

УДК 550.85

МРНТИ 30.17.51

<https://doi.org/10.31643/2019/6445.19>**Шаяхметов Н.М.^{1,2*}, Құрмансейіт М.Б.¹, Айжулов Д.Е.¹**¹Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, *e-mail: shayakhmetov@gmail.com²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОСТИ РЕЖИМОВ ГЕКСОГОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ВСКРЫТИЯ ПРИ ДОБЫЧЕ МИНЕРАЛА МЕТОДОМ ПОДЗЕМНОГО СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Received: 30 April 2019 / Peer reviewed: 23 May 2019 / Accepted: 03 June 2019

Аннотация. Добыча минерала методом подземного скважинного выщелачивания основывается на закачивании выщелачивающего раствора в рудносный пласт через закачивающие скважины, выщелачивании раствором минерала и добыче продуктивного раствора (растворенного минерала) через добывающие скважины. При проектировании месторождения основной задачей является определение оптимальной схемы вскрытия что подразумевает под собой выбор оптимального расположения закачивающих и добывающих скважин. В данной работе рассматриваются различные режимы расстояния между добывающими и закачивающими скважинами при гексагональном расположении и определяется оптимальность на основе экономических показателей каждого режима. В результате исследования было определено оптимальное расстояние между скважинами при поставленной постановке задачи.

Ключевые слова: метод подземного выщелачивания, оптимизация добычи минерала, гексагональная схема вскрытия, проектирование месторождения, скважинное выщелачивание.

ШАЯХМЕТОВ Н.М.^{1,2*}, ҚҰРМАНСЕЙІТ М.Б.¹, АЙЖУЛОВ Д.Е.¹¹К.И. Сатпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан, *e-mail: shayakhmetov@gmail.com²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

МИНЕРАЛДЫ ЖЕРАСТЫ ҰНҒЫМАЛЫ ШАЙМАЛАУ ӘДІСІМЕН ӨНДІРУ КЕЗІНДЕ ГЕКСАГОНАЛЬДІ АШУ СХЕМАСЫНЫҢ РЕЖИМДЕРІН ҚОЛАЙЛЫЛЫҚҚА ЗЕРТТЕУ

Түйіндемe. Жерасты шаймалау әдісімен минералды өндіру – шаймалау ертіндісін кен орнына айдау ұнғымалары арқылы айдауда, минералды ертінді арқылы шаймалауда және реакция нәтижесінде пайда болған өнімді ертіндіні (минерал ертіндісі) өнімді ұнғымалар арқылы өндіруде негізделен. Кен орнын жобалау кезінде негізгі мақсат ол қолайлы ашу схемасын табу. Негізінде жобалау деген айдау және өнімді ұнғымаларды оңтайлы орналастыру. Бұл жұмыста гексагональді схеманың айдау ұнғымалары мен өнімді ұнғымалардың арасындағы ара қашықтықтың бірнеше режимдері қарастырылады және олардың қолайлығы экономикалық көрсеткіштер арқылы зерттеледі. Қойылған есептің нәтижесінде айдау және өнімді ұнғымалардың арасындағы қолайлы ара қашықтығы табылды.

Түйін сөздер: жерасты шаймалау әдісі, минералды өндіруді оңтайландыру, гексагональді ашу схемасы, кен орнын жобалау, ұнғымалы шаймалау.

SHAYAKHMETOV N.M.^{1,2*}, KURMANSEIT M.B.¹, AIZHULOV D.Y.¹¹Satbayev Univeristy, Almaty, Kazakhstan, *e-mail: shayakhmetov@gmail.com²al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan

STUDY OF THE OPTIMALITY OF HEXAGONAL WELL LOCATION MODES DURING THE IN-SITU LEACHING OF MINERAL

Abstract. Mineral mining using the in-situ leaching method is based on injecting of leaching solution into the ore formation through injection wells, leaching out the mineral and extracting the pregnant solution (dissolved mineral) through the production wells. During the stage of the field designing, the main task is to determine the optimal drilling-in pattern, which implies the choice of the optimal location of the injection and production wells. This article is considered the different modes of distance between production and injection wells with a hexagonal location and determines the optimality based on the economic indicators of each mode. As a result of the study, for the problem statement the optimal distance between the wells was determined.

Keywords: in-situ leaching, optimization of mineral mining, hexagonal well location, field design, in-situ leaching by wells.

