



## ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-20>

УДК 553.495.061.4



## Влияние глинистых минералов на процесс подземного выщелачивания урана

О. Ф. Петухов<sup>1</sup>, И. У. Халимов<sup>1</sup>   , В. П. Истомин<sup>2</sup>, Н. М. Каримов<sup>1</sup> <sup>1</sup> *Навоийский государственный горно-технологический университет, г. Навои, Узбекистан*<sup>2</sup> *Навоийский горно-металлургический комбинат, г. Навои, Узбекистан* [halimov\\_i@bk.ru](mailto:halimov_i@bk.ru)

## Аннотация

В последние годы с развитием техники и технологии подземного выщелачивания (ПВ) доизвлечение урана из ранее отработанных блоков становится не только актуальной, но и вполне достижимой задачей, так как извлечение остаточного запаса урана из ранее отработанных блоков не требует дополнительных расходов на необходимую инфраструктуру. Одним из важнейших факторов формирования остаточного запаса урана в отработанных блоках является присутствие глинистых минералов в рудном горизонте. В связи с этим нами был проведен ряд исследований по изучению отрицательного и положительного влияния глинистых минералов на процесс ПВ. Водопроницаемость и относительно хорошая фильтрация (не менее 0,5–1 м/сут) руд и пород продуктивного горизонта занимают первое место в ряду гидрогеологических факторов, влияющих на эффективность ПВ урана. Вторым по значимости гидрогеологическим фактором является отсутствие гидрологической связи продуктивного водоносного горизонта с непродуктивными горизонтами, то есть обязательное наличие водоупоров. При этом роль глин в указанных гидрогеологических факторах – двоякая. В первом случае наличие глин негативно сказывается как на скорости фильтрации растворов, так и на извлечении урана. Во втором – наличие глинистых минералов (в качестве водоупоров) усиливает эффект ПВ. В результате исследования дана оценка роли глинистых минералов в процессе подземного выщелачивания урана; определены коэффициенты диффузии нитрат-ионов в глинах и рассчитано защитное действие водоупоров; установлено влияние содержания глин в рудном песчаном горизонте на коэффициенты фильтрации растворов; определены статические обменные емкости глин по урану путем исследования процесса сорбции урана на глинистых образцах из сернокислых и бикарбонатных растворов. Проведенными исследованиями установлены коэффициенты диффузии нитрат-ионов в монтмориллонитовых и каолиновых глинах, которые составили  $3,34 \cdot 10^{-6}$  и  $2,14 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с. С учетом полученных расчетами значений коэффициентов диффузии защитное время глинистого водоупора для нитрат-ионов составило 43 года. При 20%-ном содержании глинистых минералов коэффициент фильтрации растворов снижается до значений, когда условия ПВ становятся неблагоприятными. Экспериментально установлено, что сорбция урана глинистыми минералами зависит как от природы глин, так и от состава раствора. Из сернокислых растворов сорбция урана протекает заметно лучше, чем из бикарбонатных растворов. При этом наибольшие значения статической обменной емкости по урану получены для бентонита (104 мг/г).

## Ключевые слова

уран, подземное выщелачивание, глина, фильтрация, коэффициент диффузии, водопроницаемость, сорбция


## Для цитирования

Petukhov O.F., Khalimov I.U., Istomin V.P., Karimov N.M. The effect of clay minerals on in-situ leaching of uranium. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):39–46. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-20>

## BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

## The effect of clay minerals on in-situ leaching of uranium

O. F. Petukhov<sup>1</sup>, I. U. Khalimov<sup>1</sup>   , V. P. Istomin<sup>2</sup>, N. M. Karimov<sup>1</sup> <sup>1</sup> *NavoiState Mining and Technological University, Navoi, Uzbekistan*<sup>2</sup> *Navoi Mining and Metallurgical Complex, Navoi, Uzbekistan* [halimov\\_i@bk.ru](mailto:halimov_i@bk.ru)

## Abstract

In recent years, with the development of techniques and methods for in-situ leaching (ISL), additional uranium extraction from previously worked-out blocks is becoming not only relevant, but also quite achievable. In this case, the extraction of residual uranium reserves from previously worked-out blocks does not require additional costs for the necessary infrastructure. One of the most important factors in the formation of residual uranium



