УДК 504.05, 502.7

Приоритетные параметры физических процессов в массиве пород при определении безопасности захоронения радиоактивных отходов

В.С.ГУПАЛО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

При выборе геологической формации для захоронения радиоактивных отходов осуществляется учет количественных характеристик, описывающих эволюционные процессы в массиве пород: геодинамических, гидрогеохимических, эрозионных и др. Однако вклад различных параметров процессов в обеспечение безопасности неравнозначен и далеко не всегда дополнительные проценты точности измерений имеют принципиальное значение. Это обуславливает необходимость выделения формирующих безопасность захоронения РАО различных типов показателей геологической среды для их детального изучения в условиях объекта захоронения.

Предложен подход к определению первоочередных показателей физических процессов в массиве пород, определяющих безопасность захоронения радиоактивных отходов различных типов и требующих повышенного внимания (точность, частота измерений) при определении в натурных условиях. Для выделения таких факторов был использован метод анализа чувствительности – системного изменения пределов значений переменных в ходе моделирования безопасности с целью оценки их влияния на конечный результат и определения роли различных физических процессов в обеспечении безопасности.

Показано, что при захоронении различных групп нуклидов – «природных», «короткоживущих» и «долгоживущих» – безопасность изоляции будет обеспечиваться за счет различных факторов. Выделены факторы, имеющие наибольшее влияние в обеспечении безопасности при захоронении радиоактивных отходов указанных типов. Определен перечень параметров геологической среды, характеризующих приоритетные механизмы локализации различных типов радионуклидных загрязнений при захоронении и требующий наиболее детального определения в натурных условиях.

Ключевые слова: захоронение радиоактивных отходов; моделирование миграции радионуклидов; оценки безопасности; взаимосвязь фильтрационных параметров и трещиноватости пород; пригодность геологических формаций; изоляционные свойства массива скальных пород

Как цитировать эту статью. Гупало В.С. Приоритетные параметры физических процессов в массиве пород при определении безопасности захоронения радиоактивных отходов // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 118-124. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.118

Введение. Одним из направлений использования подземного пространства является захоронение радиоактивных отходов (РАО) в слабопроницаемых геологических формациях.

Для подтверждения пригодности геологических участков для длительной изоляции отходов, содержащих долгоживущие радионуклиды, по всему миру созданы и эксплуатируются подземные исследовательские лаборатории (ПИЛ) в кристаллических породах, солях и глинах [13, 17]. Результаты исследований в таких ПИЛ должны обеспечить основной объем данных, необходимый для оценок безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО), и способствовать демонстрации надежности захоронения РАО в целом.

Аналогичные работы проводятся и в Российской Федерации [1]. В настоящее время российские позиции по вопросам обоснования безопасности по отдельным вопросам отличны от зарубежных [4]. В последние десятилетия в международной практике была сформирована современная концепция оценок безопасности, ключевым требованием которой стало «формирование доверия» к получаемым оценкам. Данная концепция означает не необходимость проведения определенного числа измерительных и расчетных процедур, а обязательность формирования понимания происходящих процессов, влияющих факторов, роли и механизмов работы системы природных и инженерных барьеров, определения вопросов, являющихся критически важными для безопасности. В итоге сначала в 2006 г., а затем и в 2011 г. данные требования по разработке обоснования безопасности были зафиксированы нормами МАГАТЭ [3].

Таким образом, в соответствии с современными требованиями, обоснование безопасности – это набор аргументов и фактов, с помощью которых описывается, измеряется и обосновывается

безопасность объекта окончательной изоляции РАО и уровень доверия к этой безопасности. Это означает, что для обоснования безопасности в первую очередь важна не только благоприятная оценка, решаемая добросовестным выполнением набора измерительных и расчетных процедур, но и представление доказательств безопасности объекта в отдаленном будущем с учетом влияния возможных процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения. Такая оценка может быть проведена только на основе представительного цикла натурных исследований динамики свойств и состояния инженерно-геологических элементов объекта, что требует учета при планировании исследований в ПИЛ. На стадии планирования научных работ в ПИЛ важно понимать, какие параметры должны быть определены, где и при помощи каких методов они должны быть замерены, как произвести количественный учет взаимного влияния различных факторов для формирования понимания происходящих процессов, роли и механизмов работы системы барьеров.

Вклад различных параметров в результаты оценок безопасности неравнозначен, далеко не для всякой измерительной задачи дополнительные проценты точности будут иметь принципиальное значение, и соответствующие затраты будут оправданы. Это определяет необходимость выделения приоритетных показателей геологической среды, формирующих безопасность захоронения РАО различных типов, для их детального изучения в условиях объекта изоляции.

Целью данной работы являлась разработка подхода и определение перечня первоочередных показателей геологической среды при захоронении радиоактивных отходов с учетом их вклада в результаты оценок безопасности.

