

УДК 004.09+622.2

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/78

*К.Е. ПОПОВА<sup>1</sup>, А.В. ГЛАДЫШЕВ<sup>2</sup>, С.Н. НОСКОВА<sup>1</sup>, М.Д. НОСКОВ<sup>1</sup>*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН ПРИ ДОБЫЧЕ УРАНА МЕТОДОМ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ**

Рассмотрено применение дополнительных рядов технологических скважин в области с высокой продуктивностью для повышения эффективности добычи урана способом скважинного подземного выщелачивания. Для различных вариантов схем вскрытия приведены результаты расчетов геотехнологических показателей отработки эксплуатационных блоков. На основе сравнения полученных результатов сделана оценка эффективности применения дополнительных скважин.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, скважинное подземное выщелачивание, добыча урана, геотехнологические показатели, схема вскрытия.

### **Введение**

Скважинное подземное выщелачивание (СПВ) является перспективным методом добычи урана [1, 2]. СПВ основывается на воздействии на залежь полезных ископаемых через систему технологических скважин. Через нагнетательные скважины осуществляется нагнетание в залежь выщелачивающих растворов для перевода урана в раствор. Продуктивные растворы, содержащие растворенный уран, извлекаются через откачные скважины на поверхность, где подвергаются дальнейшей переработке. В России способ подземного выщелачивания применяется при разработке экзогенных месторождений урана палеодолинного типа. Эти месторождения характеризуются сложными горно-геологическими условиями, рудные тела имеют сложную морфологию с неоднородным распределением продуктивности. Применение стандартных схем расположения технологических скважин приводит к неравномерности темпов отработки: бедные участки эксплуатационных блоков отрабатываются раньше, чем участки с высокой продуктивностью. Это повышает эксплуатационные затраты на стадии доработки эксплуатационных блоков. Снижение себестоимости добычи урана может быть достигнуто путем применения специальных систем вскрытия залежи. Для оценки эффективности применения различных систем вскрытия целесообразно использовать методы численного моделирования [3–6]. В настоящей работе с помощью численного моделирования исследуется применение дополнительных рядов скважин в области с высокой продуктивностью при отработке эксплуатационного блока поперечной рядной системой технологических скважин.

### **Методика проведения исследований**

Исследование проводилось с помощью специализированной информационно-моделирующей системы «Курс», разработанной в СТИ НИЯУ МИФИ [7]. Система «Курс» позволяет создавать геолого-технологические цифровые модели эксплуатационных блоков, включающие в себя модели геологической среды и технологических объектов, а также осуществлять моделирование процесса методом скважинного подземного выщелачивания. Геотехнологические расчеты выполняются с учетом гидрологических и геологических особенностей строения продуктивного горизонта, режимов работы технологических скважин и составов нагнетаемых растворов.

В настоящей работе рассматривается два варианта схемы вскрытия (рис. 1) модельного технологического блока. В первом случае для вскрытия блока применяется классическая поперечная рядная схема со следующими параметрами: расстояние между рядами откачных и нагнетательных скважин – 40 м, расстояние между нагнетательными и откачными скважинами в ряду – 30 м (рис. 1, а). Количество технологических скважин равняется 32 (20 нагнетательных и 12 откачных). Во втором случае в области с высокой продуктивностью расстояние между рядами откачных и нагнетательных скважин сокращается вдвое. При этом в схему добавляется 9 нагнетательных и 6 откачных скважин, располагающихся в области с высокой продуктивностью (рис. 1, б). Эксплуатационный блок имеет следующие геотехнологические параметры: площадь – 28.8 тыс. м<sup>2</sup>, эффективная мощность – 10 м, запас урана – 157.5 т, горно-рудная масса – 529.8 тыс. т. Продуктивность в пределах блока изменяется в диапазоне от 0.3 до 10 кг/м<sup>2</sup> при среднем значении 5.47 кг/м<sup>2</sup>.



Из сравнения рис. 2, *а* и *б* видно, что увеличение количества технологических скважин ведет к росту концентрации кислоты в области с высокой продуктивностью. Это приводит к интенсификации растворения урановых минералов и возрастанию концентрации урана в технологических растворах продуктивного горизонта, как показано на рис. 2, *в* и *г*. Распределение продуктивности на момент извлечения 80% урана представлено на рис. 3. Видно, что применение дополнительных скважин приводит к более равномерной отработке блока и уменьшению остаточного урана в области с высокой продуктивностью на завершающей стадии отработки.

