

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.831.24.0010

Б. Жанчив¹,
Д.В. Рудаков², д-р. техн. наук, проф.,
О.Е. Хоменко², канд. техн. наук, доц.,
Л. Ценджав³

1 – Урановая энергетическая компания „Мон-Атом“, г. Улан-Батор, Монголия, e-mail: jbileg@yahoo.com

2 – Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: dmi3rud@mail.ru, homenkoo@nmu.org.ua

3 – Монгольский университет науки и технологии, г. Улан-Батор, Монголия, e-mail: lkhagva01@yahoo.com

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРАБОТКИ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МОНГОЛИИ

B. Zhanchiv¹,
D.V. Rudakov², Dr. Sci. (Tech.), Professor,
O.Ye. Khomenko², PhD (Tech.), Associate Professor,
L. Tsendzhav³

1 – Uranium Energy Company “Mon-Atom” Ltd., Ulan-Bator city, Mongolia, e-mail: jbileg@yahoo.com

2 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnepropetrovsk city, Ukraine, e-mail: dmi3rud@mail.ru, homenkoo@nmu.org.ua

3 – Mongolian University of Science and Technology, Ulan-Bator city, Mongolia, e-mail: lkhagva01@yahoo.com

SUBSTANTIATION OF MINING PARAMETERS OF MONGOLIA URANIUM DEPOSITS

Цель. Обосновать геотехнологические параметры способа подготовки и схемы разработки гидрогенных урановых месторождений Монголии методом скважинного подземного выщелачивания.

Методика. Физико-математическое моделирование миграции продуктивных растворов при подземном выщелачивании урана выполнено методом конечных разностей с помощью специального программного обеспечения Modflow (Schlumberger W.S.). Верификация модели проведена на основе сопоставления с натурными данными, учета гидрогеологических условий месторождения „Ульзит“ в Монголии и требуемой точности расчетов. Выполнено инженерно-техническое обоснование погоризонтного способа отработки месторождений с рудными телами на различной глубине.

Результаты. Построена конечно-разностная модель процессов выщелачивания урана для условий гидрогенного месторождения „Ульзит“ в Монголии с помощью программного обеспечения ModFlow. В результате моделирования определены параметры фильтрации продуктивных растворов, воспроизведены изменения концентрации урана в блоках выщелачивания, что позволило оценить динамику его извлечения откачными скважинами. Обоснован погоризонтный способ отработки обособленных рудных тел групповыми скважинами с изменяющимися диаметрами и глубиной заложения, что позволяет отделить обрабатываемые горизонты друг от друга. С помощью программного продукта MathCad определены параметры гексагональной схемы расположения скважин для месторождений Монголии. Выполнена оценка финансовых затрат при добыче урана на примере месторождения „Ульзит“. Применение погоризонтного способа подготовки обособленных рудных залежей позволяет сэкономить до \$ 2,5 млн и до 62% сократить общее время отработки запасов. Применение рационального радиуса добычной ячейки при гексагональной схеме расположения скважин на месторождениях „Хараат“, „Хайрхан“, „Гурван-Сайхан“ позволяет сэкономить до \$ 0,9 млн.

Научная новизна. Состоит в повышении эффективности разработки урановых месторождений Монголии за счет применения погоризонтного способа подготовки обособленных залежей групповыми скважинами, размещаемыми по гексагональной схеме.

Практическая значимость. Состоит в обосновании параметров гексагональной схемы расположения скважин при подземном выщелачивании урана в условиях месторождений Монголии на основе учета изменения во времени концентрации урана в продуктивном растворе. Усовершенствована методика расчета геотехнологических параметров отработки месторождений урана методом скважинного подземного выщелачивания на основе моделирования миграции продуктивных растворов в обрабатываемых блоках. Предложен ресурсосберегающий способ подготовки обособленных рудных тел с совмещением скважин при различных диаметрах и конструкции фильтров.

Ключевые слова: выщелачивание урана, фильтрация продуктивных растворов, погоризонтный способ подготовки, гексагональная схема разработки, экономическая эффективность

Постановка проблемы. Монголия в достаточной степени обеспечена месторождениями урана гидрогенного типа, интенсивная эксплуатация которых может начаться в ближайшее время. При этом необходимо решить вопрос о снижении влияния сдерживающих факторов. Так, например, территориальная изоляция постепенно нивелируется международными глобализационными процессами, сложные климатические условия – интенсификацией разработки в летнее время, слабая освоенность природных ресурсов – открытием международного доступа к запасам.

Обоснование путей интенсификации и методов концентрации горных работ на месторождениях Монголии, которые характеризуются сложными климатическими условиями при высокой изменчивости размеров и формы рудных тел, содержания урана и количества радиоактивных элементов в рудах, имеет актуальное значение для ускорения промышленного развития страны [1].

