

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА СПОСОБОМ ПОДЗЕМНОГО  
СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ**

**Т. К. Ченсизбаев**

Казахский национальный технический университет  
им. К. И. Сатпаева

---

В статье приведены результаты мониторинга за состоянием пластовых вод участков месторождений после подземного скважинного выщелачивания урана. Установлены сроки самонейтрализации и принудительной нейтрализации рудоносных горизонтов.

**Ключевые слова:** подземное скважинное выщелачивание, уран, принудительная нейтрализация рудоносных горизонтов.



Мақалада жерасты ұңғылап сілтілеу әдісімен уран өндірілген кен орындарындағы жер асты қабаттық сулардың күйін мониторингтеу нәтижелері келтірілген. Кен қабаттарындағы жер асты суларының өз еркімен және еріксіз табиғи тепе-теңдік қалпына келетін мерзімдері белгіленген

**Түйінді сөздер:** жерасты ұңғылап сілтілеу (шаймалау), уран, кен қабаттарын еріксіз бейтараптандыру.



Provide monitoring results of the reservoir waters of field sites after in-situ leaching of uranium. Timing for self-neutralization, and forced neutralization of the ore-bearing horizons are established.

**Key words:** in-situ leaching, uranium, forced neutralization of the ore-bearing horizons.

Разработка пластово-инфильтрационных урановых месторождений способом ПСВ по сравнению с традиционными горными способами в значительной степени уменьшает вред, наносимый окружающей среде, и имеет свои отличительные особенности.

С позиций вероятности внесения нарушений в окружающую среду метод ПСВ характеризуется следующими особенностями:

1. Все производственные операции осуществляются на месте залегания руд без проведения значительных горно-капитальных работ, т. е. при отработке месторождений скважинными системами какие-либо механические нарушения горных пород вообще отсутствуют.

2. Существенные нарушения земной поверхности, а именно отвалов руд и пустых пород, хвостохранилищ, способствующих возникновению радиационно-опасного пылеобразования и т.д., отсутствуют.

3. Процесс ПСВ осуществляется в безотходном замкнутом цикле, основанном на соблюдении баланса между объемами (расходами) закачиваемых и откачиваемых растворов. При этом в недрах формируется замкнутый гидродинамический контур, препятствующий сообщению этой области с периферией. В границах этого контура и реализуется процесс ПСВ, а за его пределами в этот период любая фильтрация растворов исключена. Таким образом, область гидродинамических нарушений природных равновесий при ПСВ строго локализована.

4. Процесс сернокислотного ПСВ вносит достаточно глубокие изменения в химический состав подземных вод в контурах гидродинамических нарушений (как в областях ПСВ, так и в ореолах остаточных растворов), вызывая резкое увеличение (в десятки раз) общей минерализации, содержания сульфатов, хлоридов, гидрокарбонатов, алюминия, железа, нитратов, многих микроэлементов и радионуклидов (на 1-3 порядка). Вместе с тем эти нарушения имеют относительно кратковременный характер с ограничением времени реализации ПСВ.

При скважинном выщелачивании основному воздействию подвергается подземная часть локальной экосистемы, которая представляет собой рудный горизонт и, следовательно, решение основных природоохранных проблем находится в сфере геоэкологии.

Техногенные изменения геологической среды при ПСВ происходят в результате подачи в рудоносные водоносные горизонты технологических растворов кислот или щелочей и выщелачивания ими из вмещающих пород главных (породосоставля-

ющих) и второстепенных элементов. В области прямого техногенного воздействия в зависимости от мощности рудоносного горизонта происходит полное или частичное замещение природных вод технологическими растворами. В результате в недрах формируются техногенные воды сложного химического состава со специфическими, резко отличающимися от природных, физико-химическими свойствами. Они содержат большое число компонентов, концентрация которых многократно превышает их природный уровень. Поэтому решение вопросов реабилитации отработанных блоков является актуальной задачей.

Вместе с этим природные геоэкологические условия пластово-инфильтрационных месторождений, под которыми понимают целую группу факторов, способствуют изоляции таких техногенных вод в водоносных горизонтах урановых рудных залежей. Надежность такой изоляции обеспечивается благоприятными геоструктурными, литолого-фациальными, геохимическими, гидродинамическими и другими природными факторами.

Влияние геоструктурных факторов наряду с литолого-фациальными отражается на структуре ореола техногенных вод, образующихся в недрах в процессе ПСВ. Изолирующая роль литолого-фациального фактора чрезвычайно важна. Она проявляется в главном аспекте - обязательном наличии подстилающих и в меньшей степени перекрывающих сплошных без фациальных и эрозионных "окон" водоупорных отложений, обладающих достаточной мощностью для того, чтобы обеспечить изоляцию технологических растворов в вертикальном разрезе гидрогеологической структуры. Самыми надежными применительно к широко используемым сернокислотным схемам ПСВ являются водоупорные толщи из пластичных каолиновых и гидрослюдистых глин, устойчивых в кислой среде, а также обладающих одновременно нейтрализующей способностью.

