

Блынский П.А. *, Панова Е.Н., Жаксыбекова К.А., Кенжина И.Е.

ТОО «Институт высоких технологий» АО «НАК «Казатомпром»,
Казахстан, Алматы, *e-mail: p.blynskiy@iht.kz

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РУДНОГО ГОРИЗОНТА ОТРАБОТАННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ РЕКУЛЬТИВАЦИИ

При подземном выщелачивании загрязнение обычно сводится к воздействию на земную поверхность и водоносный горизонт вредных для здоровья человека и живой природы химически активных веществ, используемых и образующихся в процессе извлечения урана из недр. Хотя это загрязнение имеет локальный характер, оно должно контролироваться как в процессе подземного выщелачивания, так и после его завершения при рекультивации. В ходе проведения рекультивационных работ на отработанных урановых месторождениях РК главным условием является возвращение используемых территорий до их исходного состояния. Основной проблемой в данном случае является высокая кислотность подземного горизонта. Одним из способов решения может являться нейтрализация щелочными растворами. Для ускорения рекультивации отработанных урановых месторождений предполагается использовать гидроксид натрия. Рассмотрена возможность использования очищенного гидроксида натрия I-го контура реакторной установки БН-350. В данной работе представлены результаты исследования восстановления рудного горизонта отработанных урановых месторождений РК и его сорбционных свойств по отношению к техногенным радионуклидам.

Ключевые слова: радиоактивность, уран, цезий.

Blynskiy P.A., Panova E.N., Zhaksybekova K.A., Kenzhina I.E.

Kazatomprom JSC NAC "Institute of High Technologies" LTD,
Kazakhstan, Almaty, *e-mail: p.blynskiy@iht.kz

Recovery of the groundwater of spent uranium deposits ore horizon during the remediation process

The pollution in underground leaching usually reduces to the impact on the earth's surface and aquifer harmful to human health and living nature of chemically active substances used and formed during the extraction of uranium from the subsoil. Although this pollution has local nature, it must be controlled both during the underground leaching process and after its completion during remediation. The main condition during remediation process on spent uranium deposits of the Republic of Kazakhstan, is return of used territories to their initial state. The main problem in this case is the high acidity of the underground horizon. The neutralization with alkaline solutions could be one of the solutions. It is proposed to use sodium hydroxide to accelerate the remediation of spent uranium deposits. The possibility of using purified sodium hydroxide of the first circuit of the BN-350 fast reactor facility was considered in this work. This paper presents the results of a study of the recovery of the ore horizon of spent uranium deposits in the Republic of Kazakhstan and its sorption properties with respect to technogenic radionuclides.

Key words: radioactivity, uranium, cesium.

Блынский П.А., Панова Е.Н., Жаксыбекова К.А., Кенжина И.Е.
«Қазатомөнеркәсіп» ҰАК» АҚ «Жоғары технологиялар институты» ЖШС,
Қазақстан, Алматы, *e-mail: p.blynskiy@iht.kz

Игерілген кен орнының құнарлығын қайта қалпына келтіру үрдісінде жерасты суларын қалпына келтіру

Жерасты шаймалау кезінде ластану әдетте жер бетіне және адамның денсаулығына зиянды су тұтқыш жиектеріне және жер қойнауынан уран өндіру кезінде құралатын және пайдаланылатын химиялық белсенді заттардың табиғатқа зиянды әсерін келтіріп соғады. Осы ластануы жергілікті болғанымен, ол жерасты ұңғымалы шаймалау процесінде, сондай-ақ қалпына келтіру аяқталғаннан кейінде бақылауда болуы керек. ҚР-ның игерілген уран кен орындарында құнарлығын қайта қалпына келтіру жұмыстарын жүргізу мақсаты пайдаланылған территорияны бастапқы күйіне келтіру болып табылады. Қазіргі жағдайда басты мәселе жерасты горизонтының жоғары қышқылдылығы. Мәселені шешудің бір жолы ол сілтілік ерітінділермен бейтараптандыру мүмкін болады. Игерілген кен орындарының құнарлығын қайта қалпына келтіруді жеделдету үшін натрий гидроксидін пайдалану болжанып отыр. 1-ші контур реакторлық БН-350 қондырғысының тазартылған натрий гидроксидін пайдалану мүмкіндігі қарастырылған. Бұл жұмыста ҚР-ның игерілген кен орындарының рудалы горизонтын қайта қалпына келтіру зерттеу жұмыстарының нәтижелері келтірілген.