Анализ последних исследований. Интенсивное перераспределение запасов, реализованное за последние 5 лет, привело к снижению цен на природный уран до уровня, не обеспечивающего воспроизводство добывающих предприятий. Эффективная разработка месторождений может продолжаться при таком уровне цен благодаря: наличию на рынке урана, добываемого как попутный компонент; возможности производителей (Казахстан, Узбекистан) добывать уран низкой себестоимости, используя наиболее богатые участки месторождений; реализации урана по ценам, превышающим текущие за счет заключенных ранее долгосрочных контрактов. В таких условиях уже закрыт ряд добывающих предприятий, не имеющих указанных преимуществ.

Относительно дешевое производство урана на уровне \$ 25–35 за 1кг возможно только компаниями, эксплуатирующими два типа месторождений – это объекты „несогласий“ Канады и гидрогенные месторождения Австралии, Узбекистана, Казахстана и России, а также попутная добыча на месторождениях Южной Африки. Таким образом, формируется научно-практическая задача по повышению интенсивности отработки гидрогенных месторождений урана Монголии в условиях сезонного ведения работ.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Существующий мировой опыт эксплуатации урановых месторождений методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) показал, что безотказная работа геотехнологического оборудования эффективна в условиях плюсовых температур. Географическое положение Монголии характеризуется резко континентальным климатом Центральной Азии, где плюсовые температуры фиксируются в летние месяцы, а зимняя температура опускается ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Бурение 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.

Формулирование цели. Таким образом, становится актуальной научно-практическая задача по повышению интенсивности отработки гидрогенных месторождений урана в Монголии в условиях сезонного ведения работ. Ее решение возможно путем концентрации горных работ на указанных месторождениях, которые характеризуются сложными климатическими условиями при высокой изменчивости размеров и формы рудных тел, содержания урана и количества радиоактивных элементов в рудах. Достижение данной цели имеет актуальное значение для ускорения промышленного развития Монголии.

Изложение основного материала. Для проведения исследований разработана модель фильтрации продуктивных растворов и миграции урана в обрабатываемом рудоносном горизонте, которая позволяет воспроизводить развитие гидродинамических и физико-химических процессов при нагнетании растворов и их отборе. На основании численной модели оказывается возможным количественно исследовать процессы неравновесного массообмена в горных породах с учетом поглощения кислоты, растворения и осаждения урана, неравновесных окислительно-восстановительных процессов, сорбции и десорбции, протекающие в рудовмещающей толще при разработке гидрогенных месторождений урана методами СПВ.

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

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) + Q = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где H – напор (уровень) подземных вод; K_x , K_y , K_z – компоненты коэффициента фильтрации вдоль осей Ox , Oy и Oz соответственно; Q – распределение источников и стоков в области миграции (закачных и откачных скважин соответственно); μ – упругая водоотдача; t – время, сут. В случае нескольких горизонтов решается система уравнений вида (1) относительно напора в каждом из них, которые гидравлически связаны между собой.

Миграция кислоты и растворенного урана в обрабатываемом ураноносном массиве описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial C_1}{\partial x} - v_x C_1\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial C_1}{\partial y} - v_y C_1\right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z \frac{\partial C_1}{\partial z} - v_z C_1\right) - \alpha_1 C_1 + q_1 = n_a \frac{\partial C_1}{\partial t}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C_2}{\partial x} - v_x C_2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C_2}{\partial y} - v_y C_2 \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C_2}{\partial z} - v_z C_2 \right) - \alpha_2 C_2 + q_2 = n_a \frac{\partial C_2}{\partial t} \quad (3)$$

В уравнениях (2) и (3) принято: C_1 и C_2 – соответственно, концентрация кислоты и растворенного урана в подземных водах; D_x , D_y – коэффициенты гидродинамической дисперсии; v_x , v_y – компоненты скорости фильтрации; n_a – активная пористость; α_1 – кинетический коэффициент, суммарно учитывающий расход кислоты на растворение урана и реакции кислоты со вмещающими породами; α_2 – кинетический коэффициент, характеризующий необратимое поглощение урана при его миграции от закачных к откачным скважинам; q_1 – интенсивность поступления кислоты в массив при закачке через скважины; q_2 – интенсивность перехода урана в поровый раствор, зависящая от концентрации кислоты и содержания урана в твердой фазе. Коэффициенты D_x и D_y определяются по формулам $D_x = \delta v_x$ и $D_y = \delta v_y$, где: δ – параметр дисперсивности горной породы. Параметры массообмена принимаются постоянными в области обработки.