Введение. Метод выщелачивания в данный момент широко применяется в сфере добычи минералов. В текущей статье ставится задача где в качестве минерала рассматривается уран, однако данный метод добычи так же может быть использован для различных других минералов. Выщелачивания минерала может проводиться с использованием нескольких методов это: выщелачивание в колоннах [1], бактериальное выщелачивание [2], кучное выщелачивание [3] и подземное скважинное выщелачивание. На данный момент в Казахстане на всех урановых месторождениях используется метод подземного скважинного выщелачивания. В основном урановые месторождения образуются в результате осаждения урана, которая переносится подземными течениями [4]. Такие месторождения так же кроме урана могут содержать различные редкоземельные и другие минералы [5]. Добыча таких месторождений осуществляется бурением закачивающих скважин, по которым в пласт закачивается выщелачивающий раствор, который растворяет уран и другие сопутствующие элементы. В результате, за счет реакций образуется раствор с определенной концентрацией урана, который в производстве называется продуктивный раствор. Образованный продуктивный раствор откачивается с помощью пробуренных добывающих (или откачных) скважин.

Отработка месторождения состоит из нескольких этапов:

1. Поиск, геологическая и геофизическая разведка месторождения. На данном этапе проводится поиск рудной залежи на основе исследований геологической истории рассматриваемой области, определения возможности залегания и методов геофизического исследования. Пробурируются разведочные скважины для более точного определения формы и места залегания рудной залежи. Далее на основе методов геостатистики строится геологическая модель месторождения, позволяющая определить массу и объем рудной залежи для подсчета запасов [6].

2. Проектирование и прогнозирование. Проектирование месторождения основывается на выборе наиболее оптимальной схемы вскрытия месторождения. На данный момент на основе экспериментальных и численных исследований самыми оптимальными признаны, ячеистые и рядная схемы расположения скважин [7]. С помощью прогнозирования отработки месторождения определяются расходы и объем

работы на основе которых определяется экономическая рентабельность добычи.

3. Бурение технологических скважин. На основе проекта месторождения проводится бурение технологических скважин и уточнение геологической модели с использованием геофизических исследований пробуренных технологических скважин. Так же возможны изменения в схеме вскрытия месторождения.

4. Ввод месторождения в эксплуатацию проводится на основе проектных и прогнозных данных. В результате добычи определяется концентрация продуктивного раствора и сравнивается с прогнозными результатами, при недостаточной концентрации урана в продуктивных растворах производятся различные манипуляции с концентрацией раствора, дебитами и с самими скважинами. К примеру, увеличивается концентрация выщелачивающего агента в выщелачивающем растворе. Так же недостаточная добыча может быть обусловлена изменением фильтрационных характеристик пласта из-за кольтатации или образования каналов в пласте [8].

5. Вывод месторождения из эксплуатации. Вывод из эксплуатации проводится для минимизации пагубного действия эксплуатации на окружающую среду и рекультивации области эксплуатации.

Следует отметить, что при разработке урановых месторождений методом подземного скважного выщелачивания практически всегда себестоимость урановой продукции формируется из горно-подготовительных работ и добычи (50 -55%), бурение скважин (15-20%), расход кислоты (10-20%), ремонтно-восстановительные работы (10-15%) [9].

Расход серной кислоты на месторождениях Казахстана зависит от минералогических свойств месторождения и эффективности схем вскрытия и составляет 50 - 150 тонн на тонну урана [10]. Сокращение расхода реагента на 5 - 10% путем определения оптимального расположения скважин и эффективного регламента работы сети скважин с помощью разработанного комплекса, позволит экономить 50000 - 350 000 т. кислоты в год при нынешних объемах добычи.

Так как в данной работе рассматривается этап проектирования месторождения, расчет расходов на различные работы требуют детальной симуляции процесса выщелачивания при различных свойствах схемы вскрытия. Однако в первую очередь следует рассмотреть возможности и ограничения математической модели, используемой для моделирования таких процессов.

Математическое моделирование процесса добычи урана методом подземного скважинного выщелачивания. Математическая модель процесса добычи урана методом подземного скважинного выщелачивания состоит из трех структурных элементов, которые так же являются этапами симуляции данного процесса:

1. Гидродинамическое моделирование
2. Химическое моделирование
3. Экономическая оценка

Гидродинамическое и химическое моделирование проводилось на основе модели описанной в [8].