reserves in worked-out blocks is the presence of clay minerals in the ore horizon. In this regard, we conducted a number of studies on the adverse and positive effects of clay minerals on ISL process. Water permeability and relatively good filtration (not less than 0.5–1 m/day) of ores and rocks of a productive horizon (aquifer) is the most important hydrogeological factors affecting the performance of uranium ISL. The second most important hydrogeological factor is the lack of fluid communication between the productive aquifer and non-productive aquifers, i.e., the obligatory presence of aquicludes. The role of clays in these hydrogeological factors is twofold. On the one hand, the presence of clays negatively affects both the solutions filtration rate and uranium extraction. On the other hand, the presence of clay minerals (forming an aquiclude) enhances the effect of ISL. The study findings allowed the role of clay minerals in uranium ISL to be assessed. The diffusion coefficients of nitrate ions in the clays were determined, and the protective effect of aquicludes was calculated. The effect of the clay content in the ore sand horizon on the solutions filtration coefficients was also established. The static uranium exchange capacity of clays was determined by studying the process of uranium sorption by clay samples from sulfate and bicarbonate solutions. The studies established the diffusion coefficients of nitrate ions in montmorillonite and kaolinite clays, which amounted to  $3.34 \cdot 10^{-6}$  and  $2.14 \cdot 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s. Taking into account the calculated values of diffusion coefficients, the protective time of the clayey aquiclude for nitrate ions was 43 years. At 20 % clay minerals content, the solution filtration coefficient decreases to values where ISL conditions become unfavorable. It was found experimentally that the sorption of uranium by clay minerals depends on both the nature of the clays and the composition of the solution. Uranium sorption from sulfate solutions proceeds noticeably better than that from bicarbonate solutions. The highest values of the static uranium exchange capacity were obtained for bentonite (104 mg/g).

### Keywords

uranium, ISL, clay, filtration, diffusion coefficient, water permeability, sorption

### For citation

Petukhov O.F., Khalimov I.U., Istomin V.P., Karimov N.M. The effect of clay minerals on in-situ leaching of uranium. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):39–46. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-20>

## Введение

Добыча полезных ископаемых на основе технологий подземного выщелачивания (ПВ) находит масштабное воплощение и обеспечивает эффективную работу горнопромышленного комплекса во многих странах [1–4]. Очевидно, что свойства горных пород и минералов, принимающих участие в процессах ПВ, определяют его успешность. Поэтому исследования, направленные на изучение ключевых физических и химических процессов при реализации технологий ПВ, имеют большое значение.

В более ранних исследованиях изучению влияния свойств глин на процесс ПВ уделено, на наш взгляд, недостаточное внимание [5–8]. Так, в работах [5, 6] акцент сделан на влиянии глин на фильтрацию растворов через рудный горизонт, однако количественные характеристики коэффициентов фильтрации не указаны. В работе [7] роль глинистых водоупоров впервые включена в факторы классификации месторождений, обрабатываемых методом ПВ, но численные значения коэффициентов диффузии элементов не представлены, нет примеров расчета мощности защитного водоупорного слоя. В работе [8] описано влияние глин на водопроницаемость рудного пласта, но так же, как и в работах [5–7], ничего не сказано о влиянии глинистых минералов на сорбцию урана из продуктивных растворов, приводящую к потерям выщелоченного металла.

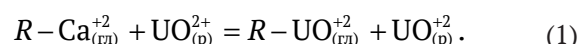
Целью работы явилось: а) изучение коэффициентов диффузии в глинистых минералах и проведение расчетов мощности защитного водоупорного слоя; б) изучение влияния содержания глинистых минералов на коэффициент фильтрации растворов; в) изучение сорбции урана глинистыми минералами.

## Позитивное влияние свойств

### глинистых минералов на процессы ПВ

С целью установления мощности (высоты) глинистых водоупоров в качестве экрана для защиты от вредного воздействия растворов выщелачивания на природные воды нами проведены исследования по определению коэффициентов диффузии некоторых химических компонентов в глинах. Поскольку глинистые водоупоры представлены в основном монтмориллонитом (бентонитом), реже – каолинитом, то эти глины и были использованы в исследованиях. При этом было принято во внимание, что скорость проникновения химических компонентов через глины лимитируется диффузией [9]. Во-вторых, в качестве химического компонента был выбран относительно токсичный NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-анион (ПДК = 45 мг/л), присутствующий в продуктивных растворах ПВ урана.

Использовать в исследованиях по диффузии в качестве химических компонентов катионы металлов (например, UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>) некорректно, поскольку процесс диффузии сопровождается катионообменной сорбцией металлов на глинах (в обмен на Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>) по реакции:



Что касается анионов, то в соответствии с данными работы [9] и нашими исследованиями [10] NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-анионы бентонитом и каолинитом не сорбируются.

В экспериментальных исследованиях использовали ненарушенные образцы бентонитовой и каолинитовой глин. Идентификацию глин на составляющие их минералы проводили рентгеноструктурным методом с использованием дифрактометра «Дрон-3,0» на трубке 03БСВ – 25-Cu. Содержание обменных форм

катионов и суммарную катионообменную емкость (КОЕ) глин определяли путем их взаимодействия с 0,1N раствором ацетата аммония при pH = 7,0 [11]. Состав исследуемых образцов глин приведен в табл. 1, из которой видно, что щелочно-земельный бентонит представлен на 93 % монтмориллонитом, а содержание основного минерала в образце каолиновой глины составляет 88,2 %.

Исследования по определению коэффициентов диффузии в глинах проводили по методике, описанной в работах [12, 13], на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 1.