Геохимические изолирующие свойства геологической среды проявляются через нейтрализационную, восстановительную, ионно-обменную и сорбционную емкости терригенных отложений. Существенно также наличие определенного видового состава и биологической активности естественной подземной мик-

рофлоры. Эти свойства среды являются главной предпосылкой к возникновению соответствующих геохимических барьеров, сдерживающих распространение растворенных веществ в рудоносном водоносном горизонте.

В процессе подземного выщелачивания в зоне действия сернокислых растворов происходит разрушение природной эпигенетической геохимической зональности и формирование новых контрастных окислительно-восстановительных барьеров. Границы их приобретают конфигурацию ореолов техногенного окисления. На этих барьерах осаждаются как остаточные компоненты рудного тела, так и элементы ореола, переведенные в растворенное состояние.

В этой же полосе снижения величины  $pH$  за счёт выпадающих в осадок растворённых элементов, где главными являются гидроксиды железа и алюминия, формируется так называемый кольматационный барьер. На этом барьере за счёт уменьшения порового пространства значительно снижается фильтрационная способность песков водоносного горизонта.

Ранее считалось, что ореолы техногенных растворов постепенно перемещаются по направлению потока подземных вод, а растворенные элементы, вступая в контакт с неизменными породами, осаждаются и таким образом происходит постепенная их очистка. Исследования, проведенные автором на некоторых месторождениях Казахстана, а также данные опытно-промышленных испытаний на узбекистанском месторождении Южный Букинай, свидетельствуют о том, что существенной миграции линзы остаточных растворов не происходит. Именно ухудшение фильтрационных свойств за счёт образования комплекса вышеназванных барьеров приводит к тому, что естественный поток, имея слишком малые скорости движения, не может разрушить сформированный замкнутый контур и обтекает заключённую в нём линзу техногенных растворов по периферии, не смещая её по направлению собственного движения. Таким образом, за счёт перечисленных факторов сначала область активного выщелачивания, а впоследствии остаточный техногенный ореол оказываются надёжно изолированными. При этом есте-

ственный региональный поток подземных вод практически не внедряется в эту область, что, с одной стороны, является благоприятным фактором, препятствующим миграции ореола вниз по потоку, а с другой - причиной экстенсивности процесса самоочищения подземных вод [2, 6].

Масштабность экологического воздействия ПСВ на геологическую среду зависит от размеров рудных залежей и запасов главного полезного компонента - урана. При этом внимание уделяется не только содержанию урана в растворах, но и концентрации продуктов его естественного радиоактивного распада, особенно тем из них, которые обладают высокой миграционной способностью и низкими значениями предела допустимых концентраций (ПДК). В основном это радон, радий, свинец-210, ионий и полоний.

В процессе работы полигонов ПСВ производство даёт небольшое количество твёрдых радиоактивных отходов. Это минеральные остатки продуктов переработки, шламы, утилизируемая спецодежда, загрязненное оборудование и т.д. Твёрдые радиоактивные отходы подлежат захоронению в спец. могильнике или переработке на ГМЗ с последующим сбросом в хвостохранилища. Содержание урана в отходах составляет 6-200 мг/кг при фоне 3,7 мг/кг, радия  $8,2 \times 10^{-6}$  -  $45 \times 10^{-6}$  мг/кг при фоне  $3,2 \times 10^{-6}$  мг/кг. Концентрация тория изменяется от  $0,8 \times 10^{-9}$  до  $1,2 \times 10^{-9}$  Ки/кг при фоне  $0,9 \times 10^{-9}$  Ки/кг. Общее содержание солей составляет 8-40 г/кг при фоне 2 г/кг.

Таким образом, исходя из особенностей эксплуатации пластово-инфильтрационных месторождений урана способом подземного выщелачивания, можно заключить, что обеспечение экологической чистоты поверхностного комплекса ПСВ не представляет особых сложностей, а основное внимание исследований должно быть сосредоточено на решении вопросов геоэкологии пластовых вод.

Подземное скважинное выщелачивание, как уже указывалось, связано с введением в продуктивный водоносный горизонт химических реагентов и поэтому непременно сопровождается изменением гидрохимической обстановки подземных вод в рай-

оне действия технологических скважин. В особенности оно значительно при использовании растворов серной кислоты, когда резко снижается  $pH$  среды (с 7-8 до 1-2) и выщелачиванию помимо урановых подвергаются и другие минералы. В первую очередь это относится к карбонатам (в особенности кальциевым), в меньшей мере - к глинистым минералам, сульфидам, слюдам, полевым шпатам и др. Наиболее устойчив к выщелачиванию кварц [7].

Таким образом, основная операция при извлечении урана из руд - выщелачивание - определяет состав получаемых продуктивных растворов. При сернокислотном ПСВ на дальнейшую операцию сорбции урана поступают сернокислые растворы, общий компонентный состав которых определяется продуктами сложного химического взаимодействия рудных минералов и вмещающих пород с выщелачивающим реагентом. Одновременно состав продуктивных растворов зависит и от применяемого метода десорбции урана, так как при контакте ионообменной смолы с технологическим раствором происходит вытеснение анионов элюента, например нитрат-ионов при нитратной схеме десорбции.

