

# ОБОСНОВАНИЕ ДОБЫЧИ УРАНА МЕТОДОМ СПВ НА ОСНОВЕ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Владимир Уговец, SRK Consulting (USA)*

Численное геотехнологическое моделирование широко используется в течение различных этапов освоения уранового месторождения методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). С точки зрения СПВ проектов, планирование горных работ, оптимизация скважинных полигонов и извлечение урана при отработке месторождения, восстановление первоначальных свойств водоносного горизонта и его рекультивация после завершения процесса добычи урана имеют различные цели и задачи. Наш недавний опыт работы с месторождениями урана, обрабатываемых методом СПВ, показывает, что для достижения каждой цели может быть использована комплексная геотехнологическая модель, связывающая процессы фильтрации растворов в подземных водах с реактивным массопереносом и использование которой позволяет существенно улучшить экономические показатели горного проекта. Когда такая модель разрабатывается, начиная с ранней стадии проекта, она может обеспечить полный цикл прогнозирования процессов СПВ, включая планирование горных работ, оптимизацию добычи урана и рекультивацию объекта после отработки месторождения. Данная статья посвящена применению методов геотехнологического моделирования для планирования горных работ и оптимизации извлечения запасов урана.

## **Общие сведения**

В 2008 году авторы начали подробный технический анализ Хиагдинского месторождения урана в Бурятии (Россия). Более 9 лет данных извлечения урана из опытно-промышленного участка были использованы для обоснования графика добычи урана из четырех основных рудных залежей, приуроченных к палеодолинам. Часть работы по проекту включала независимую интерпретацию экспериментальных данных по двум опытным блокам для обоснования извлечения урана в пределах всего месторождения в промышленном масштабе. Авторы получили доступ к конкретным физическим и химическим данным по опытно-промышленной добыче урана, которые обычно не доступны для современных СПВ урановых проектов, находящихся на начальной стадии их развития. Эти данные составляют основу геотехнологического моделирования, обсуждаемого в этой статье.

## **Цели**

Геотехнологические аспекты, связанные с добычей урана методом СПВ, являются весьма сложными. Однако для прогнозного моделирования эту сложность можно понизить до относительно небольшого числа фундаментальных процессов, протекающих при СПВ. Точность оценки может быть повышена при использовании наших знаний об этих фундаментальных процессах независимо от того, насколько несовершенными могут оказаться эти знания. Существуют две причины использования подхода, основанного на геотехнологическом моделировании:

- Повышение точности в экстраполяции извлечения урана в течение длительного срока и
- Учет изменения основных параметров (мощность, содержание урана, содержание сульфатов, конструктивные параметры скважинного поля и т. д.) при оценке извлечения урана в различных точках рудной залежи.

## **Методология**

Учитывая имеющиеся технические данные по опытному СПВ, авторы использовали геотехнологическое моделирование, основанное на построении лент тока с использованием исследований, выполненных Горным бюро США (Петерсон, 1985; Шмидт и др., 1981). При

использовании этого подхода двумерная (2D) задача для поля скважин сводится к одномерной (1D) задаче. Шаги, используемые в этой процедуре, включают:

- Оценку данных, построение и анализ линий тока,
- Анализ направления и скоростей движения растворов и реактивного массопереноса и
- Прогнозное моделирование.

В геотехнологической модели СПВ используется аналитическая или численная модель для анализа линий тока (например, программа *ISRFlow*, разработанная К.А. Петерсон) и модель *PHREEQC* для моделирования изменения концентрации урана в продуктивном растворе с течением времени (Паркхурст и Аппело, 1999). Данные по начальному извлечению урана необходимы и были использованы для калибровки геотехнологической модели.

Целью построения лент тока является определение и анализ области потока, в которой происходит перенос растворенного вещества с химическими реакциями. Ленты тока были построены, используя двумерную стационарную модель фильтрации потока, вызванного закачкой выщелачивающего раствора и откачкой продуктивного раствора. В каждом случае обеспечивался баланс между суммарными расходами закачки и откачки. Каждая линия тока характеризуется расходом и временем достижения откачной скважины.

