является природный уран.

*Актуальность работы* обосновывается необходимостью активизации процесса выщелачивания урана при ПСВ для обеспечения более полного извлечения урана и сокращения срока отработки месторождения с применением химических окислителей.

*Объект исследования* – технологические процессы подземного скважинного выщелачивания с применением химических активаторов.

*Цель исследования* – повышение эффективности разработки гидрогенных месторождений урана, снижение эксплуатационных затрат.

*Задачи исследования* – выявить наиболее эффективные окислители и режимы их использования, повышающие объем извлечения урана в продуктивный раствор.

*Методика исследований* – сбор информации, математико-статистическая ее обработка, проведение исследовательских работ и установление связи между горно-геологическими, гидрогеологическими и технологическими параметрами выщелачивания руд.

*Методы исследований:* математико-статистический анализ, лабораторные

исследования и использование полученных результатов для проведения опытно-промышленных работ.

*Разработка темы.* В настоящее время в качестве рабочих агентов (рабочих растворов) при подземном выщелачивании урана применяются слабые водные растворы серной кислоты, а также карбонаты (бикарбонаты) аммония, натрия, калия, кальция, магния. Наибольшее распространение получило кислотное выщелачивание, где в качестве выщелачивающего реагента используется серная кислота [1].

Эффективность процесса подземного выщелачивания зависит от типа урановой минерализации. Основными урановыми минералами месторождений Хиэгдинского типа, обрабатываемых способом скважинного подземного выщелачивания, являются окислы урана (настуран, ураннит, в меньшей мере урановые черни) и силикаты урана (коффинит) и нингиоит, т. е. минералы, выщелачивание урана из которых без применения окислителей затруднено [5].

В процессе анализа материала по применению окислителей в качестве активатора перехода урана в продуктивный раствор при выщелачивании установлено, что существует множество химических соединений, способствующих этому процессу. Проведенные

исследования выщелачивания Хиагдинских руд сотрудниками ОАО «ВНИИХТ» совместно с работниками ОАО «Хиагда» показали, что наиболее эффективны такие окислители, как перекись водорода и нитрит натрия<sup>2</sup> [6].

Отобранные пробы ураново-рудного материала, представленного продуктивными песками, отличающиеся усредненными характеристиками для месторождений Хиагдинского типа, подверглись лабораторным исследованиям по выщелачиванию. Каждая проба выщелачивалась без применения окислителя, с применением перекиси водорода и с применением нитрита натрия.

На рис. 1 и 2 приведены результаты исследования процесса выщелачивания неокис-

ленных руд Хиагдинского месторождения без применения окислителя.

Из рисунков видно, что показатели выщелачивания неокисленной руды закономерно меняются в течение всего периода переработки руд под воздействием раствора серной кислоты. Граничным критерием процесса выщелачивания является уровень извлечения урана в продуктивный раствор в 80 %. Исходная концентрация серной кислоты в рабочем растворе составила 10 г/л. Далее для поддержания процесса выщелачивания концентрация наращивалась в течение 72 суток до уровня 25 г/л, составив в среднем 18 г/л. Расход серной кислоты в процессе выщелачивания четко коррелируется с ее кон-



Рис. 1. Зависимость показателей выщелачивания неокисленной руды от времени выщелачивания без окислителя: 1 ряд – ОПВ, мВ; 2 ряд – Fe (III), мг/л; 3 ряд – Fe (II), мг/л; 4 ряд – концентрация урана, мг/л / Fig. 1. Dependence of the leaching indicators of non-oxidized ore on the time of leaching without an oxidizer: 1 row – OPV, mV; 2 row – Fe (III), mg/l; 3 row – Fe (II), mg/l; 4 row – uranium concentration, mg/l



Рис. 2. Зависимость показателей выщелачивания неокисленной руды от времени выщелачивания без окислителя: 5 ряд – извлечение урана, %; 6 ряд – расход серной кислоты, кг/т; 7 ряд – концентрация серной кислоты, мг/л; 8 ряд – Ж/Т / Fig. 2. Dependence of the leaching indicators of non-oxidized ore on the time of leaching without an oxidizer: Row 5 – uranium extraction, %; Row 6 – sulfuric acid consumption, kg/t; Row 7 – sulfuric acid concentration, mg/l; Row 8 – W/T

<sup>2</sup> 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.

