



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-254-261

УДК 622.2

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ МКУЖУ РИВЕР В ТАНЗАНИИ

Е.В. Киселевский, Дж.К. Кумбикила, В.М. Усова

Российский университет дружбы народов (РУДН)

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Целью исследования явилось рассмотрение различных аспектов физико-химической технологии кучного выщелачивания на месторождении Мкужу Ривер в Танзании. Важно было определить основные геотехнологические условия уранового месторождения Мкужу Ривер, провести лабораторную работу по исследованию различных технологических параметров и характеристик породы, а также анализ геотехнологического районирования. Поставленные задачи исследования решены с использованием общепринятых методических подходов решения задач на рудах с нарушенной и ненарушенной структурой материалов, которые отбирались из скважин, пробуренных на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях в урановом проекте Мкужу Ривер в Танзании. На основе проведенных исследований были определены основные геотехнологические и геолого-гидрогеологические условия, природные факторы и их влияние. Также лабораторные исследования помогли определить технологические параметры и их оптимальные значения. Установлено, что на подземное выщелачивание оказывает влияние большое число факторов, а изучение геотехнологических условий месторождений является основой для количественной и качественной оценки взаимосвязей природных и промышленных компонентов природно-промышленной системы. При этом после выделения факторов требуется адаптация способа подземного выщелачивания (ПВ) к конкретным геологическим и гидрогеологическим условиям.

Ключевые слова: уран, серная кислота, карбонатные растворы, сульфат кальция, карбонатный метод, растворитель, минеральный состав руд, распространенные окиси урана

Введение

Особенности формирования месторождения Мкужу Ривер (низкое содержание металлов, пространственное распределение минерализации, фильтрационная и геохимическая неоднородность) и специфика метода подземного выщелачивания (ПВ) (фильтрационный режим, селективность действия выщелачивающих растворов и др.) предъявляют повышенные требования к исходной и оперативной геолого-гидрогеологической и геотехнологической информации на всех стадиях освоения месторождения. Широкий диапазон изменения характеристик природных факторов предопределяет необходимость их типизации для комплексной оценки пригодности месторождений к разработке способом ПВ.

Под геотехнологическими условиями уранового месторождения Мкужу Ривер понимается комплекс природных факторов, существенным образом влияющих

на возможность применения, кинетику и результаты ПВ урана. Изучение таких условий имеет некоторые особенности, а выбор технологий ПВ базируется на выделении благоприятных и неблагоприятных факторов с районированием месторождений по характерным признакам. Указанные особенности связаны с исследованиями литологических типов пород, гео- и гидрогеохимической обстановки рудовмещающих (продуктивных) горизонтов; природных факторов, влияющих на процесс ПВ (проницаемость, карбонатность, сульфидность рудовмещающих горизонтов и т.п.); природно-технологических зон, отличающихся по условиям применения ПВ.

Методы исследования

Поставленные задачи исследования решены с использованием общепринятых методических подходов решения задач на рудах с нарушенной и ненарушенной структурой материалов, которые отбирались из скважин, пробуренных на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях в урановом проекте Мкужу Ривер в Танзании.

Геотехнологические исследования по оценке возможности выщелачивания полезных компонентов из руд месторождения Мкужу Ривер выполнялись в лабораторных и производственных условиях.

Лабораторные исследования велись по общепринятым методикам [1–4; 8]. Особенности формирования месторождения Мкужу Ривер и специфика метода ПВ предъявляют повышенные требования к исходной и оперативной геолого-гидрогеологической и геотехнологической информации на всех стадиях освоения месторождения.

По степени влияния на процесс подземного выщелачивания факторы подразделяются на решающие, главные и второстепенные, а по условиям применения ПВ — на весьма благоприятные, благоприятные и неблагоприятные (таблица). Таблица составлена на основании результатов, полученных в результате предварительного гидрогеологического исследования.