Экономическая оценка. Оценка оптимальности сетки скважин (схемы вскрытия) проводилась на основе экономических показателей для каждого из режимов. Расходы на работу месторождения разделяются на несколько категорий [6]:

1. Расходы на сооружение технологических скважин $E_{WD}(N_i, N_p)$ – определяются в результате, подбора схемы вскрытия, и оплачиваются единой суммой: расходы на бурение, на сооружение труб, технологических узлов и т.д.

2. Расходы на сырье $E_A(m_M)$ – объем кислоты определяется от соотношения жидкое к твердому (Ж:Т) и зависит только от горнорудной массы (ГРМ) в рассматриваемой области. Следовательно, расходы на кислоту не зависят от схемы вскрытия, и могут определять ограничения на количество скважин, так как дебит скважин имеет ограничения по соображениям безопасности. Рекомендуемым соотношением является Ж:Т = 1,6:1,8.

3. Эксплуатационные расходы $E_E(t)$ – расходы которые определяются по количеству скважин и так же зависят от времени эксплуатации месторождений: заработные платы, расходы на техническую поддержку оборудования.

Расходы на сооружение определяется количеством скважин что в свою очередь, при фиксированной площади месторождения, изменяется в зависимости от сетки скважин:

$$E_{WD}(N_i, N_p) = N_i \cdot P_i + N_p \cdot P_p + N_b \cdot P_b \quad (1)$$

где, N_i, N_p - количества закачивающих и добывающих скважин соответственно, P_i, P_p - стоимость бурения одной технологической

(закачивающих или добывающей) скважины, P_b - стоимость обвязки блока, N_b - количество блоков в месторождении, зависит от геологических особенностей месторождения.

Расходы на оперативные затраты определяются следующим образом:

$$E_A(m_M) = V_M(x, y) \cdot \rho_M(x, y) \cdot SF \cdot P_A \quad (2)$$

где, V_M - объем горно-рудной массы, ρ_M - плотность горнорудной массы, SF – соотношение Ж:Т, P_A - стоимость 1 тонны кислоты на объекте. Объем и плотность горнорудной массы могут изменяться по пространству и определяются на основе геологического моделирования (геостатистики).

Одним из главных параметров является время отработки месторождения, которая определяется на основе гидродинамического и химического моделирования описанных в [8, 12]. Время отработки определяется такое при котором достигается установленная степень отработки. Эксплуатационные расходы определяются на основе времени отработки месторождения и количества производимой продукции:

$$E_E(M_p, t) = (M_p \cdot P_E) \cdot t \quad (3)$$

где, M_p - масса произведенной продукции, P_E - стоимость эксплуатации (в которые входят все расходы описанные в таблице ниже) для добычи 1 кг продукции в течении времени эксплуатации, t - время эксплуатации месторождения.

Таблица 1 - Статьи расходов в предприятиях АО НАК «Казатомпром»

Статья расходов	В млн. КЗТ за 6 мес.	В \$ за 1 мес, 1 тонн.
Сырье и материалы	63 713	2461
Износ и амортизация	11 755	454
Оплата труда персонала	11 072	428
Налоги (кроме подоходного)	9 362	362
Переработка и прочие услуги	5 698	220
Расходы по транспортировке	1 762	68
Техническое обслуживание и ремонт	1 198	46
Коммунальные услуги	922	36
Прочее	1 057	41

Статьи эксплуатационных расходов и их итоговая стоимость была рассчитана по финансовым отчетам, опубликованным на сайте АО «НАК Казатомпром» [11].

Итоговые производственные расходы E_T рассчитываются суммированием всех описанных выше расходов:

$$E_T = E_{WD} + E_A + E_E + E_O \quad (4)$$

где, E_O - прочие расходы, рекомендовано как 7% от итоговой стоимости.

Исследование изменения расходов в зависимости от расстояния между закачивающими и добывающими скважинами. Сетка скважин определяется несколькими геометрическими свойствами, которые могут влиять на затраты на добычу минерала и являются функциями управления. Так как главным геометрическим свойством гексагональной сетки скважин является расстояние между закачивающими и добывающими скважинами (r) в первую очередь было исследовано влияние расстояния между закачивающими и добывающими скважинами на затраты на сооружение и эксплуатацию скважин.

