

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ПРОДУКТИВНОГО РАСТВОРА ПРИ ОТРАБОТКЕ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МОНГОЛИИ

© Б. Жанчив, О.Е. Хоменко, Д.В. Рудаков, Л. Ценджав

Проведен анализ гидрогеологических и горнотехнических условий на месторождениях урана в Монголии. Выполнено численное моделирование фильтрации продуктивных растворов при отработке урановых месторождений в центральной части страны методом скважинного подземного выщелачивания.

Проведено аналіз гідрогеологічних і гірничотехнічних умов на родовищах урану в Монголії. Виконано чисельне моделювання фільтрації продуктивних розчинів при відпрацюванні уранових родовищ в центральній частині країни методом свердловинного підземного вилугування.

The paper analyses hydrogeological and mining conditions on the uranium deposits in Mongolia. A numerical simulation of leachate percolation and flow was carried out for treatment of the uranium deposits in the central part of the country to be treated by the in-situ leaching method.

Оценки запасов урана в разных странах мира постоянно корректируются в результате разведки новых месторождений и отработки старых. Кроме того, изменяется оценка доступных для разработки запасов. Опубликованные в открытой печати данные по запасам урана весьма противоречивы: если его запасы никак не привязаны к цене добычи, то данные по надежно разведанным ресурсам урана определяются возможностью выделить U из руды при себестоимости до 100 \$/кг, причем общие запасы оцениваются в 3,3 млрд. кг в пересчете на U₃O₈. Согласно одному из последних обзоров [1], последовательность стран с наибольшими запасами диоксида урана выглядит следующим образом: Австралия – США – ЮАР – Канада – Россия – Казахстан – Нигерия.

Существенное перераспределение запасов урана в мире за последние пять лет привело к снижению цен на сырье до уровня, не обеспечивающего рентабельность добывающих предприятий. Эффективная разработка месторождений может продолжаться при таком уровне цен лишь благодаря следующим факторам. К ним относятся:

- наличие на рынке урана, добываемого как попутного компонента;
- возможность некоторых производителей (Казахстан и Узбекистан) добывать уран низкой себестоимости, временно используя богатые участки месторождений;
- реализация урана многими добывающими компаниями по ценам, значительно выше текущих, за счет заключенных ранее долгосрочных контрактов, действие которых прекратится в течение ближайших лет.

В таких условиях уже закрыт ряд добывающих предприятий, не обладающих такими преимуществами.

Относительно дешевое производство урана на уровне 25 – 35 \$/кг возможно только компаниями, эксплуатирующими два типа месторождений: канадские объекты «несогласий» и месторождения «песчаникового» типа под скважинное под-

земное выщелачивание (СПВ). Их можно отнести к первой группе производителей, куда попали проекты «МакАртур-Ривер», «МакКлейн-Лейк», «Сигар-Лейк» (Канада), объекты СПВ Австралии, Узбекистана, Казахстана и России. Сюда же следует отнести месторождения, где уран добывается попутно: «Олимпик Дам» и другие месторождения Южной Африки.

Существующий мировой опыт эксплуатации урановых месторождений методом СПВ показал, что безотказная работа геотехнологического оборудования эффективна в условиях плюсовых температур. Географическое расположение Монголии характеризуется резко континентальным климатом Центральной Азии, где плюсовые температуры фиксируются в летние месяцы, а зимняя температура зачастую опускается ниже -50°C . Бурение и оборудование геотехнологических скважин, монтаж и демонтаж оборудования, работа с растворами и материалами в таких климатических условиях носит сезонный характер, что обуславливает необходимость отработки месторождений только в летнее время. При этом, на всех гидрогенных месторождениях страны рудные тела залегают на разных глубинах, что увеличивает время и затраты на их отработку. Таким образом, возникает научно-практическая задача повышения интенсивности отработки гидрогенных месторождений урана в Монголии в условиях сезонного ведения добычных работ.