центрацией в рабочем растворе и составил в среднем 18 кг/т руды. Окислительно-восстановительный потенциал растворов в течение всего периода выщелачивания меняется незначительно: от 350 до 410 мВ. Концентрация Fe (III) в растворе закономерно снижается от 120 до 70 мг/л, концентрация Fe (II) в течение 26 суток падает от 205 мг/л до нуля. Концентрация урана в продуктивном растворе четко коррелируется с концентрацией Fe (III) и в процессе выщелачивания постепенно падает от 80 до 30 мг/л. Отношение Ж/Т меняется от

0,3 до 9,0. В течение 80 дней наблюдения в раствор переведено 88 % урана. Процесс извлечения урана в продуктивный раствор описывается зависимостью

$$\varepsilon = -0,4 + 1,4 T * T^2, \% \quad (1)$$

где  $T$  – время выщелачивания.

На рис. 3...5 приведены результаты исследования процесса выщелачивания неокисленных руд Хиагдинского месторождения с применением в качестве стимулятора перекиси водорода.



Рис. 3. Зависимость показателей выщелачивания неокисленной руды от времени выщелачивания с перекисью водорода: 1 ряд – ОПВ, мВ; 2 ряд – Fe (III), мг/л; 3 ряд – Fe (II), мг/л; 4 ряд – концентрация урана, мг/л / Fig. 3. Dependence of the leaching indicators of non-oxidized ore on the time of leaching with hydrogen peroxide: 1 row – OPV, mV; 2 row – Fe (III), mg/l; 3 row – Fe (II), mg/l; 4 row – uranium concentration, mg/l

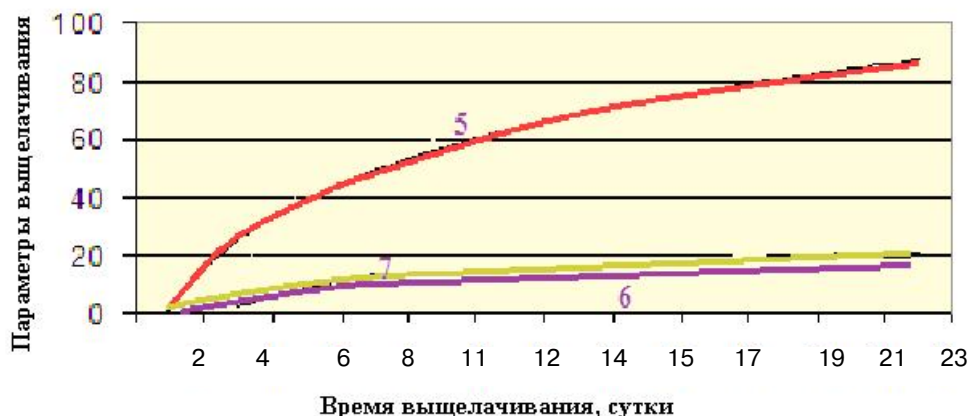


Рис. 4. Зависимость показателей выщелачивания неокисленной руды от времени выщелачивания с перекисью водорода: 5 ряд – извлечение урана, %; 6 ряд – расход серной кислоты, кг/т; 7 ряд – концентрация серной кислоты, мг/л / Fig. 4. Dependence of the leaching indicators of non-oxidized ore on the time of leaching with hydrogen peroxide: Row 5 – uranium extraction, %; row 6 – sulfuric acid consumption, kg/t; row 7 – sulfuric acid concentration, mg/l

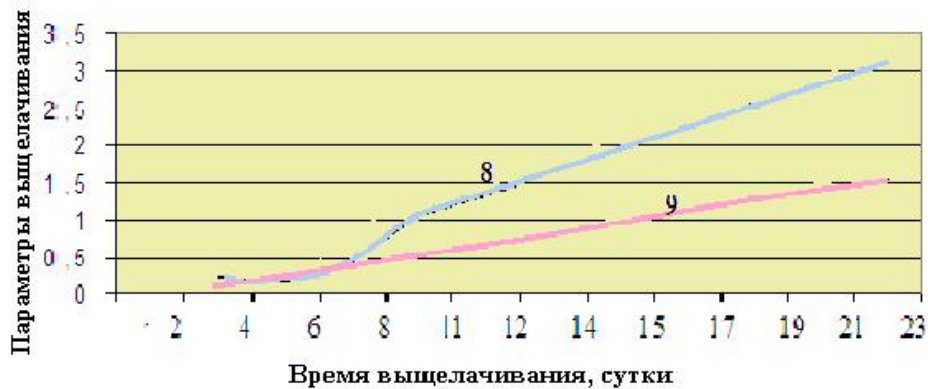


Рис. 5. Зависимость показателей выщелачивания неокисленной руды от времени выщелачивания с перекисью водорода: 8 ряд – Ж/Т; 9 ряд – расход перекиси водорода, кг/т / Fig. 5. Dependence of the leaching indicators of non-oxidized ore on the time of leaching with hydrogen peroxide: Row 8 – W / T; Row 9 – consumption of hydrogen peroxide, kg / t

