

## **ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МОНГОЛИИ МЕТОДОМ СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ**

Приведены результаты промышленных, лабораторных и теоретических исследований по обоснованию геотехнологических параметров разработки гидрогенных месторождений урана в Монголии. Предложен погоризонтный способ подготовки обособленных залежей на различных глубинах и обосновано рациональные расстояния между закачных и откачными скважинами. Оценены результаты внедрения технологических решений по обрабатываемым месторождениям урана.

Наведено результати промислових, лабораторних і теоретичних досліджень з обґрунтування геотехнологічних параметрів розробки гідрогенних родовищ урану в Монголії. Запропоновано погоризонтного спосіб підготовки відокремлених покладів на різних глибинах та обґрунтовано раціональні відстані між закачними і викачними свердловинами. Оцінені результати впровадження технологічних рішень по розроблюваним родовищам урану.

The results of industrial, laboratory and theoretical studies to validate the parameters for geotechnical hydrogenic uranium deposits in Mongolia. We propose a method of preparing a separate horizontal deposits at various depths and reasonable rational distance between wells. Evaluated the results of the introduction of technological solutions of the deposit of uranium.

Глобальный мировой кризис усилил изменение мировых энергетических ориентиров в сторону ядерного топлива. Сегодня уран превратился в стратегический продукт глобальной экономики, на долю которого приходится выработка более 15% электроэнергии в мире. Преодоление растущего глобального дефицита энергии напрямую зависит от развития атомной энергетики во всем мире. Ежегодный рост добычи урана происходит на фоне исчерпания его дополнительных источников – утилизированных в США и России боеголовок. Анализ мирового потребления урана для производства электроэнергии на АЭС показал, что до 2025 г. мощность ядерной энергетики будет находиться в интервале 450 (+22%) – 530 (+44%) ГВт и приведет к ежегодному потреблению урана на уровне 80 – 100 тыс. т. При условии использования в урановом цикле только тепловых реакторов, дефицит урана возникнет в 2050 г. Коренное изменение сложившейся ситуации может произойти только с внедрением быстрых реакторов-размножителей, которые сделают рентабельной добычу урана из бедных и мелких месторождений.

Разведка месторождений урана интенсивно ведется в Северной и Южной Америке: Канада – 21 месторождение, Гренландия и Мексика по 1, США – 35, Бразилия – 4, Аргентина – 2; Европе: Швеция, Германия, Польша и Франция по 1, Чехия – 5, Румыния и Испания по 2, Украина – 5; Азии: Россия – 16, Казахстан – 16, Узбекистан – 15, Монголия – 3, Китай – 11, Южная Корея и Индия по 1; Африке: Марокко – 4, Алжир – 3, Нигер – 12, Камерун, Танзания, Малави, Мадагаскар, ЦАР по 1, Сомали и Замбия по 2, Намибия и ЮАР по 12;

Австралии – 22. Мировые разведанные запасы урана (без учета Монголии) составляют более 5 млн т, в т.ч. Австралия 1 234, Казахстан 817, Россия 548, ЮАР 435, Канада 423, США 342, Бразилия 278, Намибия 275, Нигер 274, Украина 200 тыс. т и др. Интенсивная эксплуатация месторождений урана производится в Канаде – 21 месторождение, США – 35, Бразилии – 4, Швеции – 1, Чехии – 5, Румынии – 2, Украине – 3, России – 16, Казахстане – 16, Узбекистане – 15, Китае – 11, Индия – 1, Нигере, Намибии и ЮАР по 12, Австралии – 22. Разведанные запасы урана в Монголии составляют 1475,0 тыс. т, благодаря которым страна войдет в число 10 богатейших стран мира с занятием лидирующих позиций (3 – 5 место) среди стран-обладателей уранового сырья. Значительный объем разведанных и подготовленных к разработке запасов обеспечит быстрый ввод месторождений в интенсивную эксплуатацию.

Анализ современных способов интенсификации добычи урана в научно-технических, проектно-исследовательских и интернет-ресурсных источниках показал, что относительно дешевое производство урана на уровне \$ 35 за кг возможно только компаниями, эксплуатирующими два типа месторождений. Это объекты «несогласий» Канады и гидрогенные месторождения Австралии, Узбекистана, Казахстана и России, или при попутной добыче на месторождениях Южной Африки. Существующий мировой опыт эксплуатации урановых месторождений методом скважинного подземного выщелачивания (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 опускается ниже  $-50^{\circ}\text{C}$ . 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.