Таблица

Геолого-гидрогеологические условия месторождения Мкужу Ривер
[Table. Geological and hydrogeological conditions of the Mkuju River deposit]

Факторы, затрагивающие процесс ПВ [Factors affecting ISL]	Благоприятные параметры [Favorable parameters]	Полученные параметры [Obtained parameters]	Фактор [Factor]
Гидравлическая проводимость [Hydraulic conductivity (permeability factor)]	1—5 м/5 суток [m/5 days]	1,8—5,1 м/5 суток [m/5 days]	+
Проницаемость руд [Permeability of ores]	10—100 м ² /суток [m ² /day]	18,7—34,3 м ² /суток [m ² /day]	+
Глубина залегания рудных тел [Depth of mineralization]	<200 м [m]	26—56 м [m]	++
Содержание карбоната (CO ₂) [Carbonate content (CO ₂)]	1—2%	0,7%	++
Минеральный состав руд [Mineral composition of ore]	Распространенные окиси урана [Disseminated uranium oxides]	Вторичная минерализация урана [Secondary uranium mineralization]	+

Окончание таблицы

Факторы, затрагивающие процесс ПВ [Factors affecting ISL]	Благоприятные параметры [Favorable parameters]	Полученные параметры [Obtained parameters]	Фактор [Factor]
Продуктивность пласта [Ore productivity]	1—5 кг/м ² [kg/m ²]	1,2—18 кг/м ² [kg/m ²]	+
Положение рудного тела в водоносном горизонте в нижней части, в верхней части [Water confining beds in the aquifer top, bottom]	Выдержанный водоносный горизонт [Aged aquifer]	Наличие глинистого слоя 0,4 м до 3,5 м толщиной [The presence of clay layer 0.4 m to 3.5 m thick]	+ -
Глубина залегания уровня подземных [Depth of underground water]	10—100 м [m]	21,8—24 м [m]	+
Водообильность (удельный дебит) руд [Waterabundance (specificyield)]	0,1—0,5 л/с [l/s]	0,1 л/с [l/s]	+ -
Толщина продуктивного водоносного слоя [Thicknessofproductiveaquifer]	10—30 м [m]	Более 30 м и до 1,5 м толщина водоносного слоя [Over 30 m and local up to 1.5 m thick confining beds]	- +
Положение рудного тела в водоносном горизонте [Mineralizationlocationinaquifer]	В средней и нижней части [In the middle and lower parts]	В средней и верхней части [In the middle and upper parts]	+ -
Температура подземных вод [Aquifertemperature]	10—30°	26°	+

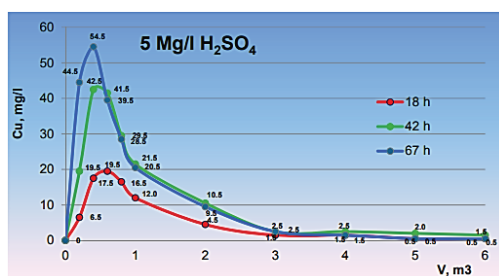
К основным факторам, определяющим возможность разработки месторождений способом подземного выщелачивания, относятся продуктивность руд и проницаемость пород продуктивных горизонтов. Месторождения инфильтрационного типа рекомендуются к отработке этим способом только в том случае, если продуктивный горизонт представлен водопроницаемыми породами и обводнен, а полезные компоненты в руде представлены минеральными формами, легко вскрываемыми слабыми водными растворами кислот или солей щелочных металлов.

В реальных условиях отдельные участки месторождений характеризуются различным соотношением параметров природных факторов, что может потребовать применения при разработке различных технологических схем и режимов ПВ, конструкций скважин и предопределяет необходимость проведения районирования месторождений по технологическим признакам. Целью такого районирования является выделение на месторождении участков (залежей или блоков), характеризующихся близкими условиями эксплуатации. Оно носит комплексный характер и определяется рядом ведущих природных факторов, влияющих на процесс ПВ. При этом один или несколько показателей выступают в качестве таксономических, а остальные — в качестве дополнительных показателей для характеристики выделенного участка месторождения. В результате по каждому такому участку оцениваются геотехнологические условия добычи полезных компонентов и прогнозируются значения основных геотехнологических параметров (концентрация реагента и металлов в продуктивных растворах, время отработки блока,

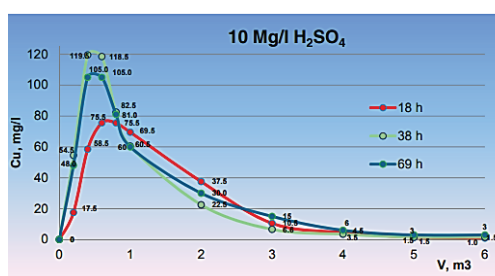
расход реагентов, степень извлечения металлов из недр, состав остаточных растворов ПВ) [7].