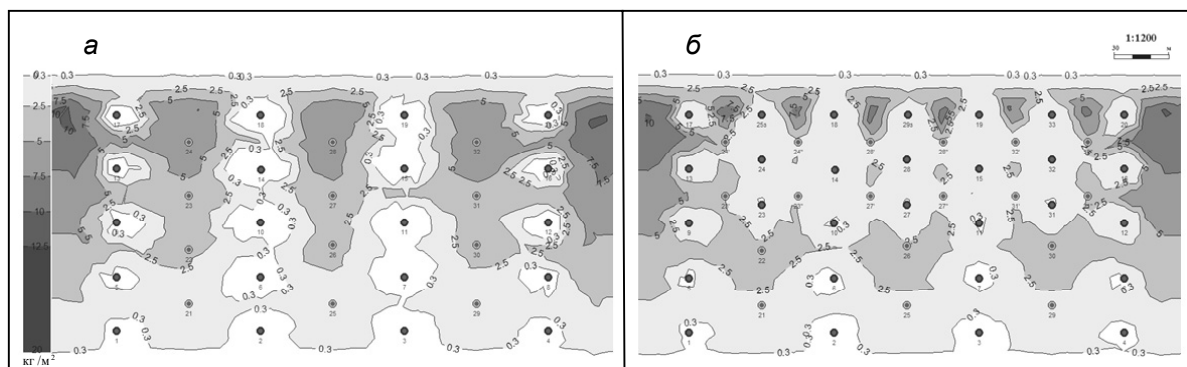


Рис. 3. Распределение продуктивности на момент 80% извлечения урана при отработке блока классической рядной схемой (*а*) и рядной схемой с дополнительными скважинами (*б*)

На рис. 4 приведены временные зависимости концентрации урана в продуктивных растворах и массы извлеченного урана для различных вариантов схемы вскрытия. Применение дополнительных скважин приводит к снижению концентрации урана в продуктивных растворах (рис. 4, *а*). Вместе с тем в результате увеличения суммарного дебита блока происходит существенное возрастание темпов добычи урана. Таким образом, достижение 80%-й степени извлечения урана из технологического блока происходит значительно быстрее, как показано на (рис. 4, *б*).

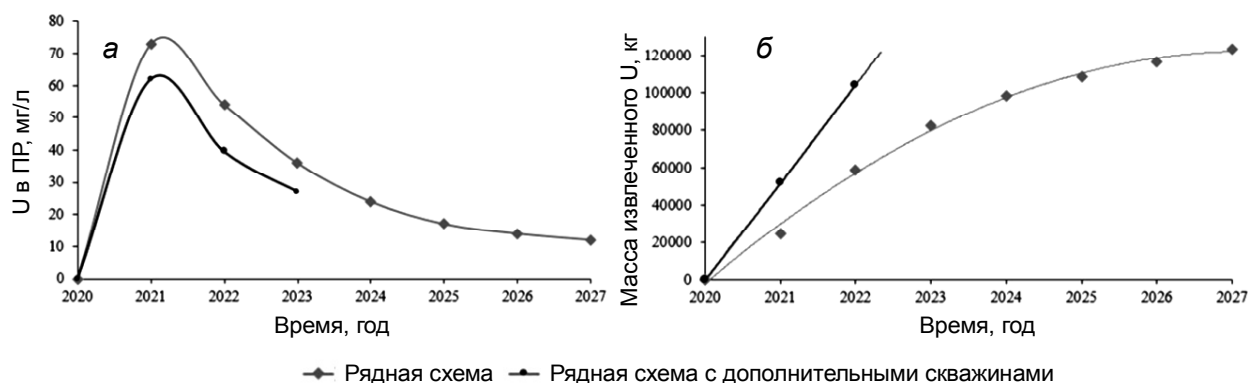


Рис. 4. Зависимости от времени концентрации урана в продуктивных растворах (*а*) и массы извлеченного урана (*б*) для различных вариантов схемы вскрытия

Геотехнологические показатели отработки технологического блока на момент извлечения 80% урана для двух вариантов схемы вскрытия представлены в таблице. На основе приведенных данных можно сделать вывод, что увеличение количества технологических скважин в области высокой продуктивности приводит к повышению эффективности отработки технологического блока (сокращению времени отработки, уменьшению отношения жидкое/твердое (Ж/Т), снижению затрат кислоты и увеличению содержания урана в продуктивных растворах и др.). В результате происходит снижение эксплуатационных расходов за счет сокращения затрат на реагенты, электроэнергию и прочие расходы, необходимые для работы блока. Интегральная оценка экономических показателей отработки технологического блока показывает, что снижение эксплуатационных расходов приводит к уменьшению себестоимости добычи урана несмотря на увеличение капитальных затрат при сооружении дополнительных скважин.