Образец глины ненарушенной структуры с известными площадью  $S$  и толщиной (мощностью)  $h$  помещался в стеклянную трубку. Для устойчивости и предохранения от разрушения с обеих сторон от образца помещали марлевые тампоны. Трубку с образцом глины через резиновые пробки соединяли с сосудами. В сосуд  $A$  заливался раствор объемом  $V_A$  с известной концентрацией  $\text{NO}_3^-$ . В сосуд  $B$  заливалась дистиллированная вода объемом  $V_B$ . Уровень жидкостей в сосудах поддерживался одинаковым с обеих сторон. С помощью магнитных мешалок производи-

лось перемешивание растворов для создания равномерной концентрации  $\text{NO}_3^-$  по всему объему. Постоянные условия опытов:  $t = 200^\circ\text{C}$ , перемешивание растворов со скоростью  $n = 50$  об/мин;  $V_A = V_B = 1$  л.

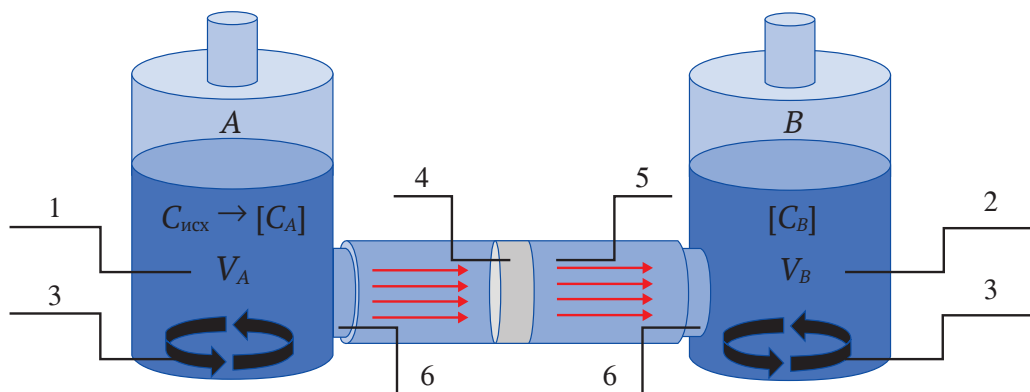
Вычисление коэффициентов диффузии проводили на базе полученных экспериментальных данных с использованием уравнения первого закона Фика:

$$D = \Delta m(h/\tau)S(C_A - C_B), \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $\Delta m$  – масса вещества, перенесенного в процессе диффузии, мг,  $\Delta m = C_B V_B$ ;  $h$  – толщина образца глины, см;  $\tau$  – время диффузии, с;  $S$  – площадь образца глины,  $\text{см}^2$ ;  $C_A$  – равновесная концентрация в сосуде  $A$ ,  $\text{мг}/\text{см}^3$ ;  $C_B$  – равновесная концентрация в сосуде  $B$ ,  $\text{мг}/\text{см}^3$ .

Условия опытов, полученные результаты и выполненные расчеты коэффициентов диффузии  $\text{NO}_3^-$ -ионов в глинах представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, полученные значения коэффициентов диффузии хорошо согласуются с результатами, представленными в работах [14, 15]. В частности, по данным работы [15] коэффициент диффузии в бентоните составил  $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ .



**Рис. 1.** Схема лабораторной установки для определения коэффициентов диффузии в глинах: 1 – сосуд  $A$  с исходной концентрацией  $C_{\text{исх}}$ , равновесной концентрацией  $C_A$  и объемом  $V_A$ ; 2 – сосуд  $B$  с равновесной концентрацией  $C_B$  и объемом  $V_B$ ; 3 – перемешивающие устройства; 4 – ненарушенный образец глины; 5 – стеклянная трубка, соединяющая сосуды; 6 – резиновые пробки

Таблица 1

Состав глин

Образец глины	Минеральный состав, %				Содержание противоионов, г/кг				КОЕ, г-экв/кг
	Монтмориллонит	Каолинит	Серицит	Кварц	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	
Щелочно-земельный бентонит	93,0	2,0	5,0	–	6,32	0,60	0,05	0,15	0,372
Каолинит	–	88,2	5,8	6,0	1,85	0,19	0,07	0,12	0,113

Таблица 2

Результаты по определению коэффициентов диффузии

Образец глины	Условия опытов				Результаты				
	$h$ , см	$S$ , $\text{см}^2$	$C_{\text{NO}_3(\text{исх})}$ , $\text{мг}/\text{см}^3$	$\tau$ , с	$[C_A]$ , $\text{мг}/\text{см}^3$	$[C_B]$ , $\text{мг}/\text{см}^3$	$C_A - C_B$ , $\text{г}/\text{см}^3$	$\Delta m$ , мг	$D$ , $\text{см}^2/\text{с}$
Бентонит	0,5	7,0	1,0	$2,6 \cdot 10^5$	0,65	0,35	0,30	350	$3,34 \cdot 10^{-6}$
Каолинит	0,5	7,0	1,0	$2,6 \cdot 10^5$	0,70	0,30	0,40	300	$2,14 \cdot 10^{-6}$

Во-вторых, коэффициент диффузии в бентоните примерно в 1,5 раза выше, чем в каолините. Это объясняется тем, что каолинит имеет прочную, неподвижную решетку, межпакетное расстояние в которой составляет 0,71–0,72 нм. В монтмориллоните пакет кристаллической решетки подвижный, трехслойный; межпакетное расстояние составляет 1,5 нм и может расширяться до 14 нм. Различие в решетках глин хорошо видно на рис. 2.