Определение влияния r на экономические показатели проводилось на основе задачи выщелачивания минерала в фиксированной области Ω_1 , с разными режимами расположения скважин, в зависимости от расстояния r (рисунок 1).

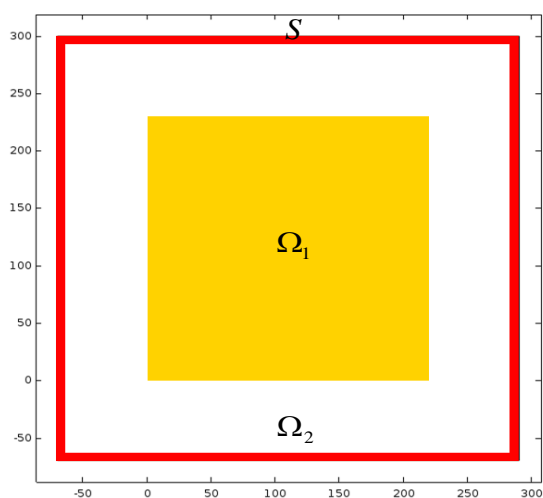


Рисунок 1 - Расчетная область с граничными и начальными условиями

При этом расчетная область (Ω_2) и границы расчетной области (S) определяются аналогично:

$$p(\bar{x} \in S, t) = 0$$

$$\frac{\partial C_{LS}(\bar{x} \in S, t)}{\partial n} = \frac{\partial C_{PS}(\bar{x} \in S, t)}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

В начальный момент в области Ω_1 имеется только минерал в твердом виде, следовательно:

$$p(\bar{x} \in \Omega_1 \cup \Omega_2, t = 0) = 0$$

$$C_{LS}(\bar{x} \in \Omega_1 \cup \Omega_2, t = 0) = 0$$

$$C_{PS}(\bar{x} \in \Omega_1 \cup \Omega_2, t = 0) = 0 \quad (6)$$

$$C_{SM}(\bar{x} \in \Omega_1, t = 0) = 1.8 \text{ моль / л}$$

$$C_{SM}(\bar{x} \in \Omega_2, t = 0) = 0$$

Рассматривались следующие режимы расстояния между скважинами (рисунок 2 и таблица 2)

Таблица 2 - Режимы расположения сетки скважин

Режимы	1	2	3	4	5
Расстояние между закачивающим и добывающими скважинами [м]	20	30	40	50	60
Количество всех скважин [ед.]	143	54	43	36	25
Количество добывающих скважин [ед.]	39	18	10	8	5
Количество закачивающих скважин [ед.]	104	72	33	28	20
Соотношение между количествами закачивающих и добывающих скважин	0,38	0,33	0,30	0,29	0,25

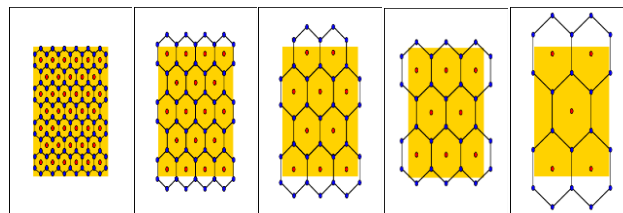


Рисунок 2 - Режимы расположения сетки скважин

Результаты расчета различных режимов расположения сетки скважин. По результатам вычисления были построены графики степени отработки в зависимости от времени эксплуатации. Рисунок 3 отображает изменение