Түйін сөздер: радиоактивтілік, уран, цезий.

Введение

В настоящее время добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания является сырьевой основой существования урановой промышленности Республики Казахстан. Запасы урана в месторождениях, пригодных для разработки данным способом, чрезвычайно велики, и способны обеспечить высокорентабельную добычу в течение более чем ста лет [1-4].

В связи с развитием добычи урана способом подземного скважинного выщелачивания и завершением обработки некоторых месторождений, весьма актуальным стал вопрос разработки приемлемых способов рекультивации подземных вод.

Различия в природных условиях залегания гидрогенных месторождений и ценности заключенных в них подземных вод требуют дифференцированного подхода к обоснованию природоохранных мероприятий и соответственно к выбору способов рекультивации горизонтов [5].

Подземное выщелачивание – по существу безотходное производство, осуществляемое на месте залегания рудных тел без производства горных работ, нарушающих существующие природные условия недр и поверхности. В отличие от подземных и открытых горных работ здесь нет отвалов пород и хвостохранилищ, не происходит осушение водоносных горизонтов, нет шахтных и сбросных вод, загрязняющих поверхность, атмосферу и источники водоснабжения. Поэтому подземное выщелачивание влияет на

состояние окружающей среды по сравнению с горным способом значительно меньше.

На многих опытных и промышленных участках установлено, что после прекращения процесса добычи в водоносных горизонтах, вмещающих ореолы остаточных растворов, происходит хотя и медленная, но необратимая нейтрализация продуктов подземного скважинного выщелачивания в подземных водах [6].

В настоящее время несколько стран, имеющие на своей территории месторождения урана, отрабатываемые методом подземного выщелачивания, решают различные задачи по рекультивации подземных вод. В Чехии и Болгарии закисленные рудные горизонты находятся в непосредственной близости от водозаборных скважин [7, 8]. Содержание сульфатов некоторых участках достигает 12-15 г/л [9]. Зачастую, даже несмотря на то, что полигоны подземного выщелачивания находятся на значительном удалении от населенных пунктов, загрязнение может распространяться со скоростью десятки метров в год и с течением времени достигнуть их [10].

Общепринятой схемой по рекультивации подземных вод является схема состоящая из следующих этапов: откачка загрязненных растворов из подземного горизонта, обработка данных растворов методом обратного осмоса с добавлением нейтрализующих реагентов и возврат в систему, принудительная циркуляция растворов для получения однородной среды в зоне выщелачивания [11, 12]. Первые два этапа были относительно успешно проведены в США на трех

месторождениях в Техасе [13]. Однако вернуть водоносный горизонт в исходное состояние так и не удалось [14].

Очистка остаточных растворов от искусственных и петрогенных техногенных веществ на поверхности методами химических технологий приведет к масштабному загрязнению дневной поверхности и лишит ПСВ главного экологического преимущества по сравнению с открытым и подземным горными способами разработки урановых месторождений [15]. В Республике Казахстан согласно [16] в подземных водах продуктивного горизонта должна быть погашена избыточная кислотность и приняты меры по ликвидации ореола загрязненных вод.

В процессе проведения рекультивационных работ одним из вариантов ускорения восстановления окружающей среды может являться нейтрализация щелочными растворами непосредственно на месте залегания отработанного рудного горизонта уранового месторождения.

В настоящей статье представлены результаты исследования восстановления рудного горизонта отработанных урановых месторождений РК и его сорбционных свойств по отношению к техногенным радионуклидам.

Анализ химического и радионуклидного состава отобранных проб kernового материала

Для проведения исследований был взят образец kernового материала одного из урановых месторождений Южно-Казахстанской области. Начальный вес материала – 2500 г. Порода рыхлая, сухая, сыпучая. Цвет светло-сероватый, со слабым зеленоватым и дымчатым оттенком, встречаются светло-желтые разности. Состав кварцево-глинисто-слюдистый. Поровый объем kernового материала (Q_p) составляет 20 %.