Концентрация кислоты и растворенного урана в подземных водах перед началом обработки выщелачиванием принималась равной нулю. На внешних границах задавалась нулевая концентрация. Концентрация кислоты в технологических растворах, подаваемых через закачные скважины, принималась постоянной при обработке каждого блока. В модели учитывается массообмен между активными и проточными порами, что соответствует трещинно-пористой структуре, типичной для песчаника. Учитывая малую мощность проницаемых пород, отсутствие выдержанных водоупорных слоев, весь обрабатываемый ураноносный массив песчаников моделировался как единый комплекс.

При расчетах были приняты следующие исходные данные, характерные для месторождения „Ульзит“: коэффициент фильтрации 1 м/сут; инфильтрация 5 мм/год; пористость 0,1; активная пористость 0,05; кинетические параметры массообмена $\alpha_1 = 0,6 \text{ сут}^{-1}$; $\alpha_2 = 0,001 \text{ сут}^{-1}$. На границе области задан постоянный уровень подземных вод 1030 м над уровнем Мирового океана. По вертикали область аппроксимировалась 10 слоями мощностью 20 м, в каждом из которых начальное содержание урана в твердой фазе задавалось согласно среднему значению по рассматриваемому участку месторождения.

При моделировании технологических условий обработки гидрогенных месторождений урана оценивались показатели средней концентрации урана в продуктивном растворе и максимальной площади зоны растекания технологических растворов. Исследования проводились при различных дебитах на закачных и откачных скважинах. Концентрация кислоты в закачиваемых растворах составляла 5,0 г/л, что соот-

ветствует средней концентрации закачиваемой кислоты.

Основная часть технологического раствора циркулирует в пределах рудного тела (рис. 1). После обработки предыдущего блока оставшийся в порах растворенный уран стягивается в новый обрабатываемый блок, что повышает степень его извлечения. Этим объясняется некоторое увеличение концентрации урана в ячейках, соседних с уже отработанным блоком.

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 этих растворов с непрореагировавшей кислотой могут несколько месяцев, главным образом при технологической паузе в зимний период, находиться за пределами рудного тела. Средняя концентрация урана в извлекаемом растворе при обработке колеблется от 30 до 80 мг/л, что при суммарном объеме откаченных растворов обеспечивает извлечение 9–10 т урана с обрабатываемого рудного тела. Это соответствует 74% извлечения урана [3].

Миграция кислотного раствора и растворенного урана в обрабатываемом массиве в условиях залегания рудного тела I месторождения „Ульзит“ на площади до 600 000 м² (6 га) в интервале отметок 840–1020 м носит трехмерный характер. С учетом технологических возможностей предлагается последовательная нисходящая обработка рудных тел 1, 2, 3, 4 и 5 на данном участке по блокам, состоящим из гексагональных ячеек. Расположенное сверху в интервале отметок 1010–1020 м рудное тело I предлагается обрабатывать 4-мя блоками, каждый из которых состоит из 9 ячеек.

Применение гексагональной схемы позволит рационально расположить скважины на участке и использовать их на нескольких горизонтах обработки. Для рудного тела I предлагаемое покрытие гексагональными ячейками охватывает более 90% его площади. Фактически, ввиду постепенного смещения понижений уровня подземных вод, растворы будут фильтроваться через всю площадь рудного тела, хотя и с различной интенсивностью [3].

Оборудование скважин принято начинать с зоны, расположенной рядом с фильтром, только после установления начального диаметра скважины, ее типа, а также конструкции зоны, расположенной рядом с фильтром. Конечный диаметр обязан обеспечивать требуемую продуктивность и проведение необходимо-го комплекса геотехнологических работ.

Для эффективной эксплуатации скважин с диаметром, изменяющимся по длине, выполняют тщательную цементацию затрубного пространства. Затрубная цементация, проведенная вовремя и без нарушений технологии, исключает гидравлическую связь обрабатываемых рудоносных тел. Преимуществом затрубной цементации является повышение антикоррозионных свойств обсадных колонн и, как следствие, значительное увеличение срока службы.