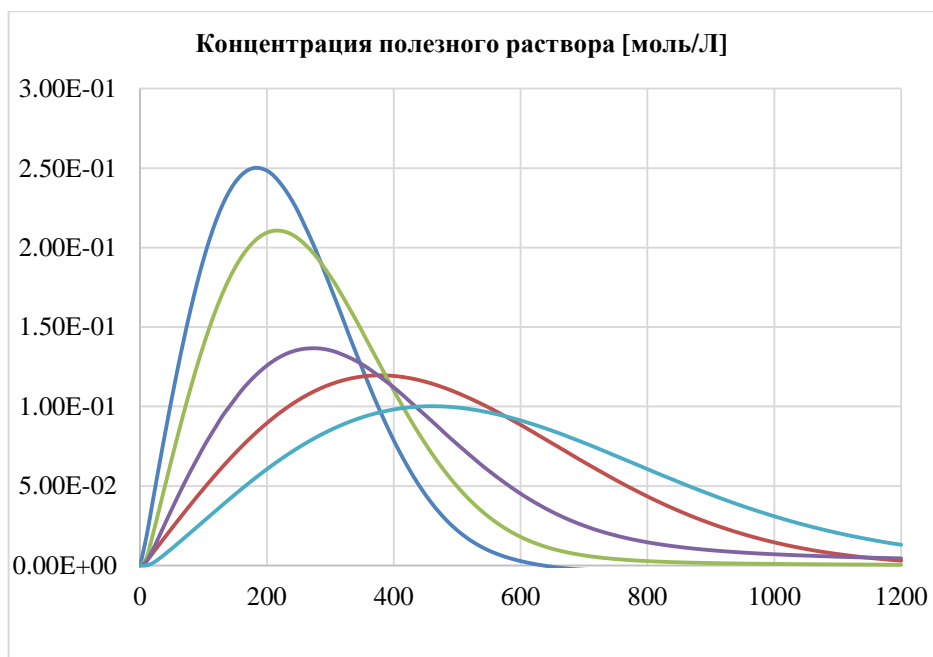


Рисунок 3 - Средняя концентрация полезного раствора на добывающих скважинах

концентрации полезного раствора на добывающих скважинах в зависимости от расстояния между добывающими и закачивающими скважинами. Как видно, увеличение расстояния между скважинами приводит к увеличению времени отработки заданной области. Что в свою очередь негативно влияет на эксплуатационные расходы.

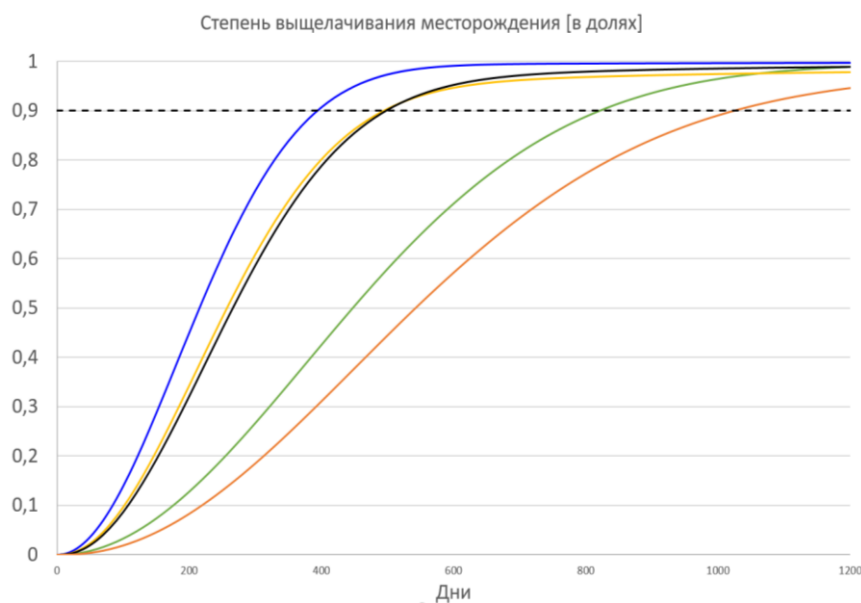


Рисунок 4 - Степень отработки месторождения при разных режимах сетки скважин

Так же были построены сравнительные графики изменения степени отработки по времени при этом расчет экономических показателей проводился при достижении

достаточной степени отработки (на рисунке 4 показано пунктиром), в данной задаче достаточной считается степень отработки 90% или 0,9 в долях.