Следующим шагом является моделирование реактивного массопереноса согласно концептуальной модели вдоль лент тока, полученных в ходе анализа линий тока. С целью упрощения обработки данных использовалась одна «трубка» тока (то есть один путь реакции), который состоял из 20 - 100 ячеек для представления всех лент тока в данной задаче, причем всем ячейкам внутри ленты тока назначался единый шаг по времени. Каждая отдельная ячейка, выбранная для расчета, составляет собой точку наблюдения, которая представляет конечную точку расчетной линии тока.

Реактивной массоперенос моделирует различные геохимические реакции, в том числе окисление и растворение уранинита, окисление пирита, растворение гидроокиси железа (гетита), катионный обмен, и растворение буферизации pH. Результатами расчета по программе *PHREEQC* являются значения концентрации для отобранных ячеек, которые изменяются с течением времени и которые представляют линии тока к откачным скважинам. Эти концентрации интегрировались таким образом, чтобы составить графики изменения концентрации урана во времени для изменяющегося продуктивного раствора, извлеченного из одной откачной скважины или группы откачных скважин с течением времени. Это было достигнуто путем вычисления усреднения концентраций с весами, используя весовые коэффициенты, полученные при анализе линий тока. Затем усредненная с весами и изменяющаяся во времени концентрация использовалась для расчета скорости извлечения урана и кумулятивного извлечения урана.

Рудные тела разделялись на линейные рядные блоки и гексагональные ячейки в зависимости от их конфигурации залежи. Значения продуктивностей (запасов урана на единицу площади) для каждого прогнозного расчетного блока/ячейки рассчитывались на основе 3-D геологической блочной модели для подсчета запасов.

Были построены прогнозные геотехнологические модели для линейного блока скважин и для гексагональной ячейки для расчета добычи урана на основе коэффициента фильтрации, мощности продуктивного водоносного горизонта, ширины палеодолины (для линейного блока), расхода откачной скважины, и продуктивности рудной залежи.

## Результаты моделирования

На основании построения лент тока и моделирования реактивного массопереноса процессов СПВ извлечение урана было рассчитано для прогнозных линейных блоков и гексагональных ячеек, варьируя величины продуктивности залежи. Результаты этих прогнозных расчетов включают:

- Концентрацию урана в продуктивных растворе во времени;
- Добычу урана (в тоннах) в зависимости от времени;
- Процент извлечения урана во времени, рассчитанный в зависимости от продуктивности рудной залежи.

Предполагая цель - 80% извлечения урана и используя полученные графики, зависимость времени 80% извлечения урана от продуктивности как полиномиальная функции была рассчитана на основе регрессионного анализа по формуле:

$$T_{80\%} = a + b \times P + c \times P^2 \quad (1)$$

где:

$T_{80\%}$  = время 80% извлечения урана (года);

$P$  = продуктивность рудной залежи, ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ).

На основании зависимости  $T_{80\%} = f(P)$ , показанной выше в уравнении (1) и на рисунке 1, рассчитывалось время, необходимое для достижения 80% извлечения урана из каждого прогнозного блока в пределах рудного тела.