Целый ряд перспективных месторождений урана находится в центральной части Монголии, восточнее столицы Улан-Батор: «Хараат», «Хайрхан», «Гурван-Сайхан» и «Ульзит». Рассмотрим более детально условия отработки методом СПВ на примере месторождения «Ульзит» (рис. 1).

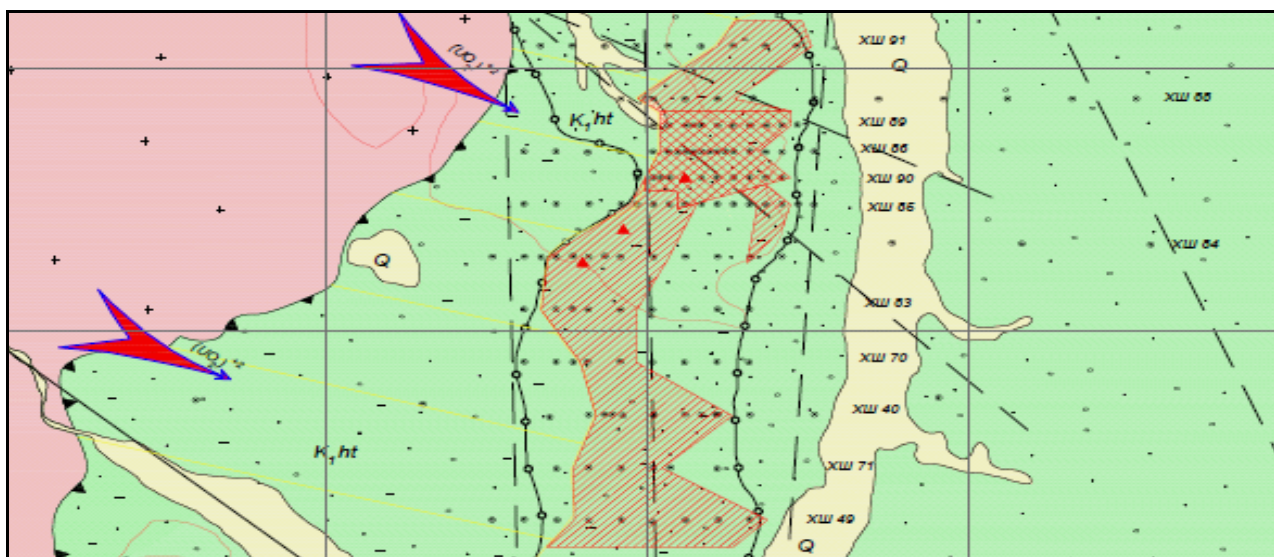


Рис. 1. Геологическая карта месторождения «Ульзит»

Проницаемость рудоносных горизонтов изменяется от малых до средних значений (коэффициент фильтрации от 0,1 до 10,0 м/сут). Проводимость водовмещающих пород невысокая, обычно до 25 м²/сут, в отдельных случаях более 50 м²/сут. Рудоносная зона и непосредственно месторождение расположено на территории единого гидрогеологического комплекса, ограниченного на во-

стоке субмеридиональным разломом. На северном и южном флангах рудного поля проявляются фрагменты границ, роль которых в водообмене к настоящему времени пока не ясна. Поток подземных вод внутри гидрогеологического комплекса направлен от бортов впадины к центру и с запада на восток. Уровни подземных вод на месторождении, в зависимости от формы рельефа, находятся на глубине 1,4 – 7,5 м с абсолютными отметками 1076 – 1078 м. Западнее месторождения, откуда происходит поступление подземных вод, абсолютные отметки уровней равны 1085-1090 м.