Усреднение осуществлялось методом сбрасывания на конус. В таблице 1 представлен химический состав усредненной пробы урановой руды.

Таблица 1 – Химический состав усредненной пробы урановой руды

Содержание, %										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	S _{об}	C _{об}	U
79,73	1,24	1,42	0,40	0,12	0,12	0,03	0,02	0,15	0,06	0,03



Рисунок 1 – Исходная усредненная проба урановой руды

Для диагностирования соединений, из которых состоит исследуемая проба урановой руды, провели рентгенодифрактометрический и рентгенофазовый анализы.

Рентгенодифрактометрический анализ был проведен на автоматизированном дифрактоме-

тре ДРОН-3 с CuKa-излучением, β-фильтр. Условия съемки дифрактограмм: U=35 кВ; I=20 мА; съемка θ-2θ; детектор 2 град/мин.

Рентгенофазовый анализ на полуколичественной основе выполнен по дифрактограммам порошковых проб с применением метода равных навесок и искусственных смесей. Определялись количественные соотношения кристаллических фаз.

Результаты рентгенофазового анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты рентгенофазового анализа

Минерал	Формула	Концентрация, %
кварц	SiO ₂	66
калиевый полевой шпат	KAlSi ₃ O ₈	28
альбит	NaAlSi ₃ O ₈	5
кальцит	CaCO ₃	<0,5

Гранулометрический анализ образца пробы проведен путем его деления на шесть классов крупности. Результаты анализа приведены в таблице 3.

Опыты по выщелачиванию проводили в трубках с длиной рабочей части 490 мм и внутренним диаметром 34 мм, расположенных в горизонтальном положении, куда раствор подавался сверху вниз. Навеска руды составляла 500 г.

Скорость фильтрации в опытах устанавливалась равной 500 мл/сут, что соответствует 1 л/(кг×сут), т.е. за 1 сутки достигался Ж:Т=1 л/кг.

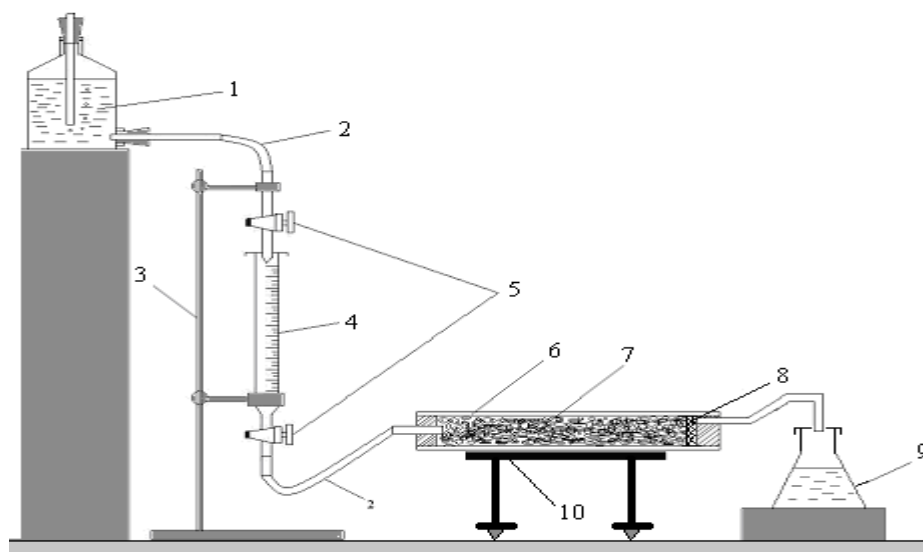
Керновый материал последовательно промывался водой в соотношении Ж:Т=1, затем 2 %-ным раствором H_2SO_4 (Ж:Т=1) и далее 1 %-ным раствором H_2SO_4 (Ж:Т=3).

Схема установки для проведения опыта с постоянной скоростью фильтрации в трубке приведена на рисунке 2.