Как видно из рисунков, показатели выщелачивания неокисленной руды с применением окислителя (перекиси водорода) подчиняются определенным закономерностям. Испытания длились 23 дня с постепенным увеличением расхода серной кислоты от 3,5 до 19 кг/т, а перекиси водорода от 0,085 до 1,61 кг/т. Окислительно-восстановительный потенциал изменялся от 400 до 620 мВ. Концентрация ионов Fe(III) изменялась от 130 мг/л до 690 мг/л на восьмые сутки и затем постепенно уменьшалась до 100 мг/л. Концентрация Fe(II) на четвертые сутки поднялась до 220 мг/л, а затем на восьмые сутки резко упала до нуля. Концентрация урана в продуктивном растворе нарастала в первые 6 дней и достигла величины 300 мг/л на четвертые сутки выщелачивания. Далее концентрация начала падать и на 23-и сутки составила 12 мг/л. Для поддержания процесса выщелачивания концентрация серной кислоты наращивалась от 5 до 21 г/л. Выщелачивание в таком режиме дало возможность в течение 23 суток извлечь 85 % урана. Значение Ж/Т в процессе выщелачивания изменяется от 0,17 до 3,26. Зависимость извлечения урана от времени выщелачивания описывается выражением

$$\varepsilon_n = -1,6 + 9,0 * T - 0,2 * T^2, \% \quad (2)$$

На рис. 6...8 приведены результаты исследования процесса выщелачивания неокисленных руд Хиагдинского месторождения с

применением в качестве стимулятора нитрита натрия.

Как видно из рисунков, показатели выщелачивания неокисленной руды с применением окислителя нитрита натрия также как перекиси водорода подчиняются определенным закономерностям. Испытания длились 26 дней с постепенным увеличением расхода серной кислоты от 4,8 до 22,3 кг/т, а перекиси водорода от 0,12 до 1,57 кг/т. Окислительно-восстановительный потенциал изменялся от 500 до 400 мВ. Концентрация ионов Fe(III) изменялась от 180 до 80 мг/л. Концентрация Fe(II) на 10-е сутки поднялась до 210 мг/л, а затем резко упала на 16-е сутки до нуля. Концентрация урана в продуктивном растворе нарастала в первые 10 дней и достигла величины 250 мг/л на четвертые сутки выщелачивания. Далее концентрация начала падать и на 26-е сутки составила 14 мг/л. Для поддержания процесса выщелачивания концентрация серной кислоты наращивалась от 5 до 22 г/л. Выщелачивание в таком режиме дало возможность в течение 26 суток извлечь 87 % урана. Значение Ж/Т в процессе выщелачивания изменяется от 0,24 до 3,14. Зависимость извлечения урана от времени выщелачивания описывается выражением

$$\varepsilon_n = -6,7 + 7,1 * T - 0,1 * T^2, \% \quad (3)$$

На рис. 9 представлено сопоставление изменений величины Ж/Т по трем вариантам выщелачивания.