В гидрогеологическом блоке, расположенном восточнее месторождения, уровни подземных вод находятся на глубине 11,5 – 25,0 м с абсолютными значениями отметок 1065 – 1055 м. Переток подземных вод через границу, ширина которой составляет 100 – 200 м, проявлен плавным снижением уровней на 20 м, от 1077 м до 1055 м в абсолютных значениях. В пределах рудного поля месторождения выделено три рудоносных узла: Северный, Центральный и Южный, на которых в 1997 г. были проведены гидрогеологические работы. В лучшей степени изучен в гидрогеологическом отношении Южный узел, где опытно-фильтрационные исследования проведены на всех трех уровнях оруденения. В разрезе осадочной толщи выделяются несколько водоносных горизонтов разделенных водоупорными глинами мощностью от 2 м до 10 м. На локальных участках, соизмеримых по площади с гидрогеологическим кустом, водоупорные породы обеспечивают гидравлическую изоляцию водоносных горизонтов. Результаты откачек на гидрогеологических кустах, где скважины расположены ярусно, свидетельствуют об отсутствии вертикальной реакции на возмущение на протяжении опыта в 2 – 3 суток. Однако, в разрезе гидрогеологического блока выделяемые водоносные горизонты до глубины 150 м (глубина изучения) имеют одинаковое положение уровней подземных вод. Напоры их с глубиной увеличиваются. Данный фактор свидетельствует об одной области питания водоносных горизонтов, их гидравлической связи, и том, что гидрогеологический блок представляет собой единую гидрогеологическую структуру.

Мощность напорного водоносного горизонта вмещающего нижний уровень оруденения колеблется от 10 – 15 м до 40 м и более. В разрезе осадков наблюдается частое переслаивание проницаемых разномерных песков, слабопроницаемых малоглинистых и глинистых песков, водоупорных песчаных глин и алевролитов. Водоупорные породы внутри горизонта ограничены в пространстве, мощность их колеблется от 1 м до 3 – 5 м. Пачка рыхлых отложений, вмещающая водоносный горизонт, относится к пойменно-русловой фации. В отдельных прослоях отмечены крупнообломочные фракции. Подобное распределение разнотипных осадков определяет хаотическую фильтрационную неоднородность пород. Водопроницаемость пород продуктивного горизонта изменяется от 16 до 31 м²/сут, удельные дебиты скважин – от 0,15 до 0,4 л/с. Дебиты откачек составили 2,8 – 6,4 м³/час при понижениях от 11,6 до 18,6 м. Коэффициент пьезопроводности водоносного горизонта составляет 5,6 – 9,4·10⁴ м²/сут. Послойное изучение фильтрационных свойств урансодержащих пород проводилось с применением расходомерного каротажа, результаты которого совместно с данными откачек использовались в расчетах коэффициентов филь-

трации. Результаты исследований свидетельствуют о фильтрационной анизотропии пород [2].

Математическая модель фильтрации продуктивных растворов основывается на схематизации следующих гидрогеохимических условий. Подземные воды месторождения – хлоридно-сульфатные, магниевые-натриевые, реже натриевые воды с минерализацией 3 – 5 г/л, с нейтральной или слабощелочной средой. В некоторых пробах минерализация достигает 6,0 – 6,6 г/л. Общая жесткость воды колеблется от 7,5 до 34,0 мг-экв/л. Для подземных вод водоносных горизонтов характерно отсутствие окисного железа, небольшие содержания закисного железа (2,8 – 7,3 мг/л), присутствие сероводорода до 10,2 мг/л. Имеющиеся данные свидетельствуют о наличии в рудоносном массиве восстановительной обстановки. Содержания урана в подземных водах колеблется от $3 \cdot 10^{-5}$ г/л до $3 \cdot 10^{-4}$ г/л. В нижнем и среднем продуктивных горизонтах концентрация урана в воде составляет $(3 - 5,4) \cdot 10^{-5}$ г/л, в верхнем горизонте она достигает $(1 - 3) \cdot 10^{-4}$ г/л.