Таблица 3 – Результаты гранулометрического анализа усредненной пробы урановой руды

№№ п/п	Размеры класса, мм	Выход класса, г	Выход класса, %
1	>5,0 – +2,0	53,20	7-8%
2	- 2,0 – + 1,0	21,90	3%
3	- 1,0 – + 0,5	78,50	10–11%
4	- 0,5 – + 0,25	345,00	45–47%
5	- 0,25 – +0,05	245,20	32–34%
6	- 0,05 – + 0	20,75	2,5–2,7%

По данным таблицы 3 видно, что усредненная проба урановой руды в значительной степени (45–47%) представлена классом (- 0,5) – (+ 0,25) мм.



1 – сосуд Мариотта с рабочим раствором; 2 – гибкий шланг (из кислотостойкой резины или силикона); 3 – штатив; 4 – бюретка с делениями; 5 – кран; 6 – трубка; 7 – керновый материал; 8 – пористый фильтр; 9 – колба с продуктивным раствором; 10 – подставка с регулируемой высотой ножек.

Рисунок 2 – Схема установки для проведения опытов по выщелачиванию в трубке с постоянной скоростью фильтрации

Применение бюретки с делениями и двух независимых кранов позволяет точно регулировать скорость фильтрации. При этом в случае измене-

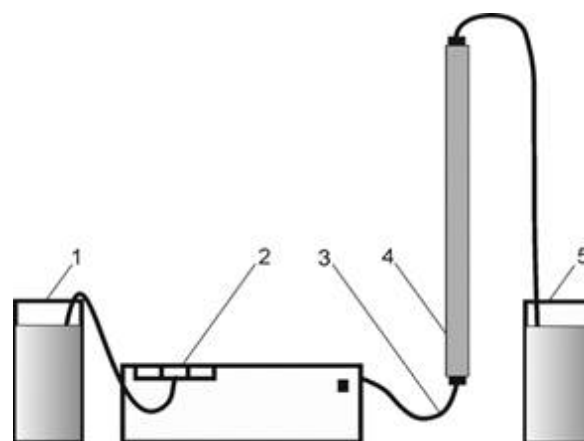
ния фильтрационных свойств руды общая скорость фильтрации остается постоянной. Наличие крышек на бюретке и колбе с продуктивным

раствором предотвращает испарение рабочего и продуктивного растворов, пористый фильтр предотвращает загрязнение продуктивного раствора механическими взвешьями и одновременно служит уплотнителем.

Порядок работы устанавливался следующим: после сборки установки ножки подставки 10 регулировались так, чтобы трубка 6 была наклонена под углом $4-5^\circ$ к горизонту (входная сторона ниже выходной), в результате чего гарантируется отсутствие появления воздушных «мешков» при подаче рабочего раствора. Затем, при закрытом нижнем кране 5, верхний кран 5 открывается и с помощью часов определяется скорость подачи рабочего раствора в бюретку 4. После того, как скорость подачи рабочего раствора будет точно отрегулирована с помощью верхнего крана, нижний кран полностью открывается, и рабочий раствор начинает поступать в трубку. При этом фиксируется изменение уровня раствора в бюретке. Если уровень раствора повышается почти до верхнего края бюретки, с помощью штатива 3 бюретка и верхний кран поднимаются на большую высоту в пределах, ограниченных высотой штатива и длиной гибких шлангов 2. Время появления в колбе 9 продуктивного раствора фиксируется, после чего ножки подставки 10 регулируются так, чтобы трубка приняла горизонтальное положение. Продуктивный раствор анализируется ежедневно, причем с целью контроля точности регулировки подачи рабочего раствора его объем измеряется, и в случае необходимости скорость подачи рабочего раствора корректируется.

Корректировка pH раствора в поровом пространстве отработанных кернов и определение сорбционных свойств пород по отношению к техногенным радионуклидам

После завершения эксперимента по выщелачиванию урана из керна и доведения уровня pH раствора в поровом пространстве до значения $\sim 1,5$, через руду по схеме, указанной на рисунке 3, подавали 0,5 %-ный раствор NaOH объемом 700 мл с радиоактивным трассером. В качестве трассера был выбран Cs-134, активностью 700 Бк. Скорость фильтрации составляла 50 мл/час. Пробы для проведения спектрометрического анализа и замера уровня pH отбирали каждый час.