Установленные значения коэффициентов диффузии имеют большое практическое значение, поскольку позволяют рассчитать время защитного действия глинистого водоупора. Например, концентрация  $\text{NO}_3^-$ -ионов в продуктивных растворах рудного горизонта  $C_{\text{исх}} = 2,0$  г/л (2 мг/см<sup>3</sup>) и в процессе не меняется за счет обновления потока. Концентрация  $\text{NO}_3^-$ -ионов в природных водах не должна превышать  $C_B = 0,045$  г/л (0,045 мг/см<sup>3</sup>). Площадь бентонитового водоупора  $S = 1000$  м<sup>2</sup> ( $1 \cdot 10^7$  см<sup>2</sup>), а мощность  $h = 10$  м ( $1 \cdot 10^5$  см). Объем природных вод принимаем 2000 м<sup>3</sup> ( $2 \cdot 10^9$  см<sup>3</sup>). Масса  $\text{NO}_3^-$ , перенесенных в результате диффузии в природные воды,  $\Delta m = 9 \cdot 10^7$  мг. По формуле (2) определяем время защитного действия водоупора:

$$\begin{aligned} \tau &= m(h/D)S(C_A - C_B) = \\ &= 9 \cdot 10^7 \cdot 1 \cdot 10^5 / 3,34 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^7 \cdot (2,0 - 0,045) = \\ &= 1,37 \cdot 10^9 \text{ с или 43 года.} \end{aligned}$$

Однако на этом положительное влияние глин на процесс ПВ заканчивается.

### Негативное влияние свойств

#### глинистых минералов на процессы ПВ

Другие три свойства глинистых минералов: крайне низкий коэффициент фильтрации ( $K_f = 10^{-4}$ – $10^{-6}$  м/сут [15, С. 3–6]), заметные сорбционные свойства по отношению к катионам металлов [10] и склонность к образованию коллоидных растворов – имеют негативное влияние на процесс ПВ урана.

Вначале подробнее остановимся на низких коэффициентах фильтрации глин. Рудные водопроницаемые горизонты представлены в основном песками. Помимо песков, в рудном горизонте часто присутствуют глинистые минералы, цементирующие пески (отсюда название – «месторождения песчаникового типа» [16]). Содержание глинистых минералов ограничивает скорость процесса фильтрации раствора через рудный горизонт.

Нами проведены исследования по определению коэффициентов фильтрации воды и растворов через песок и через смесь песка с различным содержанием глин – бентонита и каолинита. Исследования проводили в стационарном режиме (слой фильтрующего материала был постоянным во всех опытах) при постоянном градиенте напора по ГОСТ 25584–2016<sup>1</sup>. В опытах использовали тщательно отмытый песок фракции 0,25–0,50 мм и измельченные глины

<sup>1</sup> ГОСТ 25584–2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. М.: Стандартинформ; 2016.