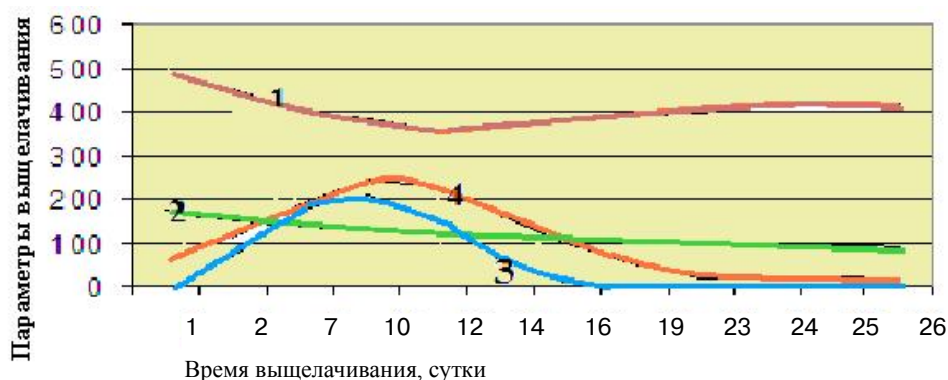


Рис. 6. Зависимость показателей выщелачивания неокисленной руды от времени выщелачивания с нитритом натрия: 1 ряд – ОПВ, мВ; 2 ряд - Fe (III), мг/л; 3 ряд - Fe (II), мг/л; 4 ряд – концентрация урана, мг/л / Fig. 6. Dependence of the leaching indicators of non-oxidized ore on the time of leaching with sodium nitrite: 1 row – OPV, mV; 2 row – Fe (III), mg/l; 3 row – Fe (II), mg/l; 4 row – uranium concentration, mg/l

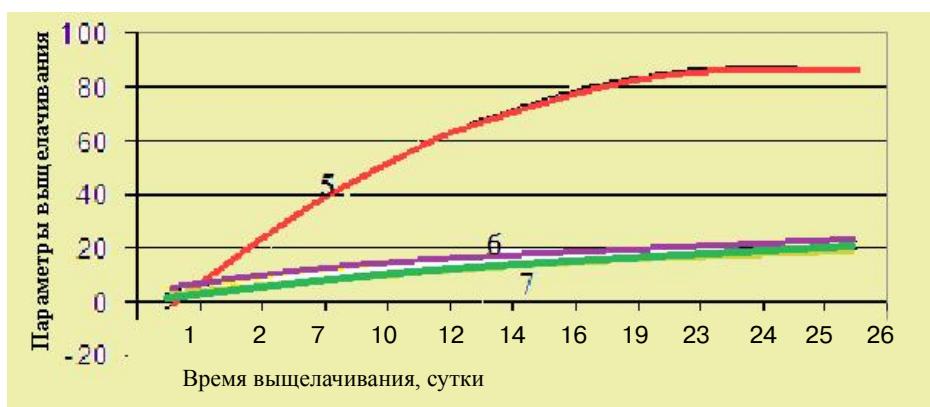


Рис. 7. Зависимость показателей выщелачивания неокисленной руды от времени выщелачивания с перекисью водорода: 5 ряд – извлечение урана, %; 6 ряд – расход серной кислоты, кг/т; 7 ряд – концентрация серной кислоты, мг/л / Fig. 7. Dependence of the leaching indicators of non-oxidized ore on the time of leaching with hydrogen peroxide: Row 5 – uranium extraction, %; Row 6 – sulfuric acid consumption, kg/t; Row 7 – sulfuric acid concentration, mg/l

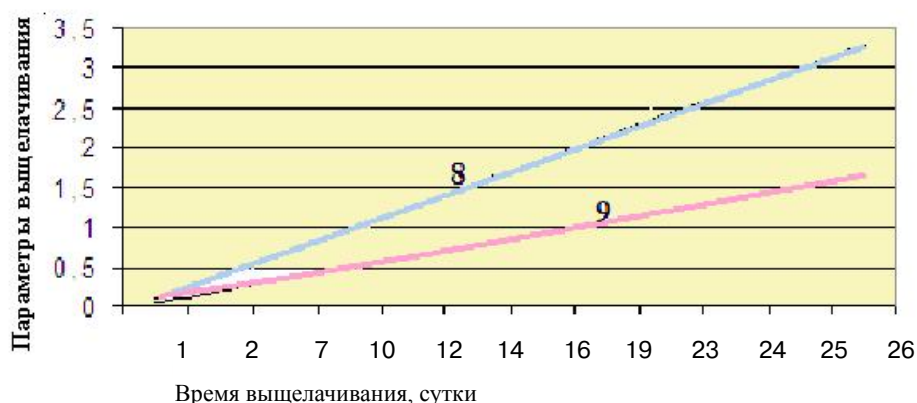


Рис. 8. Зависимость показателей выщелачивания неокисленной руды от времени выщелачивания с нитритом натрия: 8 ряд – Ж/Т; 9 ряд – расход нитрита натрия, кг/т / Fig. 8. Dependence of the leaching indicators of non-oxidized ore on the time of leaching with sodium nitrite: Row 8 – W / T; Row 9 – consumption of sodium nitrite, kg / t



Рис. 9. Зависимость величины Ж/Т от времени выщелачивания неокисленных руд: 1 ряд – без окислителя; 2 ряд – с нитритом натрия; 3 ряд – с перекисью водорода / Fig. 9. Dependence of the W/T value on the leaching time of non-oxidized ores: 1 row – without oxidizer; 2 row – with sodium nitrite; 3 row – with hydrogen peroxide

Из рисунка видно, что по всем трем вариантам наблюдается рост величины Ж/Т в процессе выщелачивания. Показатели соотношения жидкое – твердое при применении окислителей практически идентичны и закономерно изменяются от десятых долей до 2,4...2,6, составляя в среднем 2,0. Немного иначе ведет себя этот показатель при выщелачивании без окислителя: в течение 72 суток наблюдается постепенный рост Ж/Т от нуля до 9, составляя в среднем 4,5.