Разработанная модель фильтрации растворов позволяет воспроизводить распределение давления и развитие гидродинамических процессов при нагнетании растворов и их отборе. На основании фильтрационной модели оказывается возможным количественно исследовать миграционные нестационарные гомогенные и гетерогенные процессы. Таким образом, моделируются физико-химические процессы неравновесного взаимодействия кислоты с минералами, поглощающими кислоту, неравновесное растворение-осаждение урана в различных формах, гомогенные кислотно-основные процессы, неравновесные окислительно-восстановительные процессы, неравновесная сорбция и десорбция, протекающие в рудовмещающей толще при разработке гидрогенных месторождений урана методами СПВ [1].

Основной моделирования фильтрации продуктивных растворов в рудовмещающей толще является дифференциальное уравнение [2]

$$T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + W + Q = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где H – напор (уровень) подземных вод, содержащих продуктивные растворы, м; T_x и T_y – проводимость водоносного горизонта вдоль осей Ox и Oy , м²/сут; W – инфильтрация, м/сут; Q – интенсивность источников и стоков (закачных и откачных скважин), распределенных по площади, м/сут; μ – упругая водоотдача, t – время, сут.

Одним из универсальных методов численного решения уравнения (1) является метод конечных разностей. Конечно-разностные уравнения выводятся на основе баланса массы в каждой элементарной ячейке сетки, которой покрывается область расположения блоков СПВ на месторождении «Ульзит» (рис. 2). Составленное уравнение баланса заменяется соответствующим разностным выражением. Алгоритм конечно-разностного решения уравнения фильтрации (1) положен в основу программного обеспечения «ModFlow», используемого для исследования фильтрации продуктивных растворов при подземном выщелачивании урана.

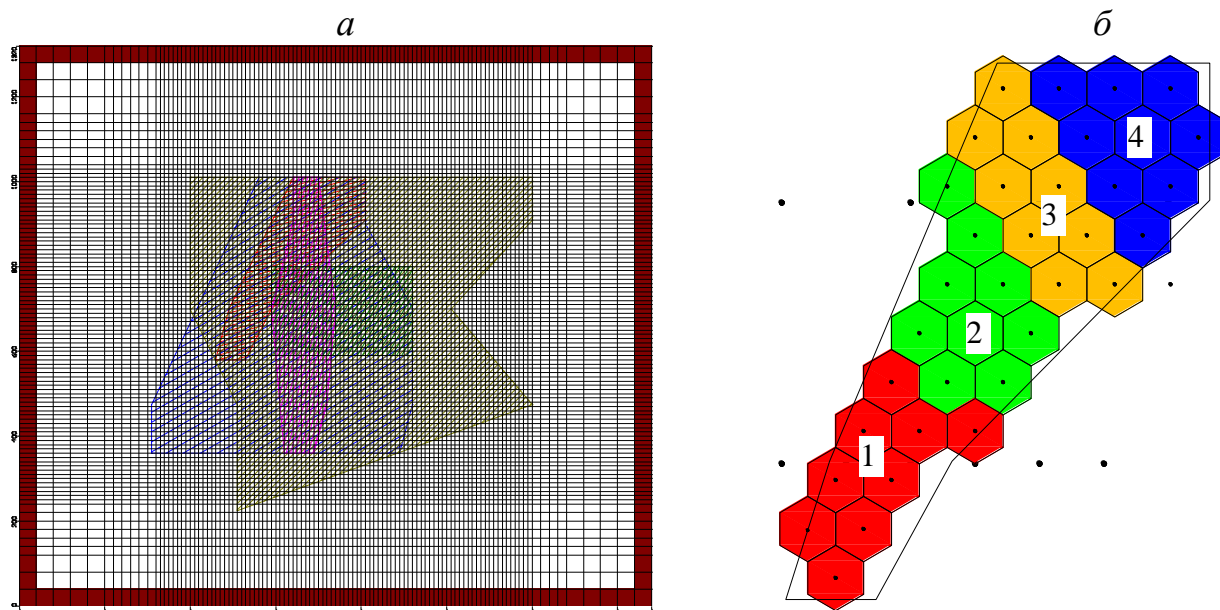


Рис. 2. Конечно-разностная аппроксимация месторождения «Ульзит» (а) и расположение обрабатываемых блоков рудного тела 1: группы гексагональных ячеек – добычные блоки № 1, 2, 3 и 4.