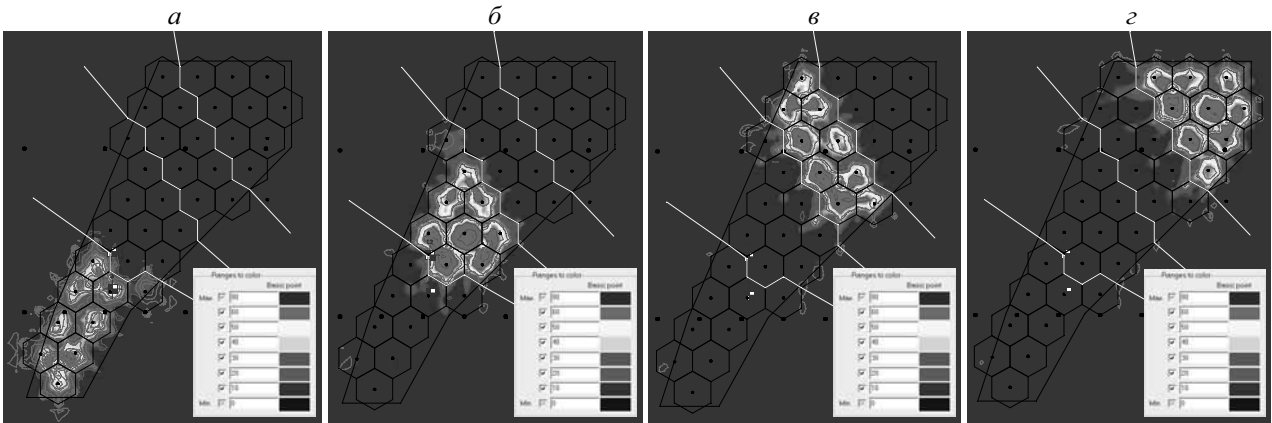


Рис. 1. Распределение концентраций (мг/л) растворенного урана (цветовая шкала) при окончании отработки блоков №№ 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г) рудного тела I месторождения „Ульзит“. Черные линии – ячейки выщелачивания и контуры рудного тела I, светлые линии – границы блоков выщелачивания

Конечный диаметр бурового инструмента устанавливают из условия

$$D\delta = D_m + 2b,$$

где $D\delta$ – диаметр бурового инструмента, мм; D_m – необходимый диаметр муфты обсадной колонны, мм; b – размер зазора, мм.

Так при $D\delta = 250$ мм, $b = 20-50$ мм. Чем меньше выход колонн, тем меньше следует принимать зазор. При производстве процесса бурения скважин на нефть и газ применяют уменьшенные значения b для зазоров: от 7 до 15 мм. Это возможно только при использовании высококачественных растворов из цемента и соблюдении требований технологического процесса цементирования скважин.

Проведение буровых работ в осадочных породах связано с необходимостью опробования встречных водоносных горизонтов, что вызывает необходимость смены диаметра скважин. Основным решением является закладывание не одной, а сети скважин, которые соответствуют разным горизонтам отработки. Предлагаемый погоризонтный способ подготовки месторождения характеризуется высокой степенью концентрации горных работ за счет применения совмещенных скважин, а не проведения новых для каждого рудного тела (рис. 2).

Одной из перспективных схем является асинхронная отработка урановых залежей при работе на групповую колонну скважин, отделенных друг от друга изоляционным материалом фильтров. Это достигается поочередным монтажом мостов из цемента или цементных пробок и особенностью водоподъемной колонны, в конструкции которой используется эластичная манжета – сальник-зонт.

Отработку обособленных рудных тел проводят раздельно друг от друга, сверху вниз, что позволяет отделить каждый горизонт закисления от остальных. При необходимости, возможно провести совместную разработку после окончания отработки погоризонтным способом (рис. 3).