**Основные геотехнологические показатели отработки технологического блока  
для степени извлечения урана 80%**

Показатель	Классическая поперечная рядная схема	Рядная схема с дополнительными скважинами
Концентрация U в продуктивных растворах на момент завершения отработки, мг/л	11.76	27.47
Концентрация кислоты в продуктивных растворах на момент завершения отработки, г/л	4.4	7.78
Масса извлеченного U, т	126	126
Время отработки, лет	7.42	2.67
Отношение Ж/Т, м <sup>3</sup> /т	7.36	5.21
Расход кислоты, тыс. т	32.96	14.5
Кислотоемкость, кг/т	62.22	27.37
Удельный расход кислоты, кг/кг	261.38	114.07
Средняя концентрация U в продуктивных растворах, мг/л	32.33	46.07
Средняя концентрация кислоты в продуктивных растворах, г/л	4.06	7.25

### Выводы

Результаты геотехнологических расчетов отработки модельного блока показывают, что увеличение количества технологических скважин в области с высокой продуктивностью приводит к повышению равномерности отработки рудного тела. При этом происходит увеличение темпов добычи урана, уменьшение расхода кислоты и сокращение времени отработки блока. Таким образом, сооружение дополнительных технологических скважин в области с высокой продуктивностью можно рассматривать как способ повышения эффективности разработки месторождения урана методом СПВ и снижения себестоимости добычи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий В.И., Богатков Л.К., Волков Н.И. и др. Справочник по геотехнологии урана. – М.: ЭнергATOMиздат, 1997. – 672 с.
2. Акимов И.Д., Бабкин А.С., Воронцова О.М. и др. Геотехнология урана (российский опыт). – М.: КДУ, 2017. – 576 с.
3. Гуцул М.В., Кеслер А.Г., Носкова С.Н., Носков М.Д. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 4/2. – С. 109–113.
4. Бабкин А.С., Гуцул М.В., Кеслер А.Г. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 12/3. – С. 3–8.
5. Гусаров М.А., Носков М.Д. // Изв. вузов. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 11/2. – С. 11–14.
6. Шрайнер А.Э., Носков М.Д., Носкова С.Н. // Изв. вузов. Физика. – 2018. – Т. 61. – № 12/2. – С. 140–144.
7. Носков М.Д., Гуцул М.В., Истомин А.Д. и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 7. – С. 361–366.

Поступила в редакцию 20.10.2020.

<sup>1</sup> Северский технологический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск, Россия

<sup>2</sup> АО «Хиагда», Баунтовский эвенкийский район, поселок Багдарин, Республика Бурятия, Россия

**Попова** Ксения Евгеньевна, студентка СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: ksenya.ksenya.popova@mail.ru;

**Гладышев** Андрей Владимирович, генеральный директор АО «Хиагда», e-mail: gladishev.a.v@hiagda.ru;

**Носкова** Светлана Николаевна, мл. науч. сотр. СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: snnoskova@mephi.ru;

**Носков** Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: md\_noskov@mail.ru.

K.E. POPOVA<sup>1</sup>, A.V. GLADYSHEV<sup>2</sup>, S.N. NOSKOVA<sup>1</sup>, M.D. NOSKOV<sup>1</sup>

**APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION TO ESTIMATE THE EFFICIENCY  
OF ADDITIONAL WELLS USING AT URANIUM MINING  
BY THE IN SITU LEACHING METHOD**

The application of additional rows of technological wells in the area of high productivity to improve the efficiency of uranium mining by in-situ leaching is considered. Geotechnological indicators of operational unit development are calculated for various hole patterns. Efficiency of the additional wells application has been estimated on the basis of the obtained results.

**Keywords:** *mathematical modeling, in situ leaching, uranium mining, geotechnological indicators, opening scheme.*

<sup>1</sup> Seversk Technological Institute National Research Nuclear University «MEPHI», Seversk, Russia

<sup>2</sup> JSC «Khiagda», Bauntovsky Evenk district, Bagdarin village, Republic of Buryatia, Russia

---

**Popova** Kseniya Yevgenyevna, Student STI NRNU «MEPHI», e-mail: ksenya.ksenya.popova@mail.ru;

**Gladyshev** Andrei Vladimirovich, General Manager JSC «Khiagda», e-mail: gladishev.a.v@hiagda.ru;

**Noskova** Svetlana Nikolaevna, Junior Researcher STI NRNU «MEPHI», e-mail: snnoskova@mephi.ru;

**Noskov** Mikhail Dmitrievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor STI NRNU «MEPHI», e-mail: md\_noskov@mail.ru.