В результате выполненного анализа потребления урана на мировом рынке, месторождений и запасов, способов интенсификации и объемов добычи, сформирована научно-практическая задача по повышению интенсивности отработки гидрогенных месторождений урана в Монголии в условиях сезонного ведения работ. Обоснование путей интенсификации и методов концентрации горных работ на указанных 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].

Бурение вскрывающих скважин являлось основным видом промышленных исследований, применяемых на месторождениях урана гидрогенного типа Монголии. Шаг в профиле между скважинами определялся масштабами и характером развития оруденения и составлял 800 – 400 м со сгущением в благо-

приятной ситуации до 200 – 100 – 50 м. Основным критерием определения глубины бурения являлось развитие окислительных процессов. Вследствие этого скважины бурились на глубину 150 – 250 м, иногда до 300 м. Буровые работы выполнялись совместно с двумя монгольскими буровыми компаниями. Компания «Ord Geo» производила бурение на Ульзитинском месторождении, компания «Tanap Imprex» последовательно выполняла работы на Хайрханском, Гурван-Сайханском и Хараатском месторождениях. Совместно с компанией «Denison mines Mongolia» выполнены исследования на уран в Гобийском районе Монголии. Работы проводились совместном Монголо-Российско-Американским предприятием «Гурван-Сайхан».

Параметры вскрытия месторождений показывают, что они имеют идентичную природу происхождения. Это определяет сходный вид месторождений, геологическую структуру и состав вмещающих пород. Помимо этого, в одних рамках находятся параметры рудных тел, которые имеют типичный для гидротермальных месторождений урана вид и форму (горизонтальные, ленто-, чечевице-, слоевые и гнездообразные тела, роллы), размеры (200 – 4000 м) и среднее содержание урана (0,036 – 0,066%). Также установлено, что все рудные залежи расположены в водонасыщенном слое, который характеризуется следующими условиями: водопроницаемость 0,2 – 370 м<sup>2</sup>/сут, коэффициент фильтрации 0,1 – 10 м/сут, минерализация 0,7 – 7,0 г/л. Анализ параметров вскрытия месторождений «Хараат», «Хайрхан», «Гурван-Сайхан» более благоприятен, чем для «Ульзит». Это говорит о том, что технологические параметры по этим двум группам месторождений будут отличаться, и их обоснование должно выполняться отдельно [2].

Лабораторные исследования являются одним из основных этапов научно-исследовательских работ по определению вещественного состава и свойств горных пород, которые выполнены на примере месторождения «Ульзит». Основной объем лабораторных работ приходился на обработку 359 керновых проб обработанных в различных лабораториях Монголии, Канады и России. Все пробы были обследованы высокоточными методами в лаборатории «ActLabs» (Канада). 43 пробы были проанализированы для контроля качества в специализированной лаборатории ГП «Сосновгеология» (Россия). Также для 44 проб проведен анализ рентгено-флуоресцентным методом, а также изучение химического и минералогического составов рудовмещающих пород, их физико-механических свойств в центральной геологической лаборатории Монголии.

По результатам геохимических исследований радиологических свойств установлено наличие элементов-спутников урана и их концентрация в рудах. Установлено, что при добыче урана методом подземного выщелачивания потребуются дополнительное использование окислителей. Эксперименты, выполненные при лабораторном опыте выщелачивания, показали возможность стабильного и динамичного процесса извлечения урана при непрерывной подаче техногенного окислителя (перекиси водорода) со средней концентрацией 0,06 г/л, либо природного окислителя – трехвалентного железа. Анализ динамики выщелачивания урана при концентрации кислоты в растворе от 5 до 20 г/л поз-

волил вывести экспоненциальную зависимость с кинетическим параметром  $a$ . По результатам лабораторных опытов выщелачивания, закисление массива руды при добыче урана рекомендуется проводить растворами с концентрацией кислоты 10 – 15 г/л, а выщелачивание – растворами с концентрацией кислоты 8 – 12 г/л. Для интенсификации выщелачивания необходимо увеличить время взаимодействия рабочих растворов с горной массой, что можно достичь увеличением расстояния между скважинами до 25 – 50 м при достаточной проницаемости массива рудных залежей [3].