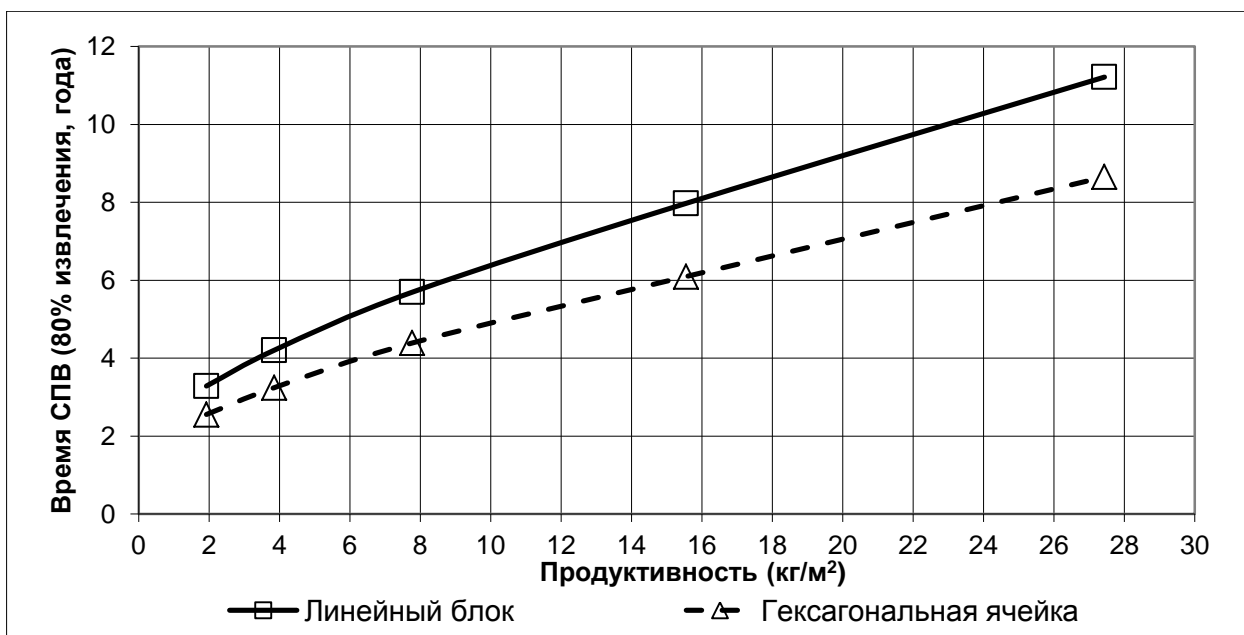


Рисунок 1.

Связь между временем 80% извлечения урана в зависимости от продуктивности рудной залежи.

Годовое производство урана из каждого расчетного блока рассчитывалось по формуле:

$$U_{\text{год}} = (P \times A \times 0,8) / T_{80\%} \quad (2)$$

где:

$T_{80\%}$  = время 80% извлечения урана (года),

$P$  = продуктивность рудной залежи ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) и

$A$  = площадь блока ( $\text{м}^2$ ).

Средняя концентрация урана в выщелачиваемых растворах в пределах каждого расчетного блока рассчитывалась по формуле:

$$C_{\text{средн}} = (U_{\text{год}} \times 1000) / (Q \times 24 \times 365) \quad (3)$$

где:

$C_{\text{средн}}$  = средняя концентрация урана в течение времени 80% извлечения урана (мг/л);

$U_{\text{год}}$  = годовое производство урана из каждого расчетного (кг/год), и

$Q$  = Суммарный расход откачных скважин в расчетном блоке (м<sup>3</sup>/час).

График добычи урана был разработан для всего месторождения на основе ежегодного извлечения урана из каждого расчетного блока с учетом: а) целевой суммарной добычи, б) производительности фабрики по обогащению продуктивных растворов и в) требований к концентрации урана в этих растворах. Аналогичный подход с использованием геотехнологического моделирования может быть использован для оптимизации поля скважин и определения расстояний между откачными и нагнетательными скважинами.

### **Заключение**

Несмотря на использование сернокислотного выщелачивания на Хиагдинском урановом месторождении, описанное выше геотехнологическое моделирование может быть непосредственно применено к процессам щелочного СПВ, широко распространенного в Соединенных Штатах.

Предлагаемый модельный подход может быть использован для обоснования разработки месторождения на начальном этапе, проектирования системы откачных и нагнетательных скважин, прогнозирования эксплуатационных параметров системы СПВ, прогноза времени извлечения урана из отдельных блоков или частей месторождения, обоснования графика добычи и оптимизации скважинных полигонов для улучшения экономических показателей освоения месторождения. Кроме того, подобный модельный подход может спрогнозировать и помочь в оптимизации процесса рекультивации водоносного горизонта после завершения добычи урана на основе анализа тех реакций, протекаемых в процессе восстановления первоначальных свойств горизонта. К таким процессам относятся циркуляция специальных растворов, очистки подземных вод с использованием обратного осмоса, а также введение щелочных или других растворов в продуктивный горизонт. Если геотехническая модель разработана на начальном этапе освоения месторождения, ее прогнозирующая способность будет увеличиваться во времени, создавая динамический инструмент для эффективного продолжения эксплуатации объекта СПВ.