При конечно-разностной схематизации месторождения «Ульзит» (рис. 2, б) размеры блоков в пределах рудного тела задавались 5×5 м, что позволило достоверно воспроизводить значительные изменения напора между откачными и закачными скважинами при длине стороны гексагональной ячейки до 25 м. Внешние границы области моделирования задавались на удалении 200 – 400 м от контуров рудного тела, что позволило воспроизвести гидродинамическую изолированность области выщелачивания. Для относительно слабопроницаемых песчаников допустимо моделировать участок выщелачивания как небольшую изолированную зону на большом удалении от естественных границ области фильтрации. На удаленных границах задавался постоянный во времени напор (уровень) подземных вод. В соответствии с принятой гексагональной схемой заложения геотехнологических скважин было выполнено моделирование отработки рудного тела 1 вскрытого участка месторождения.

Таблица 1

Геотехнологические параметры отработки рудного тела 1

№ блока	Закачные скважины			Откачные скважины			Период отработки, сут.	Дебаланс, %
	N	$Q_{0,2}$	$Q_{\Sigma,2}$	N	$Q_{0,1}$	$Q_{\Sigma,1}$		
1	31	20	620	9	80	720	0 – 60	13,9
2							60 – 120	
3							365 – 425	
4	425 – 485	12,5						

В табл. 1 приняты следующие условные обозначения: N – количество скважин, шт.; Q_0 – дебит одной скважины, м³/сут.; Q_{Σ} – суммарный дебит скважин, м³/сут. Дебаланс по скважинам определяется как отношение разности суммарных дебитов к суммарному дебиту откачных скважин

$$\eta = \frac{Q_{\Sigma,1} - Q_{\Sigma,2}}{Q_{\Sigma,1}} 100\% . \quad (2)$$

При задании границ области фильтрации учитывалось, что гидродинамические изменения в массив ураноносных песчаников невысокой проницаемости ограничены пределами рудных тел и небольшой приконтурной зоной вокруг них шириной 30-40 м. Границы области расположены на удалении несколько сотен метров от внешнего контура рудных тел. Такая схематизация при составлении модели допустима при замедленном водообмене, слабом естественном потоке подземных вод и низкой инфильтрации, характерных для пустынной территории месторождения «Ульзит» (рис. 3) [4].

В результате моделирования определены уровни и направления движения технологических и продуктивных растворов при отработке рудного тела 1 месторождения «Ульзит». В период отработки каждого блока вокруг него формируется депрессионная воронка с локальными понижениями в откачных скважинах до 3 м уровня подземных вод. При этом скорость фильтрации вблизи скважин достигает 2 м/сут.