- 1 – емкость с щелочным раствором,
2 – перистальтический насос; 3 – шланг;
4 – трубка с керновым материалом;
5 – приемник фильтрат

Рисунок 3 – Схема установки для проведения опыта с принудительной фильтрацией

Данные по изменению уровня pH в фильтрате представлены на рисунке 4.

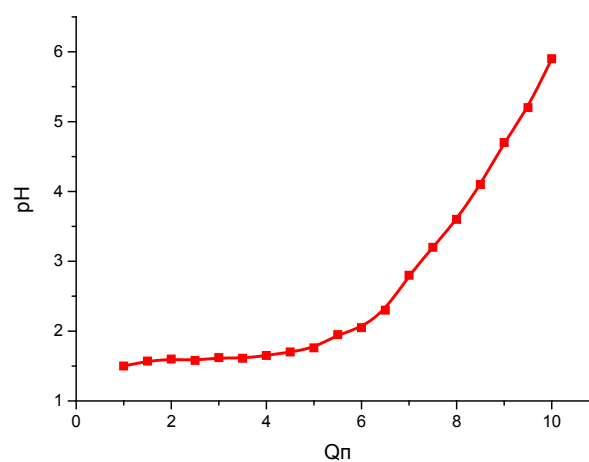


Рисунок 4 – Зависимость изменения pH в растворе

Из представленного графика видно, что оптимальным объемом 0,5 %-ного раствора щелочи для нейтрализации кислотной среды подземного рудного горизонта составляет порядка 10 поровых объемов.

Результаты спектрометрического анализа фильтрата (NaOH) приведены в таблице 4

Таблица 4 – Результаты спектрометрического анализа фильтрата

Образец	Масса, г	A (Cs-134), Бк/ образец
N-5	51	0,37 ± 0,04
N-6	50,5	0,28 ± 0,04
N-7	50,5	0,21 ± 0,03
N-8	50	0,18 ± 0,02
N-9	50	0,15 ± 0,03
N-10	50	0,12 ± 0,03
N-11	50	0,12 ± 0,02
N-12	50	0,07 ± 0,02
N-13	50	0,10 ± 0,02
N-14	50	0,07 ± 0,02
N-15	50	0,12 ± 0,03
N-16	50	0,07 ± 0,02
N-17	49	0,04 ± 0,02

Из представленных данных видно, что, керновый материал хорошо сорбирует на себя Cs-134 и большая часть активности (~99%) остается в рудном горизонте. При этом наилучшую сорбционную способность продемонстрировал образец №2, что объясняется тем, что цезий может входить в структуру таких минералов, как си-

ликаты, алюмосиликаты и гидрослюды, причем степень его фиксации в почве возрастает с течением времени [17]. Наличие кварцевого песка в породе также снижает степень выщелачивания цезия [18].

Согласно исследованиям [19,20], технологические процессы способствуют увеличению сорбционных свойств пород и прочности закрепления на минеральных зернах радионуклидов в глубинных хранилищах жидких технологических РАО. С увеличением времени взаимодействия кислые технологические отходы с породой доля прочнофиксированных форм возрастает.

Учитывая, что объем рудного тела среднестатистического отработанного технологического блока составляет порядка 300 тыс. м³, для утилизации очищенного натрия I-го контура РУ БН-350 будет достаточно площади одного отработанного технологического блока (площадь контура рудного тела ~44 тыс. кв.м.).

Заключения и выводы

Полученные результаты свидетельствуют, что самовосстановление среды отработанных урановых месторождений может быть в значительной мере ускорено с помощью нейтрализации щелочью, в том числе с использованием очищенного натрия I-го контура реакторной установки БН-350.