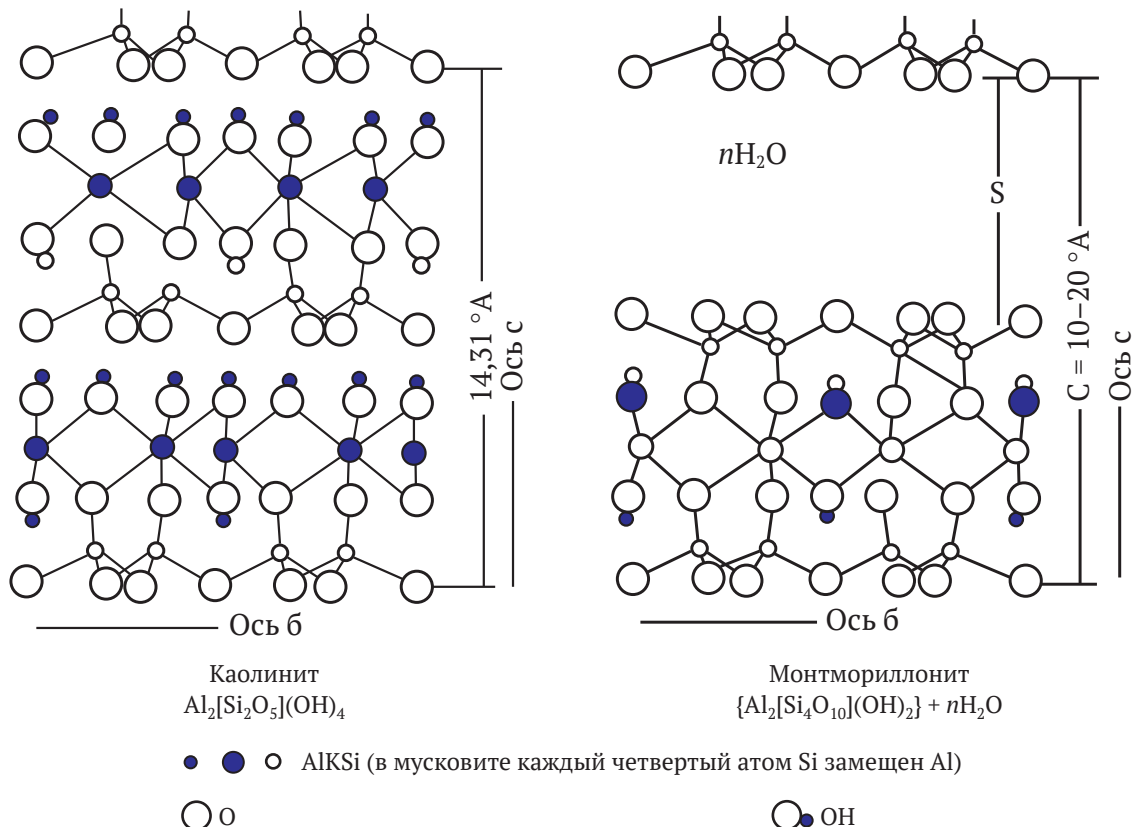


Рис. 2. Схема минералов глин

Таблица 3

**Влияние содержания глины в песке на коэффициенты фильтрации воды и растворов**

Содержание глины в песке, %	$K_f$ в присутствии бентонита, см/с · 10 <sup>-2</sup>			$K_f$ в присутствии каолинита, см/с · 10 <sup>-2</sup>		
	H <sub>2</sub> O	10 г/л H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 г/л NaHCO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	10 г/л H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 г/л NaHCO <sub>3</sub>
0,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
3,0	1,2	1,1	1,0	1,3	1,3	1,1
6,0	0,9	0,8	0,6	1,1	1,0	0,9
15,0	0,4	0,3	0,2	0,6	0,5	0,4
20,0	0,2	0,1	0,05	0,3	0,2	0,1

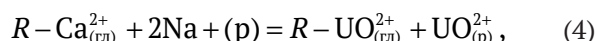
(см. табл. 1). Образцы песка с заданным содержанием глины перед загрузкой в цилиндр фильтрационной установки тщательно перемешивали. В качестве фильтрующих жидкостей использовали воду и растворы 10 г/л H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 1 г/л NaHCO<sub>3</sub>. Расчет коэффициента фильтрации  $K_f$  вели по уравнению Дарси на базе полученных экспериментальных данных, определив скорость фильтрации

$$v = K_f (\Delta P / h), \quad (3)$$

где  $K_f$  – коэффициент фильтрации, см/с;  $v$  – скорость фильтрации, см/с,  $v = V/S\tau$ ;  $V$  – объем отфильтрованной жидкости, см<sup>3</sup>;  $S$  – площадь фильтрации, см<sup>2</sup>;  $\tau$  – время фильтрации, с;  $\Delta P/h$  – градиент давления в слое (тангенс угла наклона графика скорости фильтрации ко времени фильтрации);  $\Delta P$  – перепад давления водного столба, см;  $h$  – толщина фильтрующего слоя, см.

Результаты исследований по определению коэффициентов фильтрации приведены в табл. 3.

Из результатов, приведенных в табл. 3, видно, что  $K_f$  жидкостей заметно уменьшается с увеличением содержания глины. При этом  $K_f$  в присутствии бентонита ниже, чем в присутствии каолинита. Это объясняется различными свойствами глины к набуханию, о чем было сказано выше. Использование растворов серной кислоты и бикарбоната натрия также сказывается на  $K_f$ , причем использование раствора NaHCO<sub>3</sub> (даже меньшей концентрации, чем серной кислоты) сказывается сильнее. Этот факт объясняется тем, что за счет катионного обмена ионов Na<sup>+</sup> на противоионы Ca<sup>2+</sup>, находящиеся в глинах,



происходит набухание глины. При содержании глины 20 %  $K_f$  снижается до значений, когда условия протекания ПВ становятся неблагоприятными [6, С. 405].

в) Далее остановимся на сорбционных свойствах глины, негативно влияющих на процесс добычи урана методом ПВ. В табл. 4 приведены данные по значениям КОЕ некоторых глинистых минералов [17].

Как видно из табл. 4, наибольшими значениями КОЕ обладают вермикулит и монтмориллонит – основной минерал бентонитовых глины, наиболее характерных для условий ПВ урана.

Нами проведены исследования конкретно по сорбции урана из различных растворов бентонитовой и каолинитовой глинами. Исследования проводились

в статических условиях с использованием термостатированного реактора с мешалкой при температуре 20 °С, соотношении Т : Ж = 1 : 1000 и времени агитации 1 ч (режим насыщения) [17]. После окончания агитации суспензию фильтровали, осадок промывали водой, сушили и анализировали на содержание урана методом рентгеноспектрального анализа на спектрометре АРФ-7. В опытах использовали реальные производственные растворы, отобранные с участков сернокислотного и бикарбонатного ПВ урана. Состав растворов представлен в табл. 5. В табл. 6 приведены экспериментальные данные по статической обменной емкости (СОЕ) глины по урану.