Теоретическое моделирование выполнялось с помощью физико-математических исследований, включающих формирование модели миграции продуктивных растворов с помощью метода конечных разностей. Алгоритм конечно-разностного решения дифференциального уравнения фильтрации в горных породах положен в основу программного обеспечения «ModFlow», (Schlumberger W.S.) используемого для исследования процесса движения продуктивных растворов при подземном выщелачивании урана. При задании границ области миграции учитывалось, что гидродинамическое и физико-химическое воздействие на массив ураноносных песчаников невысокой проницаемости ограничено пределами рудных тел и небольшой приконтурной зоной вокруг них шириной 30 – 40 м. Для корректного отображения в модели гидродинамической изолированной области миграции ее границы расположены на удалении не менее 200 м от контура самого широкого рудного тела 3 месторождения «Ульзит». Такая схематизация при составлении модели допустима при замедленном водообмене, слабом естественном потоке подземных вод и низкой инфильтрации, характерных для пустынной территории месторождения «Ульзит».

Учитывая малую мощность проницаемых пород, отсутствие выдержанных водоупорных слоев, весь отработываемый ураноносный массив песчаников моделировался как единый комплекс. При расчетах были приняты следующие исходные данные: 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. 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 [4].

Теоретические исследования процессов интенсификации при выщелачивании урана. Помимо выполненных промышленных и лабораторных исследований, был выполнен анализ параметров проницаемости горных пород и химического состава подземных вод. Установлено, что породы рудоносных горизонтов месторождения «Ульзит» характеризуются проницаемостью, изменяющейся от малых (0,1 м/сут.) до средних значений (>10 м/сут.). Проводимость водовмещающих пород невысокая, обычно до 25 м<sup>2</sup>/сут, в отдельных случаях более 50 м<sup>2</sup>/сут. Уровни подземных вод на месторождении, в зависимости от формы рельефа, находятся на глубине 1,4 – 7,5 м с абсолютными отметками 1076 – 1078 м. Химический состав подземных вод месторождения имеет одно-

типный вид. Это хлоридно-сульфатные, магниевые-натриевые, реже натриевые воды с минерализацией 3 – 5 г/л, с нейтральной, слабощелочной средой. Общая жесткость воды колеблется от 7,5 мг-экв/л 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. 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 содержание урана в воде составляет  $(3 - 5,4) \cdot 10^{-5}$  г/л, в верхнем горизонте содержания более высокие –  $(1 - 3) \cdot 10^{-4}$  г/л.

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 находиться за пределами рудного тела. Средняя концентрация урана в извлекаемом растворе при отработке колеблется от 30 до 80 мг/л, что при суммарном объеме откачанных растворов обеспечивает извлечение 9 – 10 т урана с рудного тела 1. Это соответствует 74% извлечения урана. Миграция кислотного раствора и растворенного урана в отрабатываемом массиве в условиях залегания рудного тела 1 месторождения «Ульзит» на площади до 60 0000 м<sup>2</sup> (6 га) в интервале отметок 840 – 1020 м носит трехмерный характер. С учетом технологических возможностей предполагается последовательная нисходящая отработка рудных тел 1, 2, 3, 4 и 5 на данном участке по блокам, состоящих из гексагональных ячеек. Расположенное сверху в интервале отметок 1010 – 1020 м рудное тело 1 предлагается отрабатывать по 4 блокам, каждый из которых состоит из 9 ячеек. Применение гексагональной схемы позволит рационально расположить скважины на участке и использовать их на нескольких горизонтах отработки. Для рудного тела 1 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 [5].

В результате выполнения теоретического моделирования определены уровни и направления движения подземных вод при отработке рудного тела 1 месторождения «Ульзит». При отработке 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. 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 находиться за пределами рудного тела. Средняя концентрация урана в извлекаемом растворе при отработке колеблется от 30 до 80 мг/л, что при суммарном объеме откачанных растворов обеспечивает извлечение 9 – 10 т урана с рудного тела 1. Так же в разделе даны инженерные мероприятия по физико-химической активизации участков кислотного реагирования и недопущения образования из-

вестковых растворов с последующим изменением кислотности подземных растворов.