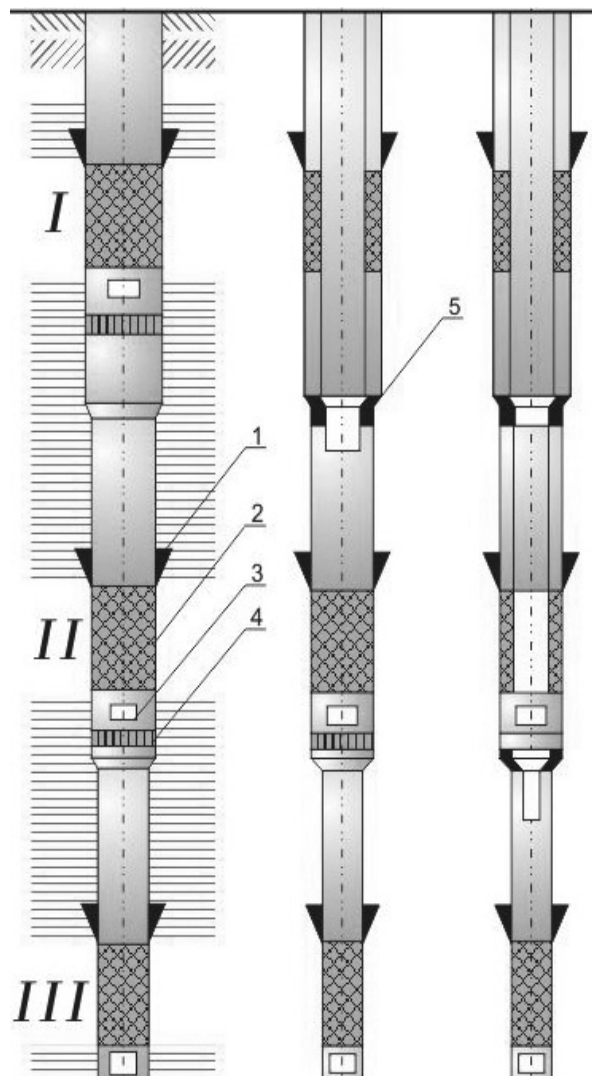


Рис. 2. Конструкция групповых скважин, позволяющая поинтервально обрабатывать рудные тела I, II: 1 – сальник-зонт; 2 – фильтр; 3 – промывочное окно; 4 – цементная труба; 5 – сальник

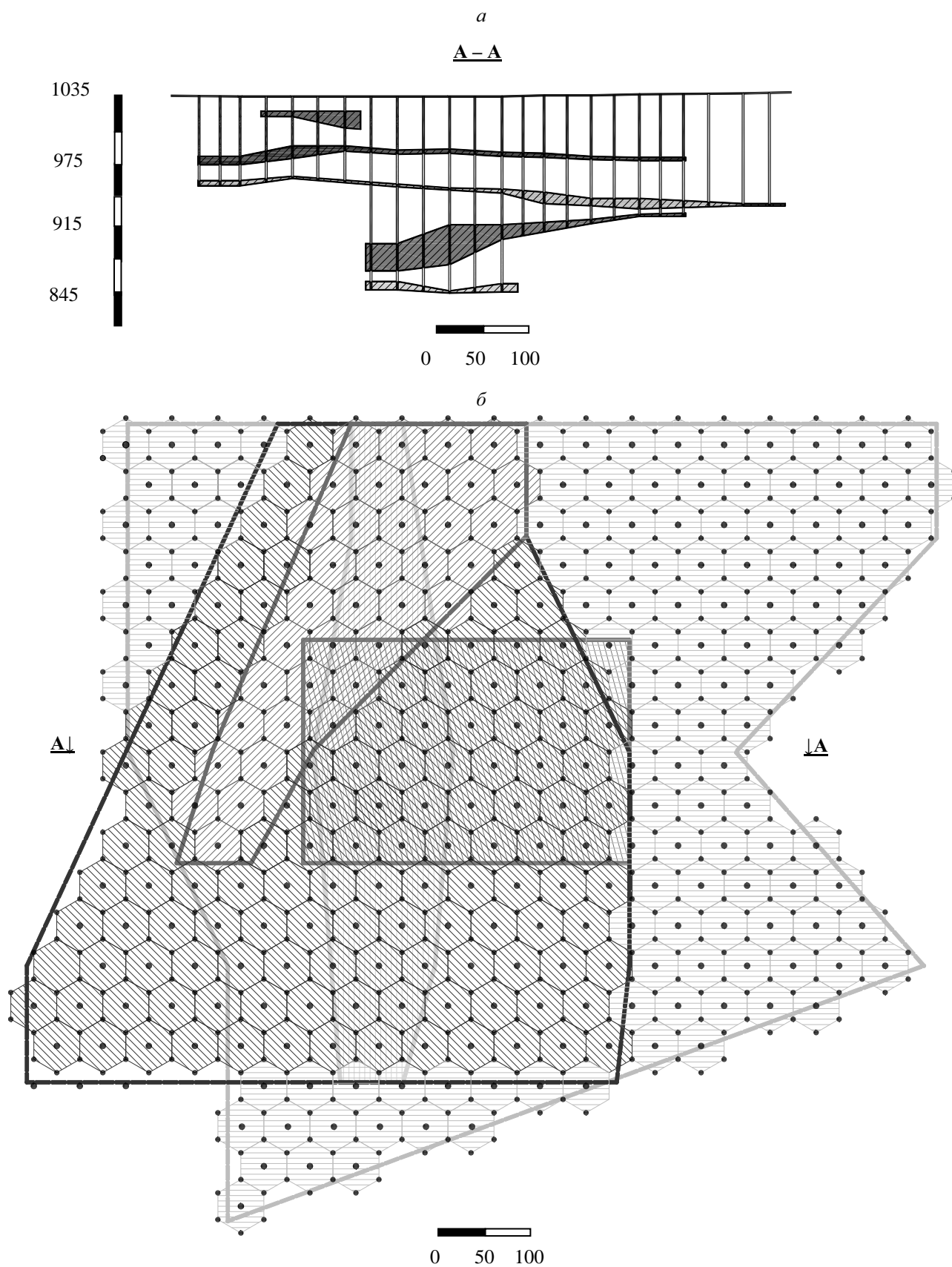


Рис. 3. Технологическая схема погоризонтного способа подготовки обособленных рудных тел месторождения „Ульзит“, представленная в разрезе А-А (а) и совмещенном плане (б): цвет рудного тела и скважин – №№ горизонтов: красный – 1; синий – 2; желтый – 3; сиреневый – 4; зеленый – 5