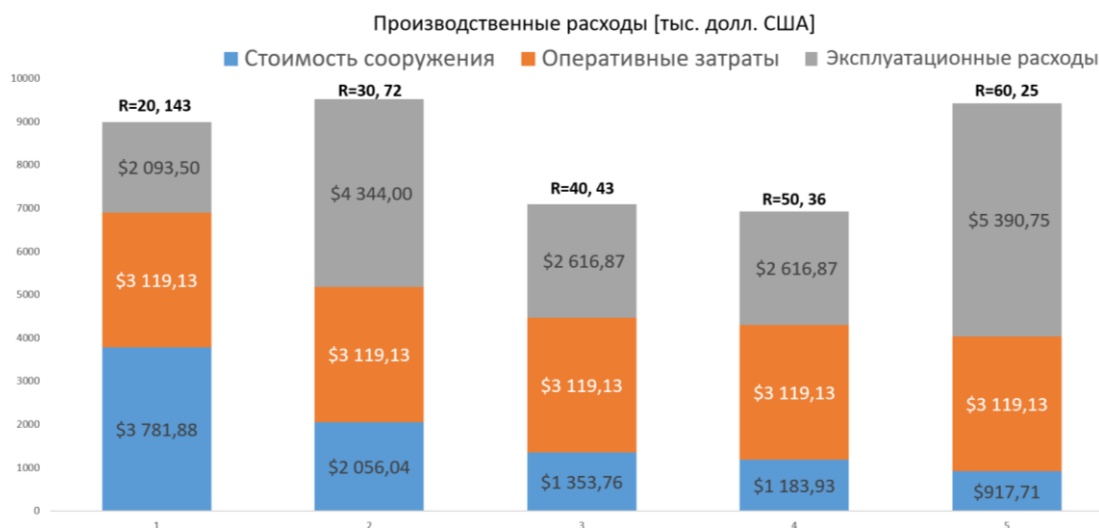


Рисунок 5 - Итоговые производственные расходы при различных схемах вскрытия

По рисунку 5 видно, что оптимальным является схема расположения скважин при котором достигается наименьший объем итоговых производственных расходов, при данной постановке задачи оптимальное значение находится между 40-50 метров между закачивающими и добывающими скважинами. Такое же расстояние является рекомендованным в рудниках АО «НАК Казатомпром».

Работа выполнена при поддержке комитета науки МОН РК в рамках программно-целевого финансирования BR05236447 «Интеллектуальные системы управления и принятия решений для разработки месторождений урана и нефти»

ЛИТЕРАТУРА

- Zhappar N. K., Ten O. A., Balpanov D. S., Erkasov R. Sh., Bakibaev A. A. Percolation bacterial leaching of low-grade copper ore // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo syr'â*. – 2018. – №3. – С.30–37. <https://doi.org/10.31643/2018/6445.14>
- Блайда И.А., Васильева Т.В., Слосаренко Л.И., Барба И.Н., Водзинский С.В. Технологические параметры процесса биовыщелачивания отвалов углеобогащения с целью извлечения редких металлов // *Комплексное использование минерального сырья*. – 2018. – №4. – С. 28-37. <https://doi.org/10.31643/2018/6445.27>
- Erdenova M. B., Kojzhanova A. K., Kamalov E. M., Abdyldayev N. N., Abubakriyev A. T. Additional recovery of gold from waste after processing of gold-containing ores of Kazakhstan. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo syr'â*. – 2018. - №2. – С. 12–20. <https://doi.org/10.31643/2018/6445.2>
- Aizhulov D., Shayakhmetov N., Kaltayev A. Quantitative model of the formation mechanism of the

rollfront uranium deposits // *Eurasian chemicotechnological journal*. – 2018. – № 3. – С. 213-221.

5 Dahlkamp F.J. Uranium deposits of the world: Asia – Берлин: Springer-Verlag, 2009. – 492 с.

6 Мамилов В.А. Добыча урана методом подземного выщелачивания. – М.: Атомиздат, 1980. – 248 с.

7 Хайдарова М. Э. Обоснование схемы вскрытия и эксплуатации урановых месторождений методом подземного выщелачивания // *Молодой ученый*. — 2016. — №14. — С. 192-195.

8 Алибаева Қ.А. «Численные исследования путей повышения выработки месторождения при добыче минералов методом подземного скважинного выщелачивания»: диссертация на соискание ученой степени доктора философии (Ph.D.). Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, 2013.

9 Носков М.Д. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания: учебное пособие. – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – 83 с.

10 Бровин, К.Г. Прогноз, поиски, разведка и промышленная оценка месторождений урана для отработки подземным выщелачиванием. – Алматы: Гылым, 1997. – 384 с.

11 Интегрированный годовой отчет АО «НАК Казатомпром». – Астана. – 2018.

12 Kenzhaliyev, B.K., Iskhakova, R.R., Dosymbayeva, Z.D. Sorption extraction of noble and non-ferrous metals from process leaching solutions. *American Journal of Applied Sciences* Volume 12, Issue 11, 18 November 2015, Pages 875-884. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2015.875.884>

REFERENCES

- Zhappar N. K., Ten O. A., Balpanov D. S., Erkasov R. Sh., Bakibaev A.A. Percolation bacterial leaching of low-grade copper ore. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo*

сырья. **2018**. 3. 30–37. <https://doi.org/10.31643/2018/6445.14> (in Eng.)