Далее выполнено обоснование технологических параметров разработки урановых месторождений методом СПВ. Предлагаемый погоризонтный способ подготовки месторождения характеризуется высокой степенью концентрации горных работ за счет применения групповых скважин, а не проведения новых для каждого рудного тела. Конструкция групповых скважин позволяет поитервально обрабатывать несколько рудных тел, колонны которых состоят из сальник-зонтов, фильтров, промывочных окон, цементных труб и сальников. Обработку обособленных рудных тел проводят в зависимости от мощности и проницаемости безрудных промежутков отдельно друг от друга и совместно, сверху вниз и снизу вверх, что позволяет отделить каждый горизонт закисления от остальных. 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 жидкости по кольцевому зазору, которое происходит последовательно от одного фильтра к другому. Наибольшая эффективность 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, а также 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, соответственно, насосов.

Параметры гексагональной схемы расположения скважин по результатам моделирования были обоснованы расчетным путем по методике НАК «Казатомпром», которая была адаптирована к условиям отработки месторождений Монголии. В программе «MathCad» были выполнены расчеты основных геотехнологических параметров. Анализ рекомендуемых технологических параметров показал, что они находятся в интервалах, соответствующих показателям отработки урановых руд в сходных геотехнологических условиях Казахстана, Узбекистана, России и Украины. Также были обоснованы инженерные мероприятия, предупреждающие кольматацию фильтров и прифильтровых зон скважин.

Таблица

Рекомендуемые технологические параметры добычи урана

Месторождение	«Хараат», «Хайрхан», «Гурван-Сайхан»	«Ульзит»
Параметр		
Радиус гексагональной ячейки, м	22,5 – 44,3	12,5 – 26,1
Дебит откачной скважины, м <sup>3</sup> /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

Отработка месторождения «Ульзит» должна предусматривать организацию 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 оксидной закиси урана планируется на месторождении «Хайрхан», где будет работать 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 [5].

Оценку сокращения затрат при добыче урана методом СПВ выполнено на примере месторождения «Ульзит», геотехнологические условия на котором более сложные, по сравнению с месторождениями «Хараат», «Хайрхан», «Гурван-Сайхан». Для месторождения «Ульзит» перекрываемые площади горизонтальных проекций рудных тел 1 и 3 составляют от 60000 до 360300 м<sup>2</sup>. С общим значением перекрытия площадей, равным 63%. При этом, минимальная густота расположения скважин 0,002 м<sup>-2</sup> при радиусе добычной ячейки  $R_0 = 25$  м, расстояния по вертикали между рудными телами от 20 до 150 м. Наибольшая экономия достигается при бурении скважин до самых глубоких рудных тел 4 и 5. Согласно выполненным расчетам, сокращение расходов на бурение (\$ 50 п.м) за счет совмещения скважин составит \$ 2,508 млн. Применение погоризонтного способа подготовки обособленных рудных залежей месторождения «Ульзит» позволяет сэкономить 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 сэкономить до \$ 0,9 млн. для каждого месторождения, что составляет порядка \$ 17,821 тыс. мес.

#### Список литературы

1. Жанчив Б. Современное состояние и тенденции развития урановой отрасли Монголии / Б. Жанчив, О.Е. Хоменко, Л. Ценджав / Школа підземної розробки: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. – Ялта: Арт-Пресс, 2011. – С. 122 – 125.
2. Жанчив Б., Хоменко О.Е., Рудаков Д.В., Ценджав Л. Геотехнологические параметры вскрытия гидрогенных месторождений урана в Монголии // Зб. наук. праць НГУ, Д.: РВК НГУ, 2013. – № 40. – С. 63 – 69.
3. Ценджав Л. Обоснование параметров выщелачивания урана для гидрогенных месторождений Монголии / Л. Ценджав // Зб. наук. праць НГУ, Д.: РВК НГУ, 2013. – № 41. – С. 30 – 36.
4. Хоменко О.Е., Ценджав Л. Исследование условий залегания, состава и свойств урановых месторождений Монголии / О.Е. Хоменко, Л. Ценджав // Форум гірників: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. – Д.: РВК НГУ, 2012. – Т. 3. – С. 120 – 125.
5. Жанчив Б., Рудаков Д.В., Хоменко О.Е., Ценджав Л. Обоснование параметров разработки урановых месторождений Монголии // Науковий вісник НГУ. – 2013. – № 4. – С. 28 – 35.