На рис. 10 показана динамика изменения концентрации серной кислоты в растворе.

Как видно из рисунка, поведение зависимостей концентрации серной кислоты от времени выщелачивания для процессов

с применением окислителей идентичен и их величина изменяется постепенно от 2 до 20 г/л, составляя в среднем 17 г/л. Концентрация растворителя при выщелачивании без окислителя имеет более высокие показатели и изменяется в течение 72 суток от 7 до 35 г/л, составляя в среднем 21 г/л.

На рис. 11 представлена динамика изменения концентрации урана в продуктивном растворе в процессе выщелачивания для всех трех вариантов.

Из рисунка видно, что концентрация серной кислоты в растворе при выщелачивании без применения окислителя имеет тенденцию постепенного уменьшения в течение 80 суток от 50 до 20 мг/л и составляет в сред-

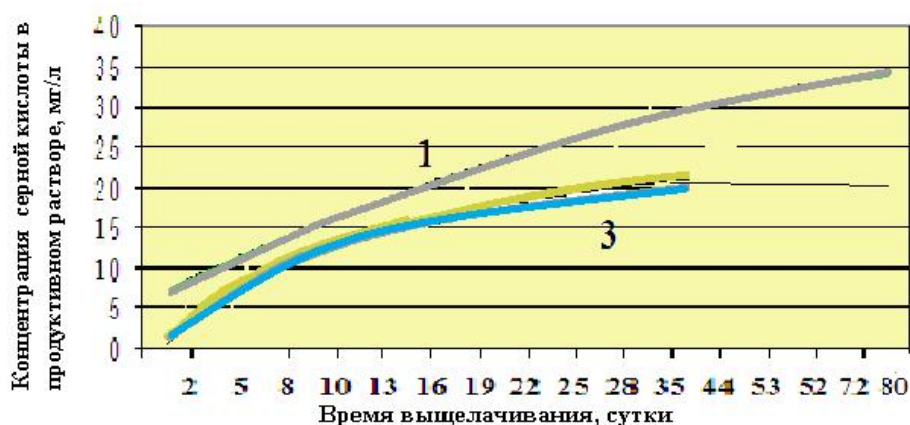


Рис. 10. Зависимость концентрации серной кислоты в растворе от времени выщелачивания неокисленных руд: 1 ряд – без окислителя;; 2 ряд – с перекисью водорода; 3 ряд – с нитритом натрия / Fig. 10. Dependence of the sulfuric acid concentration in solution on the leaching time of non-oxidized ores: 1 row – without an oxidizer;; 2 row - with hydrogen peroxide; 3 row – with sodium nitrite

нем 35 мг/л. Наиболее высокая концентрация урана (до 320 мг/л) достигнута на 4...5-е сутки выщелачивания при применении перекиси водорода. Далее происходило снижение концентрации урана до 50 мг/л на 16-е сутки и далее до уровня 12 мг/л, составляя в среднем 120 мг/л. Максимальная концентрация урана в 250 мг/л достигнута на 10...11-е сутки выщелачивания в присутствии нитрита натрия. Далее концентрация постепенно падала до 14 мг/л, составляя в среднем 110 мг/л.

На рис. 12 представлена динамика выщелачивания урана.

Характер кривых зависимости извлечения урана в продуктивный раствор от времени выщелачивания с применением окислителей практически идентичен: извлечение в 85 % с применением перекиси водорода достигнуто на 23-и сутки, а с применением нитрита натрия (87 %) – на 26-е сутки. Извлечение урана в 88 % без применения окислителя потребовало значительно больше времени – 80 суток.