Таблица 4

**Катионообменные емкости глинистых минералов**

Тип глины	Минерал	КОЕ, г-экв/кг
Группа каолинитов	Каолинит	0,02–0,10
	Мусковит	0,105
Группа иллитов	Иллит	0,13–0,42
	Аттапульгит	0,18–0,22
Группа монтмориллонита	Нонтронит	0,57–0,64
	Сапонит	0,69–0,81
	Монтмориллонит	0,8–1,5
Смолообразные производные	Биотит	0,03
	Вермикулит	1,0–1,5

Таблица 5

**Состав производственных растворов ПВ**

Раствор	Концентрация, мг/л						pH
	U	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	
Сернокислотный	40,4	12750	–	730	240	544	1,2
Бикарбонатный	36,2	67	665	30	–	–	9,3

Таблица 6

**Результаты по определению статической обменной емкости глины по урану**

Образец глины	СОЕ глины по урану, мг/г	
	из сернокислого раствора	из бикарбонатного раствора
Бентонит	104	15
Каолинит	32	5



Как видно из представленных в табл. 6 результатов, сорбция урана глинами существенно зависит от природы как глины, так и раствора. Для бентонита СОЕ по урану заметно выше, чем для каолинита, что объясняется более высокими значениями КОЕ (см. табл. 1). Сорбция урана из сернокислых растворов также заметно выше, чем из бикарбонатных, поскольку константы устойчивости сульфатных анионных комплексов уранила ( $K = 76-2500$ ) значительно меньше карбонатного комплекса ( $K = 2,0 \cdot 10^{18}$ ). С большой степенью вероятности можно утверждать, что сорбция урана из бикарбонатных сред протекает не по ионообменному механизму, а как адсорбция.

Известно, что в глинистых породах осадочного комплекса часто встречается углефицированная органика, которая также является хорошим сорбентом урана.

Нужно отметить, что лабораторные исследования не моделируют в полной мере природные условия. Отличия лабораторных условий проведения опытов от реально существующих процессов состоят в отсутствии горного давления и связанного с ним изменения величины пористости, влажности и анизотропной составляющей искусственно приготовленного пласта глины.

Очевидно, что имитация горного давления при проведении исследований требует использования специальных установок. Что касается изотропности образцов, то ясно, что количественные связи между отдельными параметрами могут быть установлены только при однородности состава и знании его характеристик.

В любом случае, в реальных условиях ПВ наряду с процессом выщелачивания урана параллельно происходит процесс частичной сорбции урана глинистыми минералами, причем как пограничной поверхностью глинистых водоупоров, так и глинами, находящимися в песчаном рудном горизонте.

В заключение рассмотрим еще три свойства глинистых минералов, оказывающих негативное влияние на процесс ПВ. Прежде всего – это свойство глин образовывать коллоидные частицы. При взаимодействии глин с большим объемом растворов, что имеет место при ПВ, происходит пептизация – процесс образования глиняных коллоидных частиц (гелей). Гели, увлекаемые потоком продуктивных растворов, движутся в направлении откачных скважин. При этом часть гелей сорбируется на поверхности вмещающих пород, часть оседает на фильтрах, а часть откачивается с продуктивным раствором на сорбционное извлечение урана. Для предотвращения попадания гелей и других твердых частиц в сорбционные колонны на рудниках ПВ предусмотрены карты-отстойники. Однако в случаях, когда концентрация коллоидных частиц велика (образуются мутные опалесцирующие растворы), поверхности карт отстойников не хватает, происходит забивание сорбционной смолы этими частицами, что приводит к снижению производительности сорбционных колонн, а порой и к их остановке. При этом сорбированный коллоидными частицами глины уран теряется с осадками на дне карт-отстойников.

При бурении и сооружении технологических скважин для ПВ в разрезах часто встречаются гли-

нистые слои и прослои. В процессе бурения происходит обводнение глин, что приводит к их набуханию внутрь скважины и уменьшению заданного диаметра ствола. Это, в свою очередь, препятствует спуску обсадной колонны. На практике приходится применять технические средства для устранения этого явления, что приводит к дополнительным трудозатратам при обсадке скважин.

Бурение, вскрытие продуктивного горизонта, как и всей скважины, производится с использованием в качестве промывочной жидкости глинистого раствора, создающего глинистую корку на стенках скважины. В интервале установки фильтра также происходит глинизация прифильтровой зоны. Для разглинизации прифильтровой зоны производится предварительная промывка ствола скважины чистой водой и строительная прокачка после обсадки. Указанные мероприятия не позволяют полностью очистить прифильтровую зону от глин, что впоследствии отрицательно сказывается на производительности скважины. Особо сложно очистить скважину от глин в условиях низкого напора подземных вод на кровлю продуктивного горизонта.

При сооружении технологических карт-отстойников особое внимание уделяется гидроизоляции их дна. Гидроизоляцию конструкции дна осуществляют с использованием бентонитовых глин, которые, как указывалось выше, также сорбируют уран, приводя к его потерям.