На рисунке с учетом открытой пористости представлено следующее:

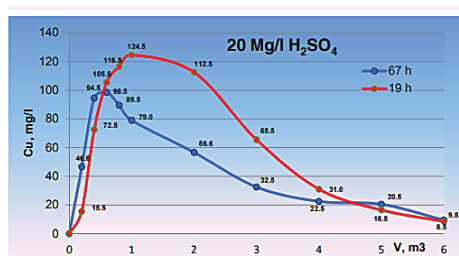
- скорость фильтрации, которая изменяется в пределах от 0,37 м/сут до 1,69 м/сут.;
- концентрация серной кислоты в выщелачивающем растворе;
- выщелачивание концентратов;
- извлечение урана в растворе за короткий промежуток времени;
- урановый концентрат достигает 125 мг/л.



а



б



в

Рисунок. Результаты выщелачивания крана серной кислотой при разной концентрации серной кислоты: а — 5 мг/л; б — 10 мг/л; в — 20 мг/л
[Figure.] Results of uranium leaching by sulfuric acid at different concentrations of sulfuric acid: а — 5 mg/l; б — 10 mg/l; в — 20 mg/l]

Следует отметить, что при расходе растворов 10 мг/л получаются более точные результаты.

Обсуждение

Таким образом, геотехнологическое районирование позволяет оценить особенности разработки отдельных рудных залежей или их частей, что повышает достоверность исходных данных для технико-экономической оценки месторождений, способствует разработке мероприятий по охране окружающей среды и выработке рекомендаций по дифференцированному расположению скважинных систем, применяемым реагентам, режимам процессов выщелачивания и др.

При геотехнологическом районировании месторождений в качестве объединяющего параметра, характеризующего эффективность процесса подземного

выщелачивания, является коэффициент извлечения урана, который можно рассчитать, используя следующую формулу [5]:

$$C_{\text{пр}} = \frac{10k_{\text{и}}C_{\text{р}}K_{\text{м}}M}{fK_{\text{м}}M}, \quad (1)$$

где $C_{\text{пр}}$ — содержание урана в продуктивных растворах (продуктивность раствора — коэффициент извлечения урана из пласта; $C_{\text{р}}$ — содержание урана в руде; f — отношение, характеризующее потребность в растворах для выщелачивания урана с коэффициентом извлечения $k_{\text{и}}$; $K_{\text{м}}$ и $K_{\text{м}}$ — коэффициенты фильтрации соответственно пласта руды и продуктивного горизонта в целом; M и m — мощность продуктивного горизонта и пласта руды.

В формуле (1) все параметры возможно определить лабораторно. Однако при лабораторных исследованиях коэффициенты фильтрации определяются приблизительно. Также затруднена дифференцированная оценка коэффициента извлечения, поскольку для разных способов ПВ (кислотного, кислотно-бикарбонатного, карбонатного и т.п.) эти технологические параметры будут иметь различные значения. Поэтому для технологического районирования месторождений предложено использовать условную продуктивность растворов:

$$C_{\text{у}} = C_{\text{р}}. \quad (2)$$

В выражение (2) входят только геологические параметры, не зависящие от применяемых реагентов. Районирование месторождений с использованием условной продуктивности растворов целесообразно применять в тех случаях, когда невозможно с достаточной достоверностью воспроизвести природные условия подземного выщелачивания, а также в тех случаях, когда неизвестны технические схемы отработки залежей. В этих случаях получаемые результаты считаются по абсолютным значениям от контрольных расчетов, но имеют практически идентичную качественную картину распределения участков месторождения с различными геотехнологическими характеристиками.

Результаты изучения геотехнологических условий месторождений рекомендуется представлять в виде геотехнологических разрезов по разведочным пробам, являющихся основой для проведения районирования месторождения.