Рис. 11. Зависимость концентрации урана в продуктивном растворе от времени выщелачивания неокисленных руд: 1 ряд – без окислителя; 2 ряд – с перекисью водорода; 3 ряд – с нитритом натрия /  
Fig. 11. Dependence of the uranium concentration in the productive solution on the leaching time of non-oxidized ores: 1 row – without an oxidizer; 2 row – with hydrogen peroxide; 3 row – with sodium nitrite

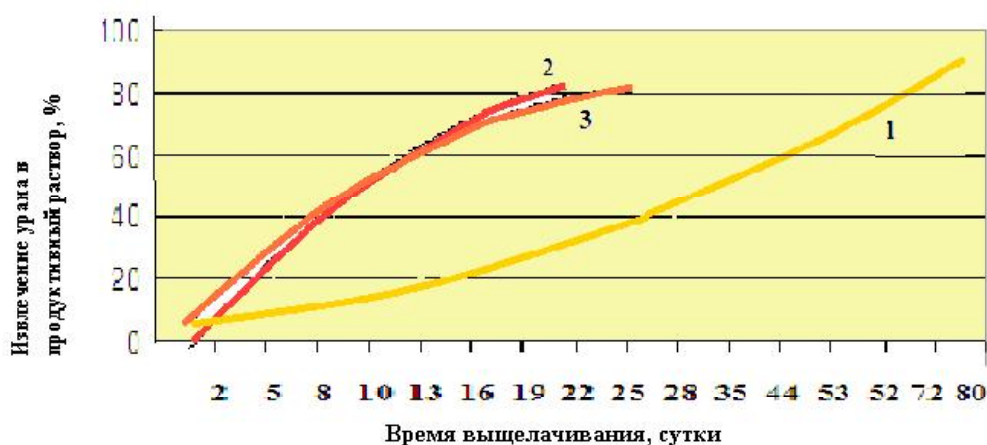


Рис. 12. Зависимость извлечения урана в продуктивный раствор от времени выщелачивания неокисленных руд: 1 ряд – без окислителя; 2 ряд – с перекисью водорода; 3 ряд – с нитритом натрия /  
Fig. 12. Dependence of uranium extraction into a productive solution on the leaching time of non-oxidized ores: 1 row – without an oxidizer; 2 row – with hydrogen peroxide; 3 row – with sodium nitrite



На рис. 13 представлена динамика изменения концентрации Fe(II) в продуктивном растворе в процессе выщелачивания.

При выщелачивании без применения окислителя первоначальная концентрация Fe(II) в растворе составляла 250 мг/л. В течение первых 10 суток концентрация уменьшилась до 50 мг/л. Далее снижение концентрации продолжилось и на 44-е сутки упала практически до нуля. При применении перекиси водорода концентрация Fe(II) в течение пяти суток поднялась до 200 мг/л и на протяжении следующих четырех суток упала прак-

тически до нуля. Концентрация ионов двухвалентного железа при применении в качестве окислителя нитрита натрия нарастала до уровня 200 мг/л в течение первых 10 суток, а в течение следующих 10 суток упала до нуля.

На рис. 14 показана динамика изменения концентрации в растворе Fe(III) в процессе выщелачивания.

Концентрация ионов трехвалентного железа при выщелачивании без окислителя закономерно меняется от 180 до 40 мг/л. При применении перекиси водорода концентрация Fe(III) за первые 10 суток поднимается до



Рис. 13. Зависимость концентрации Fe(II) в продуктивном растворе от времени выщелачивания неокисленных руд: 1 ряд – без окислителя; 2 ряд – с перекисью водорода; 3 ряд – с нитритом натрия / Fig. 13. Dependence of the Fe(II) concentration in the productive solution on the leaching time of non-oxidized ores: 1 row – without an oxidizer; 2 row – with hydrogen peroxide; 3 row – with sodium nitrite



Рис. 14. Зависимость концентрации Fe(III) в продуктивном растворе от времени выщелачивания неокисленных руд: 1 ряд – без окислителя; 2 ряд – с перекисью водорода; 3 ряд – с нитритом натрия / Fig. 14 Dependence of Fe(III) concentration in the productive solution on the leaching time of non-oxidized ores: 1 row – without oxidizer; 2 row – with hydrogen peroxide; 3 row – with sodium nitrite

690 мг/л, а затем к окончанию опыта падает до 100 мг/л. При использовании в качестве окислителя нитрита натрия, концентрация трехвалентного железа равномерно снижается от 180 до 100 мг/л.