## Выводы

1. Глинистые минералы оказывают огромное как положительное, так и негативное влияние на процесс ПВ урана.

2. Глинистые минералы очень эффективны в качестве водоупоров, предотвращая растекание продуктивных и рабочих растворов. Проведенными исследованиями установлены коэффициенты диффузии нитрат-ионов в монтмориллонитовых и каолинитовых глинах, которые составили  $3,34 \cdot 10^{-6}$  и  $2,14 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с.

3. С учетом полученных расчетами значений коэффициентов диффузии защитное время глинистого водоупора для нитрат-ионов составило 43 года.

4. Глинистые минералы, присутствующие в песчаном рудном горизонте, негативно влияют на коэффициент фильтрации растворов. Экспериментально установлены зависимости снижения коэффициента фильтрации растворов от содержания монтмориллонитовых и каолинитовых глин в песчаном рудном горизонте. При 20%-ном содержании глинистых минералов коэффициент фильтрации растворов снижается до значений, когда условия ПВ становятся неблагоприятными.

5. Проявляя катионообменные сорбционные свойства, глинистые минералы также отрицательно влияют на извлечение урана. Экспериментально установлено, что сорбция урана глинистыми минералами зависит как от природы глин, так и от состава раствора. Из сернокислых растворов сорбция урана протекает заметно лучше, чем из бикарбонатных растворов. При этом наибольшие значения статической обменной емкости по урану получены для бентонита (104 мг/г).



### Список литературы

1. Аренс В. Ж. *Физико-химическая геотехнология*. М.: МГГУ; 2001. 656 с.
2. Руденко А. А., Трошкина И. Д., Данилейко В. В. и др. Перспективы селективно-опережающего извлечения рения из продуктивных растворов подземного выщелачивания урановых руд месторождения Добровольное. *Горные науки и технологии*. 2021;6(3):158–169. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-158-169>
3. Голик В. И., Комащенко В. И., Разоренов Ю. И., Валиев Н. Г. Опыт подземного выщелачивания металлов из балансовых запасов руд. *Известия УГТУ*. 2017;(2):57–62. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-57-62>
4. Подрезов Д. Р. Задачи совершенствования управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):131–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>
5. Белецкий В. И., Долгих П. Ф., Петров Р. П. и др. *Справочник по геотехнологии урана*. Под ред. Сковорова Д. И. М.: Энергоатомиздат; 1997. С. 127–132.
6. Петухов О. Ф., Истомин В. П., Руднев С. В., Хасанов А. С. *Уран*. Ташкент: Turon Zamin-ziyo; 2015. С. 437–453.
7. Петухов О. Ф., Курбанов М. А., Ахадов Х. Р., Халимов И. У. Классификация урановых месторождений, обрабатываемых методом подземного выщелачивания. *Горный вестник Узбекистана*. 2021;(2):16–21. URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2021-aprel-iyun.pdf>
8. 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):37–38. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-3-0-37-48>
9. Затенацкая Н. П., Сафохина И. А. *Диффузионное выщелачивание глин*. М.: Наука; 1968. С. 54–58.
10. Грим Р. *Минералогия и практическое использование глин*. М.: Мир; 1967. С. 47–53. (Ориг.: Grim R. E. *Applied clay mineralogy*. NY, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1962)
11. Латышев В. Е., Груцинов В. А., Петухов О. Ф. Сорбция тяжелых металлов природными неорганическими минералами. *Горный вестник Узбекистана*. 2002;(4):24–29. URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2002-oktyabr-dekabr.pdf>
12. Дривер Дж. *Геохимия природных вод*. М.: Мир; 1985. С. 97–100. (Ориг.: Drever J. I. *The geochemistry of natural waters*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, Inc.; 1982)
13. Аксельруд Г. А., Лысянский В. М. *Экстрагирование: система твердое тело-жидкость*. Л.: Химия; 1974. С. 167–176.
14. Товбина З. М., Стражко Д. Н. Изучение диффузии растворенных веществ в силикагелях. *Украинский химический журнал*. 1968;34(9):876–880.
15. Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. *Проницаемость и фильтрация в глинах*. М.: Недра; 1986. С. 143.
16. Толстов Е. А., Толстов Д. Е. *Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе*. М.: Геоинформцентр; 2002. С. 9–28.
17. Амфлет Ч. *Неорганические иониты*. М.: Мир; 1966. С. 34–39. (Ориг.: Amphlett C. B. *Inorganic ion exchangers*. Amsterdam–London–NY: Elsevier Publ. House; 1964)