2. Blayda I. A., Vasilyeva T. V., Slyusarenko L. I., Barba I. N., Vodzinskiy S. V. *Tekhnologicheskie parametry processa biovishelachivaniya otvalov ugleobogoshenya s tseliu izvlecheniya redkih mineralov* (Technological parameters of the bioleaching process of coal preparation dumps for the purpose of extracting rare metals)// *Комплексное Испол'зование Минерал'ного сыр'а*. **2018**. 4. 28-37. <https://doi.org/10.31643/2018/6445.27> (in Russ.)

3 Erdenova M. B., Kojzhanova A. K., Kamalov E. M., Abdyldayev N. N., Abubakriyev A. T. Additional recovery of gold from waste after processing of gold-containing ores of Kazakhstan. *Комплексное Испол'зование Минерал'ного сыр'а*. **2018**. 2 12–20. <https://doi.org/10.31643/2018/6445.2> (in Eng.)

4 Aizhulov D., Shayakhmetov N., Kaltayev A. Quantitative model of the formation mechanism of the rollfront uranium deposits // *Eurasian chemico-technological journal*. **2018**. 3. 213-221. (in Eng.)

5 Dahlkamp F.J. *Uranium deposits of the world: Asia*. Berlin: Springer-Verlag, **2009**. – 492 p.(in Eng)

6 Mamilov V.A. *Dobichya urana metodom podzemnogo vyshelachivaniya* (Uranium production by in-situ leaching). – Moscow: Atomizdat, **1980**. – 248 p. (in Russ.)

7 Haydarova M. E. *Obosnovanie skhemy vskrytiya i ekspluatatsyy uranovykh mestorozhdeniy metodom podzemnogo vyshelachivaniya* (Justification of uranium

fields opening and exploitation schemes by in-situ leaching method) // *Molodoy uchennyiy = young scientist*. **2016**. 14. 192-195. (in Russ.)

8 Alibayeva K.A. *Chislennoe issledovaniya putei povisheniya vyrabotky mestorozhdeniya pri dobiche mineralov metodom podzemnogo vyshelachivaniya* (Numerical study of ways to increase mineral production of field by in-situ leaching): Ph.D. dissertation. Al-Farabi Kazakh National Univeristy. – Almaty. **2013**. (in Russ.)

9 Noskov M. D. *Dobycha urana metodom podzemnogo skvazhinnogo vyshelachivaniya* (Uranium production using in-situ leaching): tutorial. – Seversk: STI NRNU MEPhI, **2010**. – 83 p. (in Russ.)

10 Brovin K. G. *Prognoz, poiski, razvedka i promyshlennaiya otsenka mestorozhdeniy urana dlya otrabotky podzemniym vyshelachivaniyem* (Forecast, prospecting, exploration and industrial evaluation of uranium deposits for mining by in-situ leaching).– Almaty: Gylym = Science, **1997**. – 384 p. (in Russ.)

11 Integrated annual report of NAC Kazatomprom JSC. – Astana. **2018**. (in Russ.)

12 Kenzhaliyev, B.K., Iskhakova, R.R., Dosymbayeva, Z.D. Sorption extraction of noble and non-ferrous metals from process leaching solutions. *American Journal of Applied Sciences* Volume 12, Issue 11, 18 November **2015**, Pages 875-884. (in Eng.) <https://doi.org/10.3844/ajassp.2015.875.884>

Сведения об авторах: Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

Шаяхметов Нурлан Муратханович– PhD докторант, Научный сотрудник. <https://orcid.org/0000-0002-7559-4371>, E-mail: shayakhmetovn@gmail.com

Құрмансейіт Максат Бакытжанұлы – Научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5334-6537>, E-mail: kurmanseiit.maksat@gmail.com

Айжулов Даниар Ерсенович – Научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5496-4639>, E-mail: daniar.aizhulov@gmail.com

Ссылка на данную статью: Шаяхметов Н. М., Құрмансейіт М. Б., Айжулов Д.Е. Исследование оптимальности режимов гексагональной схемы вскрытия при добыче минерала методом подземного скважинного выщелачивания // *Комплексное использование минерального сырья*. – 2019. – №2. – С. 76-82. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.19>