Подводя итоги проведенным исследованиям, можно сделать следующие *выводы*:

- наименьшее отношение Ж/Т наблюдается при выщелачивании с применением перекиси водорода, что означает меньший объем подаваемых рабочих растворов;

- концентрация серной кислоты в рабочем растворе при выщелачивании с применением окислителей практически одинакова и на 40 % ниже, чем при выщелачивании без окислителя;

- наибольшая концентрация урана в продуктивном растворе наблюдается при выщелачивании с применением перекиси водорода и составляет в среднем 130 мг/л;

- извлечение урана в продуктивный раствор с применением окислителей практически дает идентичный результат и составляет 85...87 % с той лишь разницей, что с применением перекиси водорода срок выщелачивания сокращается на три дня; для достижения тех же результатов при выщелачивании без окислителя требуется времени в три раза больше;

- наименьшее количество двухвалентного железа образуется при выщелачивании с применением перекиси водорода (60 мг/л), с применением нитрита натрия несколько больше (80 мг/л), а без окислителя – 110 мг/л;

- наибольшая концентрация трехвалентного железа в растворе наблюдается при применении перекиси водорода (300 мг/л), что в три раза больше двух других вариантов.

Таким образом, анализ результатов лабораторных исследований выщелачиваемости неокисленных урановых руд Хиагдинского месторождения показал, что по большинству технологических показателей применение в качестве окислителя перекиси водорода превосходит показатели выщелачиваемости руд с применением нитрита натрия:

- имеет минимальный объем выщелачиваемых растворов;

- минимальный расход серной кислоты;

- наиболее высокую концентрацию урана в продуктивных растворах;

- минимальный срок извлечения урана до уровня 80 %;

- минимальную концентрацию ионов двухвалентного железа, что минимизирует переосаждение урана в виде гидроксида уранила;

- максимальное количество ионов трехвалентного железа, что активизирует процесс разрушения урановых минералов и способствует более быстрому переходу урана в продуктивный раствор.

Для более полного подтверждения эффективности применения перекиси водорода в качестве окислителя проведен сравнительный расчет затрат на выполнения этих работ по вариантам.

Экономический расчет подтвердил эффективность применения в качестве окислителя перекиси водорода, при котором этот вариант в три раза дешевле варианта выщелачивания без окислителя и на 15 % дешевле варианта с применением нитрита натрия.

Необходимо отметить, что процесс лабораторного выщелачивания проводится в идеализированных условиях, поэтому в натурных условиях достичь извлечения более чем 80 % в столь короткий период времени практически невозможно из-за множества сдерживающих факторов: неоднородность горно-геологических условий, низкая температура среды, различный коэффициент фильтрации на разных участках залежи, переменной мощностью рудного пласта и т. д. Тем не менее, проведение лабораторных испытаний с применением различных стимуляторов скважинного выщелачивания урана в равных условиях позволяет выявить основные особенности применения этих стимуляторов и установить эффективность их использования [7; 8; 9].

Опыты с понижением концентрации серной кислоты до 5 г/л с теми же концентрациями окислителей показали, что процесс выщелачивания заметно снижает свою интенсивность. Это говорит о том, что концентрация выщелачивающего реагента должна быть не менее 25 г/л.

Результаты проведенных испытаний показывают, что и в случае применения нитрита слабая кислотность увеличивает расход окислителя. Но его присутствие необходимо и на стадии отработки, так как величина ОВП в опыте с 5 г/л кислоты составляет на этой стадии лишь 430...440 мВ против аналогичного опыта с перекисью в 450...490 мВ.

Сравнительная характеристика показателей выщелачивания в присутствии перекиси водорода и нитрата натрия показывает, что применение в качестве окислителя перекиси водорода более эффективно по сравнению с нитратом натрия.

Таким образом, рекомендуется к применению окислитель – перекись водорода при следующем режиме выщелачивания: на стадии закисления кислотность ВР – не менее 25 г/л, концентрация перекиси водорода 0,5 г/л (на 100 % вещества), ОВП до 450 мВ и выше.