Совместная отработка обособленных рудных тел рациональна для условий слаженных залежей. Еще одним преимуществом данного способа является отсутствие обязательной цементации. Обоснованность применения данной схемы определяется тем, что мелкие кольцевые зазорные щели и присутствие в стволе скважин раствора из глины практически полностью исключают движение растворов по кольцевому зазору, которое происходит последовательно от одного фильтра к другому.

Наибольшая эффективность от применения групповых скважин будет достигнута с применением полиэтиленовых труб, которые можно опускать на глубину до 300 м с соединением стыков с помощью сварки. Также водовмещающие породы напрямую определяют тип и конструкцию фильтров. Химический и физический состав подземных вод также необходимо учитывать при выборе надлежащего типа фильтра и оборудования к нему. Необходимо обращать внимание на возможный срок службы фильтра и насосов [4].

В зависимости от изменчивости горно-геологических условий залегания рудных залежей и технологии ведения работ на рудниках подземного выщелачивания применяют различные схемы гидродинамического движения технологического раствора в продуктивной толще, а именно: пульсационно-статическую, фильтрационную и инфильтрационную схемы, а в отдельных случаях – комбинации этих схем. Пульсационно-статическая схема заключается

в периодическом заполнении выщелачивающим реагентом замкнутого объема руды с естественной или искусственно созданной проницаемостью с последующим выпуском продукционных растворов.

Проектирование и отработка блоков гидрогенных месторождений урана осуществляется, как правило, опытным путем, что не позволяет извлекать уран в полном объеме. Выбор параметров не формализован в соответствии с какими-либо документами. При отработке блоков контроль геотехнологических параметров не систематизирован по их числу и во времени, отсутствуют системные регламентирующие документы для регистрации и управления геотехнологическими параметрами на современной научной базе. По результатам исследований, представленным в работе [2], разработан и внедрен в производство типовой технологический регламент для автоматизированного проектирования и контроля геотехнологических параметров СПВ урана на рудниках НАК „Казатомпром“ (Казахстан), позволяющий системно и в адаптивном режиме управлять процессами СПВ урана. Для проведения расчета при проектировании 26 геотехнологических параметров по каждому обрабатываемому блоку предназначена созданная компьютерная автоматизированная система, состоящая из 11 блоков. На основании данной методики в программе MathCad нами были выполнены расчеты основных геотехнологических параметров для условий четырех рассмотренных месторождений Монголии, приведенные в таблице.

Таблица

Рекомендуемые технологические параметры добычи урана на месторождениях Монголии

Месторождение	„Хараат“, „Хайрхан“, „Гурван-Сайхан“	„Ульзит“
Параметр		
Радиус гексагональной ячейки, м	22,5 – 44,3	12,5 – 26,1
Дебит откачной скважины, м ³ /сут	121,0 – 196,3	41,7 – 84,3
Время закисления блока, сут	7,5 – 10,1	16,8 – 20,1
Время выщелачивания блока, сут	28,3 – 33,7	63,2 – 75,4
Содержание урана в растворе, мг/л	48,7 – 53,9	66,7 – 111,8

Анализ рекомендуемых технологических параметров показал, что они находятся в интервалах, соответствующих показателям отработки урановых руд в сходных геотехнологических условиях Казахстана, Узбекистана, России и Украины. Оценка снижения затрат при добыче урана методом СПВ выполнена на примере месторождения „Ульзит“, геотехнологические условия на котором более сложные по сравнению с месторождениями „Хараат“, „Хайрхан“, „Гурван-Сайхан“. Основные технико-экономические показатели разработки месторождения „Ульзит“, принятые к настоящему времени, следующие: общая сумма инвестиций по руднику – \$ 24,9 млн ; производственная мощность рудника по U₃O₈ – 117,8 т./год; прибыль от реализации продукции U₃O₈ – \$ 12,96 млн/год; текущие расходы рудника – \$ 5,09 млн/год; роялти за использование ресурсов недр – \$ 0,65 млн ; прибыль предприятия без учета налога – \$ 7,22 млн/год; подоходный налог за использование недр – \$ 1,42 млн

(до \$ 2,4 млн – 10%, а выше до \$ 3 млн – на 25% от полученного дохода); чистый доход предприятия после уплаты налогов – \$ 5,8 млн ; непрерывное время отработки месторождения – (50,4 мес.) 4,2 года.