### References

1. Ahrens V. Zh. *Physical and chemical geotechnology*. Moscow: MGGU Publ.; 2001. 656 p. (In Russ.)
2. Rudenko A. A., Troshkina I. D., Danileyko V. V. et al. Prospects for selective-and-advanced recovery of rhenium from pregnant solutions of in-situ leaching of uranium ores at Dobrovolnoye deposit. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):158–169. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-158-169>
3. Golik V. I., Komashchenko V. I., Razorenov Yu. I., Valiev N. G. Experience of underground leaching of metals from balance reserves of ores. *News of the Ural State Mining University*. 2017;(2):57–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-57-62>
4. Podrezov D. R. Issues of improving control and increasing efficiency of production blocks at an ISL uranium mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):131–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>
5. Beletsky V. I., Dolgikh P. F., Petrov R. P., et al. *Handbook of uranium geotechnology*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1997. Pp. 127–132. (In Russ.)
6. Petukhov O. F., Istomin V. P., Rudnev S. V., Khasanov A. S. *Uranium*. Tashkent: Turon Zamin-ziyo; 2015. Pp. 437–453. (In Russ.)
7. Petukhov O. F., Kurbanov M. A., Ahadov H. R., Khalimov I. U. The classification of uranium deposits, suitable for practicing the method of in-situ leaching. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*. 2021;(2):16–21. (In Russ.) URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2021-aprel-iyun.pdf>



8. Alikulov Sh.Sh., Khalimov I.U. Intensification of in situ uranium leaching from impermeable ore: A case-study of uranium deposits in Uzbekistan. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(3):37–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-3-0-37-48>
9. Zatenatskaya N.P., Safokhina I.A. *Diffusion leaching of clays*. Moscow: Nauka Publ.; 1968. Pp. 54–58. (In Russ.)
10. Grim R. *Mineralogy and practical use of clays*. Moscow: Mir Publ. House; 1967. Pp. 47–53. (In Russ.) (Orig. ver.: Grim R.E. *Applied clay mineralogy*. NY, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1962)
11. Latyshev V.E., Grutsinov V.A., Petukhov O.F. Sorption of heavy metals by natural inorganic minerals. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*. 2002;(4):24–29. (In Russ.) URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2002-oktyabr-dekabr.pdf>
12. Drever J. *The geochemistry of natural waters*. Moscow: Mir Publ. House; 1985. Pp. 97–100. (In Russ.) (Orig. ver.: Drever J.I. *The geochemistry of natural waters*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, Inc.; 1982)
13. Akselrud G.A., Lysyansky V.M. *Extraction: solid-liquid system*. Leningrad: Khimiya Publ.; 1974. Pp. 167–176. (In Russ.)
14. Tovbina Z.M., Strazhko D.N. Diffusion of dissolved substances in silica gels. *Ukrainian Chemical Journal*. 1968;34(9):876–880. (In Russ.)
15. Goldberg V.M., Skvortsov N.P. Permeability and filtration in clays. Moscow: Nedra Publ.; 1986. P. 143. (In Russ.)
16. Tolstov E.A., Tolstov D.E. *Physical and chemical geotechnologies for the development of uranium and gold deposits in Kyzylkum region*. Moscow: Geoinformatsent Publ.; 2002. Pp. 9–28. (In Russ.)
17. Amphlett C.B. *Inorganic ion exchangers*. Amsterdam–London–NY: Elsevier Publ. House; 1964.

### Информация об авторах

**Олег Федорович Петухов** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры редких и радиоактивных металлов Навоийского государственного горно-технологического университета, г. Навои, Узбекистан

**Илхом Убайдуллоевич Халимов** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой редких и радиоактивных металлов Навоийского государственного горно-технологического университета, г. Навои, Узбекистан; ORCID [0000-0002-4552-556X](https://orcid.org/0000-0002-4552-556X), Scopus ID [57222556259](https://scopus.com/authorid/57222556259); e-mail [halimov\\_i@bk.ru](mailto:halimov_i@bk.ru)

**Владимир Петрович Истомин** – ведущий геолог Навоийского горно-металлургического комбината, г. Навои, Узбекистан

**Нурхан Маратович Каримов** – ассистент кафедры редких и радиоактивных металлов, Навоийский государственный горно-технологический университет, г. Навои, Узбекистан; ORCID [0000-0001-7552-072X](https://orcid.org/0000-0001-7552-072X)

### Information about the authors

**Oleg F. Petukhov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, the Department of Rare and Radioactive Metals, Navoi State Mining and Technology University, Navoi, Uzbekistan

**Ilkhom U. Khalimov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Rare and Radioactive Metals, Navoi State Mining and Technology University, Navoi, Uzbekistan; ORCID [0000-0002-4552-556X](https://orcid.org/0000-0002-4552-556X), Scopus ID [57222556259](https://scopus.com/authorid/57222556259); e-mail [halimov\\_i@bk.ru](mailto:halimov_i@bk.ru)

**Vladimir P. Istomin** – Leading Geologist, Navoi Mining and Metallurgical Company, Navoi, Uzbekistan

**Nurkhan M. Karimov** – Assistant of the Department of Rare and Radioactive Metals, Navoi State Mining and Technology University, Navoi, Uzbekistan; ORCID [0000-0001-7552-072X](https://orcid.org/0000-0001-7552-072X)

Поступила в редакцию	04.10.2022	Received	04.10.2022
Поступила после рецензирования	08.11.2022	Revised	08.11.2022
Принята к публикации	31.10.2022	Accepted	31.10.2022