## Список литературы

1. Гордиенко О. Е., Бучихин Е. П., Ряховский М. И. Проведение опытных работ по подземному выщелачиванию урана с применением окислителей на месторождении Долматово: Отчет ВНИИХТ, ТИ/2909, 2004.
2. Машковцев Г. А. Урановый потенциал России // Актуальные проблемы урановой промышленности: сб. трудов VIII Междунар. науч.-практ. конф. Астана: НАК, 2017. 451 с.
3. Отчет по теме: «Выбор наиболее эффективного окислителя для литолого – геохимических условий Хиагдинского месторождения»; этап 1б: «Разработка способов устранения негативного влияния солевого состава ПР на цикл сорбционно-десорбционной переработки при использовании различных окислителей». Договор № 211 от 25.04.2011 г. Шифр темы: 130– С<sub>2</sub> Казатомпром». Алматы, 2017.
4. Поезжаев И. П., Полиновский К. Д., Горбатенко О. А. Геотехнология урана / под общ. ред. Ю. В. Демехова, Б. М. Ибраева. Алматы: КНИТУ им. К. И. Сатпаева, 2017. 327 с.
5. Тарасов Н. Н., Кочкин Б. Т., Величкин В. И., Дойникова О. А. Условия образования и факторы рудо-контроля месторождений Хиагдинского рудного поля // Институт геологии рудных месторождений. 2018. Т. 60, № 4. С. 392–400.
6. 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. 2018. Т. 61, № 3. С. 275–281.
7. 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.
8. 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 // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2017. Vol. 311. P. 2129–2134.
9. Prävälje R., Bando G. Nuclear energy: Between global electricity demand, worldwide decarbonisation imperativeness, and planetary environmental // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 209. P. 81–92.

## References

1. Gordiyenko O. Ye., Buchikhin Ye. P., Ryakhovsky M. I. *Provedeniye opytnykh rabot po podzemnomu vyschelachivaniyu urana s primeneniye okisliteley na mestorozhdenii Dolmatovo: Otchet VNIKHHT, TI/2909, 2004* (Experimental work on underground leaching of uranium using oxidizing agents at the Dolmatovo deposit: Report of VNIKHHT, TI / 2909, 2004).
2. Mashkovtsev G. A. *Aktualnye problemy uranovoy promyshlennosti: sb. trudov VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Actual problems of the uranium industry: Collected works of the VIII Intern. scientific-practical. conf.)*. Astana: NAK, 2017. 451 p.
3. *Otchet po teme: «Vybor naiboleye effektivnogo okislitelya dlya litologo – geohimicheskikh usloviy Khiagdinskogo mestorozhdeniya»; etap 1b: «Razrabotka sposobov ustraneniya negativnogo vliyaniya solevogo sostava PR na tsikl sorbtionno-desorbtionnoy pererabotki pri ispolzovanii razlichnykh okisliteley». Dogovor № 211 ot 25.04.2011 g. Shifr temy: 130– S2. Kazatomprom»* (Report on the topic: “The choice of the most effective oxidizing agent for the lithological and geochemical conditions of the Khiagda deposit”; stage 1b: “Development of ways to eliminate the negative impact of the salt composition of the PR on the cycle of sorption-desorption processing when using various oxidizing agents.” Agreement No. 211 dated by April 25, 2011. Subject code: 130–C2. Kazatomprom). Almaty, 2017.
4. Poyezzhayev I. P., Polinsky K. D., Gorbatenko O. A. *Geotekhnologiya urana / pod obshch. red. Yu. V. Demekhova, B. M. Ibrayeva (Geotechnology of uranium / ed. ed. Yu. V. Demekhova, M. Ibrayeva. Almaty: KNRTU named after K. I. Satpaeva, 2017. 327 p.*

5. Tarasov N. N., Kochkin B. T., Velichkin V. I., Doynikova O. A. *Institut geologii rudnyh mestorozhdeniy* (Institute of Geology of Ore Deposits), 2018, vol. 60, no. 4, pp. 392–400.
6. Khodzhiyev S. K., Nazarov Kh. M., Ermatov K. A., Mirsaidov I. U., Boboyorov M. D. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan* (Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. 2018. vol. 61, no. 3, pp. 275–281.
7. 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.
8. Ma Q., Feng Z. G., Liu P., Lin X. K., Li Z. G., Chen M. S. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* (Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry), 2017, vol. 311, pp. 2129–2134.
9. Práválie R., Bandoc G. *Journal of Environmental Management* (Journal of Environmental Management), 2018, vol. 209, pp. 81–92.

### Информация об авторе

---

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

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

### Information about the author

---

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

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

### Для цитирования

---

Михайлов А. Н. Овсейчук В. А. Влияние различных реагентов на эффективность подземного скважинного выщелачивания урана из руд Хиэгдинского месторождения // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 4. С. 16–27. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-4-16-27.

Mikhailov A., Ovseychuk V. Studies of the various reagents effect on the efficiency of underground borehole leaching of uranium from the ores of the Khiagdinsky deposit// *Transbaikal State University Journal*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 16–27. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-4-16-27.

Статья поступила в редакцию: 25.04.2022 г.  
Статья принята к публикации: 27.04.2022 г.