Таким образом, на подземное выщелачивание оказывает влияние большое число факторов, а изучение геотехнологических условий месторождений является основой для количественной и качественной оценки взаимосвязей природных и промышленных компонентов природно-промышленной системы. При этом после выделения факторов, определяющих принципиальную пригодность месторождения к применению подземного выщелачивания, устанавливают факторы, которые требуют адаптации способа ПВ к конкретным геологическим и гидрогеологическим условиям [1; 5].

Заключение

Проведено исследование оценки возможности выщелачивания полезных компонентов из руд месторождений; приведены результаты промышленного внедре-

ния адаптационной концепции физико-химических геотехнологий при рациональном освоении ресурсов Мкужу Ривер в Танзании. Описаны результаты исследования выщелачивания полезных компонентов из руд с использованием больших по массе пробных руд в колоннах большого размера, которые позволяют получить более достоверные результаты при выщелачивании извлекаемого урана серной кислоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Абдульманов И.Г., Фазлуллин М.И., Мосев А.Ф., Пименов М.К.* Комплексы подземного выщелачивания. М.: Недра, 1992.
- [2] *Абрамов А.В., Ивановский Э.С., Синельщикова Н.В.* Подготовка месторождений скальных руд для выщелачивания. М.: Цветметинформация, 1975.
- [3] Геологи ВСЕГЕИ в создании урановорудной базы страны. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006. 160 с.
- [4] *Кротков В.В., Лобанов Д.П., Нестеров Ю.В., Абдульманов И.Г.* Горно-химическая технология добычи урана / под ред. В.В. Кроткова. М.: ГЕОС, 2001. 368 с.
- [5] *Громов Б.В.* Введение в химическую технологию урана. М.: Атомиздат, 1978. 336 с.
- [6] *Иванов В.Г., Култышев В.И., Колесаев В.Б. и др.* Оптимизация разработки сложноструктурных урановых месторождений. М.: Горная книга, 2007. 265 с.
- [7] *Иванов В.Г.* Перспективы подземного выщелачивания при разработке скальных месторождений. М.: ЦНИИАтоминформ, 1989.
- [8] *Толстов Е.А., Толстов Д.Е.* Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе. М.: Геоинформцентр, 2002. 284 с.

© Киселевский Е.В., Кумбикила Дж.К., Усова В.М., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 09 марта 2018

Дата принятия к печати: 30 апреля 2018

Для цитирования:

Киселевский Е.В., Кумбикила Дж.К., Усова В.М. Физико-химическая технология кучного выщелачивания на месторождении Мкужу Ривер в Танзании // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования.* 2018. Т. 19. № 2. С. 254–261. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-254-261

Сведения об авторах:

Киселевский Евгений Валентинович — кандидат технических наук, доцент, директор департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* применение методов подземного выщелачивания для решения экологических и экономических проблем для добычи уранового сырья в Танзании. *Контактная информация:* e-mail: kiselevskiy_ev@rudn.university

Кумбикила Джума Кассим — аспирант департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* применение методов подземного выщелачивания для решения экологических и экономических проблем для добычи уранового сырья в Танзании. *Контактная информация:* e-mail: kumbikila@yahoo.com

Усова Валентина Михайловна — старший преподаватель департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* применение методов подземного выщелачивания для решения экологических и экономических проблем для добычи уранового сырья в Танзании. *Контактная информация:* e-mail: usova_vm@pfur.ru

PHYSICO-CHEMICAL TECHNOLOGY OF HEAP LEACHING AT MKUJU RIVER DEPOSIT IN TANZANIA

E.V. Kiselevskiy, J.K. Kumbikila, V.M. Usova

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

Abstract. *Purpose.* The purpose of this work was to examine various aspects of the physico-chemical heap leaching technology at the Mkuju River in Tanzania. The objectives of the study were to determine the basic geotechnological conditions of the Mkuju River uranium deposit, conduct laboratory work on the study of various technological parameters and rock characteristics, as well as a thorough analysis of geotechnological zoning. *Methods.* The objectives of the research have been solved using the generally accepted methodological approaches to solving problems on ores with a disturbed and undisturbed material structure that have been selected from wells drilled at the Mkuju River Mine in Tanzania, which are being explored and exploited for uranium. *Results.* Based on the conducted studies, the main geotechnological and geological-hydrogeological conditions, natural factors and their influence were determined. Also, laboratory studies helped determine the technological parameters and their optimal values. *The conclusion.* Underground leaching is influenced by a large number of factors, and the study of geotechnological conditions of deposits is the basis for a quantitative and qualitative assessment of the interrelationships of natural and industrial components of the natural-industrial system. In this case, after determining the factors the adaptation of the in situ leaching method to specific geological and hydrogeological conditions is established.