Литература

- Щеточкин В.Н., Кисляков Я.М. Экзогенно-эпигенетические урановые месторождения Кызылкумов и сопредельных районов // Геология рудных месторождений. – 1993. – Т. 5, №3. – С. 222-245.
- Берикболов Б.Р. Месторождения урана Казахстана: справочник. – Алматы: РГП ПХВ «Информационный-аналитический центр геологии и минеральных ресурсов РК», 2005. – 220 с.
- Петров Н.Н., Язиков В.Г., Аубакиров Х.Б., Плеханов В.Н., Вершков А.Ф., Лухтин В.Ф. Урановые месторождения Казахстана: (экзогенные). – Алматы: Гылым, 1995. – 264 с.
- Батулин С.Г., Головин Е.А., Зеленова О.И. и др. Экзогенные эпигенетические месторождения урана. Условия образования. – М: Атомиздат. – 1965. – С. 308.
- Сабирова Л.Б. Теория и методы оценки надежности восстановления пластовых вод после ПСВ урана. Монография. – Алматы, 2005. – 154 с.
- Язиков В.Г., Забазнов В.Л. Вопросы геоэкологии при подземном скважинном выщелачивании урана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), Москва. – 2003. – С. 237.
- Andel P., Priban V. Environmental restoration of uranium mines and mills in the Czech Republic // Planning for environmental restoration of radioactively contaminated sites in central and eastern Europe. 1996. Vol.1. – P.113-135.
- Vapirev E. I., Dimitrov M., Minev L., Boshkova T., Pressyanov D. S., Guelev M. G. Radioactively contaminated sites in Bulgaria // Planning for environmental restoration of radioactively contaminated sites in central and eastern Europe. – 1996. – Vol. 1 – P.43-63.
- Dimitrov M., Vapirev E. I. Uranium Industry in Bulgaria and Environment: Problems and Specific Features of the Period of the Technical Close-Out and Remediation of the Negative Consequences // Planning for environmental restoration of radioactively contaminated sites in central and eastern Europe. – 1996. – Vol.2. –P.43-52.
- Molchanov A., Soroka Y., Isayeva N., Mordberg E. The State of Environment on Former Site of In-Situ Leaching of Uranium // Proc. of the Fifth Inter. Conf. on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation. – 1995. – Vol.2 – P.1507-1510.

- 11 Schmidt C. Groundwater Restoration and Stabilization at the Ruth-ISL Test Site in Wyoming, USA // Proc. of a Technical Committee Meeting, IAEA- TECDOC-492 – 1989. – P.97-126.
- 12 Catchpole G., Kirchner G. Restoration of Groundwater Contaminated by Alkaline In-Situ Leach of Uranium Mining // Uranium Mining and Hydrogeology. – 1995. – P.81-89.
- 13 Mays W. M. Restoration of Groundwater at Three In- Situ Uranium Mines in Texas. // Uranium in situ leaching. Proc. of a Technical Committee Meeting held in Vienna, 5-8 October 1992, IAEA-TECDOC-720– 1993. – P.191- 215.
- 14 Otton J.K. Hall In-situ recovery uranium mining in the United States: Overview of production and remediation issues, Intern. Symp. on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM 2009), Vienna, 22-26 June. – 2009.
- 15 Поезжаев И.П., Полиновский К.Д., Горбатенко О.А., Панова Е.Н., Буленова К.Ж., Карманов Е.М., Блынский П.А., Битовт О.А. Геотехнология урана: учебное пособие. – Алматы, 2017. – С. 204 – 210
- 16 Санитарные правила ликвидации, консервации и перепрофилирования предприятий по добыче и переработке радиоактивных руд (СП ЛКП – 98), № 5.01.012.98*.
- 17 Prozorov L.B., Komarova N.I., and Molchanova T.V. Acid Deactivation of Soils with Ammonium Fluoride To Remove ¹³⁷Cs // Radiokhimiya. – 2002. – Vol. 4, No. 5. – P. 470.
- 18 Николаев А.Н., Карлин Ю.В., Юрченко А.Ю. Особенности радиоактивного загрязнения бетона и возможности его дезактивации от изотопа Cs137 // Тезисы докладов 7й междуна. научно-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва. – 2010. – С.260.
- 19 Власова И.Э., Захарова Е.В., Волкова А.Г., Калмыков С.Н. Микрораспределение и формы нахождения плутония, урана, америция и нептуния в осадочных породах пласта-коллектора в глубинных хранилищах жидких РАО // Российская конф. «Фундаментальные аспекты безопасного захоронения РАО в геологических формациях», Москва. – 2013. – С.26.
- 20 Захарова Е.В., Зубков А.А.2, Родыгина Н.И., Волкова А.Г., Прошин И.М., Данилов В.В., Макарова О.В. влияние техногенных преобразований на поведение радионуклидов при захоронении жидких технологических отходов // Российская конф. «Фундаментальные аспекты безопасного захоронения РАО в геологических формациях», Москва– 2013. – С.47.