При сернокислотном выщелачивании в продуктивный раствор переходят уран, большая часть первоначально находившихся в породе кальция и магния, до 10 % железа и около 5 % алюминия. В таких растворах фиксируются устойчивые содержания марганца (130-300 мг/л), магния (400-600 мг/л), алюминия (50-1500 мг/л), кальция (500-600 мг/л), железа (II) до 1000 мг/л, железа (III) до 450 мг/л, SiO радионуклидов и микроэлементов Zn, Cu, Ni, Se, Be, V, Co, Ti, Cr и т.д.

Содержание в песчано-глинистых отложениях твердых компонентов, продуцирующихся в технологические растворы, обычно составляет (в процентах):  $Al_2O_3=4,8-6,9$ ;  $MnO=0,1-0,2$ ;  $CaO=0,5-1,0$ ;  $MoO=0,2-0,9$ ;  $FeO=0,2-0,5$ ;  $FeO=0,7-1,5$ ;  $Cu(II)=0,01$ ;  $Zn=0,005$ ;  $Co=0,006-0,01$  и т.д.).

Общая минерализация растворов в центральной части техногенного ореола определяется также и концентрацией закачи-

ваемого реагента, составляющая при сернокислотном выщелачивании обычно 7-20 г/л. К периферии ореола она снижается и достигает фоновых значений. Величина  $pH$  изменяется от нейтральных значений на границе ореола до 1-2 в средней его части [7,8].

При работе участков ПСВ в сбалансированном режиме граница ореола технологических растворов определяется положением внешних линий их тока, которые выходят из крайних закачных скважин, огибают участок с флангов и подходят к боковым откачным скважинам. Значительного его распространения при правильной работе полигонов обычно не бывает за счет стабилизирующегося во времени гидродинамического режима участка. Также этому способствует заметное снижение проницаемости пород по границам ореола, где выпадает в осадок большинство растворённых в процессе компонентов. Максимальное удаление границы техногенного ореола от геометрического контура промышленного участка, например с сетью скважин 25x50 м, составляет около 50-80 м.

Таким образом, на промышленных полигонах ПСВ размер техногенного ореола определяется в первую очередь площадью обрабатываемой рудной залежи. Нарушение баланса растворов в сторону откачки над закачкой, или наоборот, незначительно уменьшает или увеличивает его размеры в пределах  $\pm 50$  м.

Основными характеристиками природной геохимической среды являются  $pH$ ,  $Eh$ , общая минерализация, её характер и содержание микрокомпонентов в подземных водах. Это основные нормируемые показатели, на основании которых воды разделяются по назначению на питьевые, хозяйственно-бытовые, промышленные, лечебные и т.д.

При этом известно, что подземные воды вблизи и в пределах контуров урановых залежей и фронтального окончания зон пластового окисления изначально содержат повышенные концентрации Ra-226, Po-210, Th-230, Pb-210 и не пригодны для питьевого водоснабжения по ряду показателей. По сумме растворённых солей они в большинстве случаев солоноватые или

солёные, а в связи с эпигенетическими процессами формирования урановых полиэлементных рудных залежей всегда содержат экологически опасные концентрации стабильных элементов (селен, мышьяк, бром, фтор, железо, марганец, хром, ванадий и молибден). Поэтому участки водоносных горизонтов артезианских бассейнов в областях размещения ураново-рудных тел и примыкающих к ним зон пластового окисления должны исключаться из запасов хозяйственного пользования [6].

Таким образом, развитие уранодобывающей промышленности Казахстана связано с разработкой месторождений региональных зон пластового окисления Шу-Сарысуской и Сырдарьинской ураново-рудных провинций способом подземного скважинного выщелачивания.

Подземное выщелачивание является наиболее экологически чистым способом добычи урана. Основным источником негативного воздействия на геологическую среду при этом являются остаточные растворы выщелачивания отработанных блоков ПСВ, локализованные на какое-то время в подземных водах.

#### Литература

1. *Рогов Е. И., Язиков В. Г., Забазнов В. Л., Петров Н. Н., Рогов А. Е.* Геотехнология урана на месторождениях Казахстана. - Алматы, 2001. - 444 с.
2. *Абдильманов И. Г., Забазнов В. Л., Фазлуллин М. И., Фарбер В. Я.* Геоэкология подземных вод при отработке урановых месторождений методом сернокислотного подземного выщелачивания. - М.: МГРИ.- 1996. - 131 с.
3. Учебно-методическое руководство по радиоэкологии и обращению с радиоактивными отходами для условий Казахстана. - Алматы: Волковгеология, 2002.
4. Радиационная безопасность. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). - Вена, 1996.



5. Язиков В. Г. Атомная промышленность Казахстана: текущая ситуация и стратегия развития // Актуальные проблемы отработки урановых месторождений методом подземного выщелачивания: Сб. докл. науч.-практ. конф. - Алматы, 2000. - С. 3-7.

6. Подземное выщелачивание полиэлементных руд / Под ред. Н.П. Лаверова. - М.: Акад. горных наук, 1998. - 446 с.