В то же время рациональное использование скважин при погоризонтной отработке позволяет значительно сократить капитальные затраты. Расчеты проведены согласно параметрам гексагональных схем с оптимальным радиусом ячейки $R_o = 12,5-26,1$ м. Повышение экономической эффективности отработки месторождений достигается за счет использования одних и тех же скважин на разных горизонтах. Не требуется разбуривание дополнительных эксплуатационных скважин на тех участках рудных тел, которые накладываются друг на друга в горизонтальной проекции. При неизменной проницаемости рудных тел и вмещающих пород, на разных глубинах можно использовать ячейки с одинаковым радиусом. Такой подход позволяет резко сократить капитальные за-

траты, которые составляют существенную долю в себестоимости добычи.

Применение погоризонтного способа подготовки обособленных рудных залежей месторождения „Ульзит“ позволяет экономить до \$ 2,5 млн и до 63% сократить общее время отработки запасов.

Применение рационального радиуса добычной ячейки при гексагональной схеме расположения скважин для месторождений „Хараат“, „Хайрхан“, „Гурван-Сайхан“ позволяет экономить до \$ 0,9 млн для каждого месторождения, что составляет порядка \$ 17,8 тыс. /мес.

Выводы и перспективы развития направления.

Разработана численная модель выщелачивания урана для условий месторождения „Ульзит“ в Монголии с помощью программного обеспечения ModFlow. На ее основе определены параметры фильтрации продуктивных растворов, миграции урана и степень его извлечения.

Обоснован погоризонтный способ отработки обособленных рудных тел групповыми скважинами с изменяющимися диаметрами и глубиной заложения.

Определены параметры гексагональной схемы расположения скважин для подземного выщелачивания урана на примере месторождения „Ульзит“ в Монголии.

Выполнена технико-экономическая оценка эффективности отработки запасов урана с применением рационального радиуса добычной ячейки при гексагональной схеме расположения скважин на месторождениях „Хараат“, „Хайрхан“, „Гурван-Сайхан“.

На этой основе рекомендуется определять параметры отработки других гидрогенных урановых месторождений в Монголии. На первом отрабатываемом месторождении „Ульзит“ обоснована организация модульного добычного участка, на котором будет проводиться добыча урана, сорбция его на смолах с дальнейшим получением насыщенных растворов. Переработка растворов и получение готовой продукции в виде окиси-закиси урана планируется на месторождении „Хайрхан“, где рекомендуется построить завод по обогащению урана. Расстояние между участками месторождений „Ульзит“ и „Хайрхан“ составляет 420 км. Такая схема отработки месторождения с начальной производительностью 100 т./год, с дальнейшим увеличением до 200–300 т./год, представляется вполне рентабельной.

Список литературы / References

1. Khomenko, O.Ye. and Rudakov, D.V. (2010), “New techniques and technologies in mining”, *Scholl Underground Mining – 2010*, Proc. IV International scientific-practical conference, The first Ukrainian corporative university, CRC Press. Balkema, Netherlands, pp. 203–206.
2. Рогов А.Е. Математические основы геотехнологии: монография / А.Е. Рогов, Н.Б. Распанов. – Алматы, 2007. – 367 с.
- Rogov, A.E. and Raspanov, N.B. (2007), *Matematicheskie osnovy geotehnologii* [Mathematical

Foundations of Geotechnology], Monograph, Almaty, Kazakhstan.

3. Рудаков Д.В. Моделирование массопереноса радионуклидов в потоках подземных вод: монография / Рудаков Д.В. – Днепропетровск: Герда, 2010. – 160 с.

Rudakov, D.V. (2010), *Modelirovanie massopere-nosa radionuklidov v potokah podzemnykh vod* [Modeling of radionuclide mass transfer in groundwater flows], Monograph, Gerda, Dnepropetrovsk.

4. Крепление скважин: „Гидро-строй“ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://gidro-stroi-r.ru/water-supply/well-boring/methods-drilling-wells/konstrukciya-skvajiny/>

Well casing: “Hydro-system”, available at: <http://gidro-stroi-r.ru/water-supply/well-boring/methods-drilling-wells/konstrukciya-skvajiny/>

Мета. Обґрунтувати геотехнологічні параметри способу підготовки та схеми розробки гідрогенних уранових родовищ Монголії методом свердловинно-го підземного вилуговування.

Методика. Фізико-математичне моделювання міграції продуктивних розчинів при підземному вилуговуванні урану виконано методом скінчених різниць за допомогою спеціального програмного забезпечення Modflow (Schlumberger WS). Верифікація моделі проведена на основі зіставлення з натурними даними, урахування гідрогеологічних умов родовища „Ульзит“ у Монголії та необхідної точності розрахунків. Виконано інженерно-технічне обґрунтування погоризонтного способу відпрацювання родовищ з рудними тілами на різній глибині.