References

- 1 V.N. Shetochkin and Ya.M. Kislyakov, *Geologiya rudnykh mestorozhdenij*, 5, 3, 222-245, (1993) (in russ).
- 2 B.R. Berikbolov, *Mestorozhdeniya urana Kazakhstana: spravochnik*. (Almaty: RGP PKHV «Informatsionnyy-analiticheskiy tsentr geologii i mineral'nykh resursov RK, 2005), 220 p. (in Russ).
- 3 N.N. Petrov, V.G. Yazikov, X.B. Aubakirov, L.N. Petrov, V.N. Plekhanov, A.F. Vershkov, and V.F. Lukhtin, *Uranovye mestorozhdeniya Kazakhstana* (Almaty: Gylm, 1995), 264 p. (in Russ).
- 4 S.G. Batulin, Ye.A. Golovin, O.I. Zelenova et al. *Ekzogennyye epigeneticheskie mestorozhdeniya urana, usloviya obrazovaniya* (Moscow: Atomizdat, 1965) 308 p. (in Russ).
- 5 L.B. Sabirova, *Teoriya i metody ocenki nadezhnosti vosstanovleniya plastovykh vod posle PSV urana* (Monografiya, Almaty, 2005), 154 p. (in Russ).
- 6 V.G. Jazikov and V.L. Zabaznov, *Gornyy informacionno-analiticheskiy bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, Moskva, 237 p. (2003). (in Russ).
- 7 P. Andel and V. Priban, *Planning for environmental restoration of radioactively contaminated sites in Central and Eastern Europe*, 1, 113-135, (1996).
- 8 E.I. Vapirev, M. Dimitrov, L. Minev, T. Boshkova, D.S. Pressyanov, and M. G. Guelev, *Planning for environmental restoration of radioactively contaminated sites in Central and Eastern Europe*, 1, 43-63, (1996).
- 9 M. Dimitrov and E. I. Vapirev, *Planning for environmental restoration of radioactively contaminated sites in Central and Eastern Europe*, 2, 43-52, (1996).
- 10 A. Molchanov, Y. Soroka, N. Isayeva, and E. Mordberg, *Proc. of the 5th Intern. Conf. on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICM'95, Vol.2. Management of Low-Level Waste and Remediation of Contaminated Sites and Facilities*, (ASME, New York, 1995), p.1507-1510.
- 11 C. Schmidt, *Proc. of a Technical Committee Meeting (IAEA- TECDOC-492, Vienna 1989)*, p.97-126.
- 12 G. Catchpole and Kirchner G., *Restoration of Groundwater Contaminated by Alkaline In-Situ Leach of Uranium Mining. Uranium Mining and Hydrogeology*, (GeoCongress 1, Köln, 1995) p.81-89.
- 13 W.M. Mays, *Proc. of a Technical Committee Meeting (Vienna, 5-8 October 1992)*, p.191- 215.
- 14 J.K. Otton and S. Hall, *Intern. Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (Vienna, 22-26 June, 2009)*
- 15 И.П. Поезжаев, К.Д. Полиновский, О.А. Горбатенко, Е.Н. Панова, К.Ж. Буленова, Е.М. Карманов, П.А. Блынский и О.А. Битовт, *Геотехнология урана (учебное пособие, Алматы, 2017)*, p.204-210.
- 16 Sanitary rules for the liquidation, conservation and re-profiling of enterprises for the extraction and processing of radioactive ores (№ 5.01.012, 1998). (in Russ).
- 17 L.B. Prozorov, N.I. Komarova, and T.V. Molchanova, *Radiokhimiya*, 4, 470, (2002).
- 18 A.N. Nikolaev et al., *Sedmaya mejdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konf. «Bezopasnost, effektivnost i ekonomika atomnoi energetiki (Moscow, 2010)*, p.260. (in Russ).
- 19 I.E. Vlasova et al., *Rossiyskaya konf. «Fundamentalnye aspekty bezopasnogo zaxoroneniya rao v geologicheskix formacijax»*, (Moscow, 15-16 October, 2013), p.26. (in Russ).