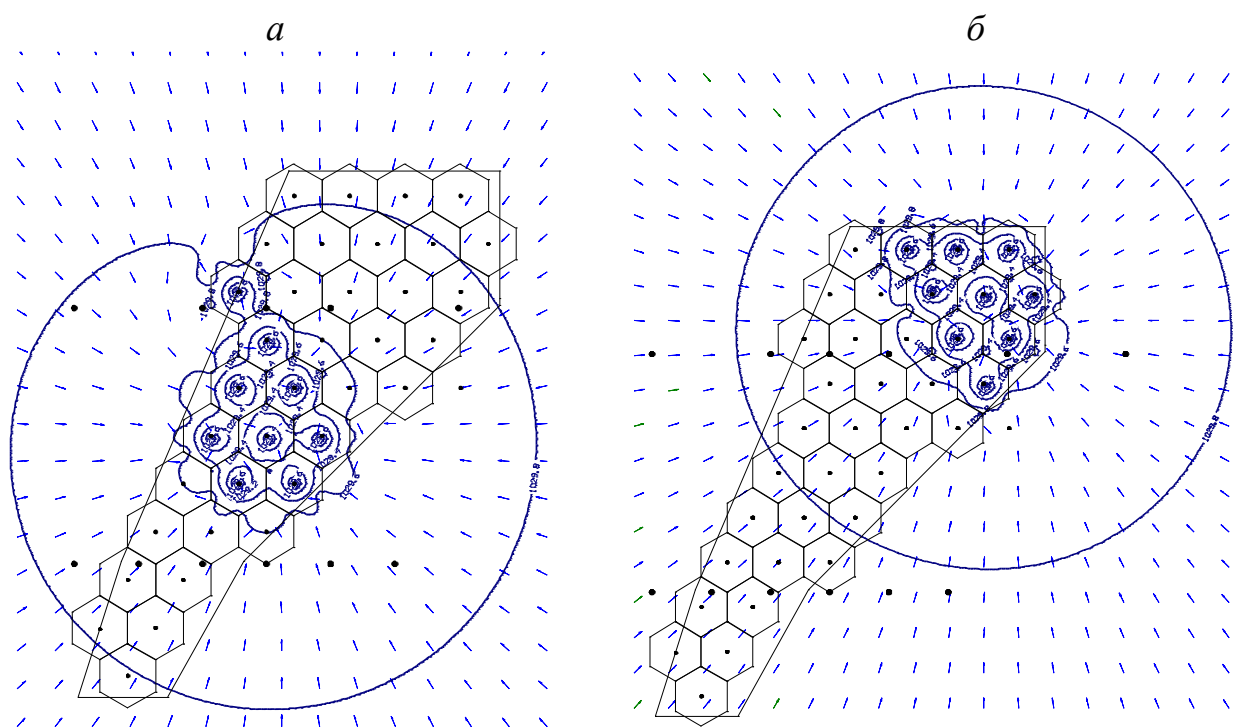


Рис. 3. Уровни и направления движения подземных вод и продуктивных растворов на завершающих этапах отработки рудного тела 1 в блоках № 2 (а) и № 4 (б): контуры блоков

На основе моделирования обоснованы параметры эффективного СПВ при гексагональной схеме заложения скважин для радиуса добычной ячейки 25 м. Миграция продуктивного раствора направлена преимущественно к откачным скважинам, причем его основная часть циркулирует в пределах рудного тела. После отработки предыдущего блока оставшийся в порах растворенный уран стягивается в новый обрабатываемый блок, что повышает степень его извлечения.

Ввиду неполного покрытия ячейками участка рудного тела и выхода некоторых ячеек за его пределы возможно небольшое, до 5-10 м, растекание части раствора за контур рудного тела. Незначительные остатки раствора с непрореагировавшей кислотой могут несколько месяцев находиться за пределами рудного тела в период паузы, связанной с сезонностью ведения добычных работ.

Литература

1. Khomenko O. The first Ukrainian corporative university / O. Khomenko & D. Rudakov // Materials of IV International scientific-practical conference "Scholl Underground Mining – 2010" / "New techniques and technologies in mining". – Netherlands: CRC Press. Balkema. – P. 203-206.
2. Жанчив Б. Монгол улсын ураны үйлдвэрлэл, Цөмийн эрчим хүчний салбарын Өнөөгийн байдал, хөгжлийн хэтийн төлөв / Б. Жанчив, О.Е. Хоменко, Л. Ценджав // Уул уурхайн сэтгүүл. Улаан-Баатар: ШУТИС-ийн УУИС – 2011. – №. 1. – Х. 25 – 29.
3. Zheng C., Wang P.P. MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; Documentation and User's Guide, Contract Report SERDP-99-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. 1999.
4. Рогов А.Е., Распанов Н.Б. Математические основы геотехнологии: Монография / А.Е. Рогов, Н.Б. Распанов. – Алматы: 2007, - 367 с.