Результати. Побудована скінченно-різницева модель процесів вилуговування урану для умов гідрогенного родовища „Ульзит“ у Монголії за допомогою програмного забезпечення ModFlow. У результаті моделювання визначені параметри фільтрації продуктивних розчинів, відтворені зміни концентрації урану у блоках вилуговування, що дозволило оцінити динаміку його вилучення відкачними свердловинами. Обґрунтований погоризонтний спосіб відпрацювання відокремлених рудних тіл груповими свердловинами зі змінними діаметрами та глибиною закладення, що дозволяє відокремити відпрацьовуванні горизонти один від одного. За допомогою програмного продукту MathCad визначені параметри гексагональної схеми розташування свердловин для родовищ Монголії. Виконана оцінка фінансових витрат при видобутку урану на прикладі родовища „Ульзит“. Застосування погоризонтного способу підготовки відокремлених рудних покладів дозволяє заощадити до \$ 2,5 млн і до 62% скоротити загальний час відпрацювання запасів. Застосування раціонального радіусу добувної комірки при гексагональній схемі розташування свердловин на родовищах „Хараат“, „Хайрхан“, „Гурван-Сайхан“ дозволяє заощадити до \$ 0,9 млн.

Наукова новизна. Полягає у підвищенні ефективності розробки уранових родовищ Монголії за рахунок застосування погоризонтного способу підготовки

відокремлених покладів груповими свердловинами, розміщеними за гексагональною схемою.

Практична значимість. Полягає в обґрунтуванні параметрів гексагональної схеми розташування свердловин при підземному вилуговуванні урану в умовах родовищ Монголії на основі врахування зміни у часі концентрації урану у продуктивному розчині. Удосконалена методика розрахунку геотехнологічних параметрів відпрацювання родовищ урану методом свердловинного підземного вилуговування на основі моделювання міграції продуктивних розчинів у блоках, що відпрацьовуються. Запропонований ресурсозберігаючий спосіб підготовки відокремлених рудних тіл з суміщенням свердловин при різних діаметрах і конструкції фільтрів.

Ключові слова: *вилуговування урану, фільтрація продуктивних розчинів, погоризонтний спосіб підготовки, гексагональна схема розробки, економічна ефективність*

Purpose. To justify the geotechnical parameters for preparation mode and schemes of development of hydrogenic uranium deposits in Mongolia by the underground in-situ leaching method.

Methods. Physical and mathematical modeling of leachates during in-situ leaching of uranium have been carried out by the finite difference method using software Modflow (Schlumberger WS). The model was verified through comparison with the field data, taking into account hydrogeological conditions of the "Ulzit" deposit in Mongolia and necessary precision of calculations. Engineering and technical foundation of by-layer approach for mining deposits with ore bodies on different depths has been made.

Results. A finite-difference model of uranium leaching for the conditions of hydrogenic deposit "Ulzit" in Mongolia has been developed using the special software Modflow. As a result of modeling the parameters of leachate flow have been evaluated; the changes of urani-

um concentration in mining blocks were reproduced, which enabled estimating the dynamics of its extraction by pumping wells. The by-layer approach for mining separated ore bodies by grouped wells of changing diameters and depth has been justified; it allows keeping the mined out horizons separated. The parameters of the hexagonal pattern for placing wells for deposits of Mongolia have been evaluated using the MathCad software. The financial expenses for mining uranium are estimated on the example of the "Ulzit" deposit. Application of the by-layer approach for preparing separated ore bodies enables saving of up to \$ 2.5 million and reducing of up to 62% of the total time to be spent for mining of reserves. The use of sustainable mining cell radius at the location according to the hexagonal pattern of wells at the "Haraat", "Khairkhan", and "Gurvan-Saykhan" deposits allows to save up to \$ 0.9 million.

Originality. Increasing efficiency of mining uranium deposits of Mongolia through applying the by-layer approach for preparation of separated ore bodies using the wells placed by hexagonal pattern.

Practical value. Justification of parameters of hexagonal pattern of wells location in underground leaching of uranium under the conditions of Mongolia deposits accounting for the time variations of uranium concentration in leachates. The method for calculation of geotechnical parameters of mining uranium deposits using in-situ leaching based on modeling of leachate flow in mined out blocks has been modified. A resource-saving way to prepare separate ore bodies combining the wells of different diameters and filter designs has been proposed.

Keywords: *uranium leaching, leachate flow, by-layer approach of preparation, hexagonal pattern design, economic efficiency*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук І.О. Садовенком. Дата надходження рукопису 15.01.13.