Key words: uranium, sulfuric acid, carbonate solutions, calcium sulphate, carbonate method, solvent, mineral composition of ores, common uranium oxides

REFERENCES

- [1] Abdul'manov I.G., Fazlullin M.I., Mosev A.F., Pimenov M.K. Kompleksy podzemnogo vyshchelachivaniya [Underground leaching complexes]. Moscow: Nedra Publ., 1992. (In Russ.)
- [2] Abramov A.B., Ivanovskii E.S., Sinel'shchikova N.V. Podgotovka mestorozhdenii skal'nykh rud dlya vyshchelachivaniya [Preparation of ore deposits for leaching]. Moscow: Tsvetmetinformatsiya Publ., 1975. (In Russ.)
- [3] Geologi VSEGEI v sozdanii uranovorudnoi bazy strany [Geologists of VSEGEI in the creation of uranium ore base of the country]. Saint Petersburg: VSEGEI Publ., 2006. 160 p. (In Russ.)
- [4] Krotkov V.V., Lobanov D.P., Nesterov Y.V., Abdulmanov I.G. Gorno-khimicheskaya tekhnologiya dobychi urana [Mining-chemical technology of uranium extraction]. Under the editorship of Krotkov V.V. Moscow: GEOS Publ., 2001. 368 p. (In Russ.)
- [5] Gromov B.V. Vvedenie v khimicheskuyu tekhnologiyu urana [Introduction to the chemical technology of uranium]. Moscow: Atomizdat Publ., 1978. 336 p. (In Russ.)

- [6] Ivanov V.G., Kultyshev V.I., Kolesaev V.B., Litvinenko V.G., Sheludchenko V.G. Optimizatsiya razrabotki slozhnostrukturnykh uranovykh mestorozhdenii [Optimization of the development of complex-structure uranium deposits]. Moscow: Gornaya kniga Publ., 2007. 265 p. (In Russ.)
- [7] Ivanov V.G. Perspektivy podzemnogo vyshchelachivaniya pri razrabotke skal'nykh mestorozhdenii [Prospects of underground leaching in development of rock deposits]. Moscow: TsNIIAtominform Publ., 1989. (In Russ.)
- [8] Tolstov E.A., Tolstov D.E. Fiziko-khimicheskie geotekhnologii osvoeniya mestorozhdenii urana i zolota v Kyzylkumskom regione [Physical and chemical geotechnologies of development of uranium and gold deposits in Kyzylkum region]. Moscow: Geoinformtsentr Publ., 2002. 284 p. (In Russ.)

Article history:

Received: March 09, 2018

Accepted: April 30, 2018

For citation:

Kiselevskiy E.V., Kumbikila J.K., Usova V.M. (2018). Physico-chemical technology of heap leaching at Mkuju River deposit in Tanzania. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 254–261. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-254-261

Bio Note:

Evgeniy V. Kiselevskiy — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, director of the Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering of the Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* application of underground leaching methods to solve environmental and economic problems for the extraction of uranium resource in Tanzania. *Contact information:* e-mail: kiselevskiy_ev@rudn.university

Juma Kassim Kumbikila — postgraduate student, Department of Geology, Mining and Oil and Gas Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* application of underground leaching methods to solve environmental and economic problems for the extraction of uranium resource in Tanzania. *Contact information:* e-mail: kumbikila@yahoo.com

Valentina M. Usova — senior lecturer of the Department of Geology, Mining and Oil and Gas Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* application of underground leaching methods to solve environmental and economic problems for the extraction of uranium resource in Tanzania. *Contact information:* e-mail: usova_ym@pfur.ru