Исследование процессов распространения радионуклидного загрязнения из ПГЗРО. После анализа процессов, происходящих при захоронении радиоактивных отходов, были определены механизмы изоляции радиоактивного загрязнения и соответствующие им параметры геологической среды:

- «физическая локализация» – низкие объемы фильтрующейся воды, ограничивающие количество нуклида, перешедшего в жидкую фазу за счет пределов растворимости (параметры водообмена, ширина раскрытия трещин, открытая пористость);
- «геохимическая локализация» – физико-химическое взаимодействие загрязнения с породой (коэффициент распределения, геометрические параметры области фильтрации);
- «деконцентрация» – снижение концентрации загрязнения при миграции за счет особенностей пути фильтрации, перемешивания с чистой водой;
- «задержка» – низкие скорости движения воды, обеспечивающие распад части радионуклидного загрязнения за время его выхода в область активного водообмена (скорость движения подземных вод, коэффициент фильтрации, гидравлический градиент, длина пути миграции).

Параметры по указанным процессам представляют собой основу выполняемых оценок безопасности.

Для выполнения оценок безопасности также необходимо определение характеристик, описывающих эволюционные процессы в массивах пород и влияющих, таким образом, на приведенные параметры:

- «тектоника и геодинамика» – изменение параметров путей распространения загрязнения;
- «гидрогеология» – ожидаемые изменения скоростей и объемов движения подземных вод в результате эволюционных процессов;
- «геохимия» – установление диапазонов изменений параметров физико-химического взаимодействия загрязнения и геосреды, реальных параметров задержки радионуклидов.

Для выделения определяющих безопасность ПГЗРО факторов был использован метод анализа чувствительности – системного изменения пределов значений переменных в ходе моделирования безопасности с целью определения их влияния на выходные показатели. Он позволяет выделить переменные с наибольшим влиянием, а также изучить устойчивость модели к изменениям данных. При расчетах выбиралась комбинация из максимальных и минимальных значений параметров процессов в породных массивах по анализу результатов ранее выполненных исследований и диапазонов неопределенности в литературных данных.

В основе моделирования безопасности использовано уравнение миграции радионуклидов в геологической среде с учетом сорбции [5]:

$$n_0 \frac{\partial c}{\partial t} + n_0 \left(\frac{\partial N}{\partial t} = \alpha_c \left(c - \frac{n_0}{\gamma K_d} N \right) \right) = (D_m + \lambda v) \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) - v \frac{\partial c}{\partial x}$$

при условиях

$$N(x, t) \leq N_{\max}, \quad x = r_0 \dots r_0 + L, t = 0..T,$$

$$c|_{x=0} = C_0, \quad c|_{x=L} = 0,$$

где n_0 – активная трещиноватость геологической среды, доли ед.; c – массовая концентрация компонента в жидкой фазе, кг/м³; N – условная концентрация компонента в твердой фазе, кг/м³; v – действительная скорость фильтрации по Дарси, м/год; D_m – коэффициент молекулярной диффузии, м²/год; α_c – коэффициент скорости сорбции, 1/год; γ – объемная масса пород в зоне трещиноватости, кг/м³; K_d – условный коэффициент распределения при сорбции, м³/кг; C_0 – значение концентрации поступления радионуклида в геологическую среду (в жидкой фазе), кг/м³; L – условная максимальная длина пути миграции (размер расчетной области системы моделирования), м; h – высота области моделирования, м.

Для решения данной системы уравнений была использована программная среда AMBER 5.7.1, на основе которой была реализована модель переноса вещества в однородной среде.

На основании расчетов размеров ореола предельного распространения радионуклидов в экологически значимых концентрациях за весь период сохранения соответствующим изотопом потенциальной опасности определялась роль исследуемого показателя для обеспечения долгосрочной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

В качестве исходных данных для моделирования были использованы:

- характеристики наиболее представительных радионуклидов, входящих в состав высокоактивных отходов, образующиеся при переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) (см. таблицу);
- фильтрационные и миграционные параметры, характерные для скальных массивов с условиями замедленного водообмена. Значения принимались по результатам обобщения данных натурных и лабораторных исследований, а также из литературных источников [2, 7, 10, 14, 15].

Характеристика радионуклидов

Нуклид	$A_{уд}$, Бк/тУ	$T_{1/2}$, год	УВ, Бк/м ³	Коэффициент распределения при сорбции, м ³ /кг	
²⁴¹ Am	7,97E+13	4,32E+02	6,90E+02	1,0E-02	1,0E+01
²³⁷ Np	1,40E+10	2,14E+06	1,30E+03	1,0E-02	5,0E-01
³ H	1,30E+13	1,24E+01	7,60E+06	1,0E-06	1,0E-02
¹⁴ C	1,42E+10	5,73E+03	2,40E+05	1,0E-04	5,0E-02
⁹⁰ Sr	2,75E+15	2,88E+01	4,90E+03	1,0E-04	1,0
¹³⁷ Cs	3,73E+15	3,00E+01	1,10E+04	2,0E-04	1,0
⁹⁹ Tc	5,99E+11	2,13E+05	2,10E+05	5,0E-04	2,0E-01
¹²⁹ I	1,44E+09	1,57E+07	1,30E+03	1,0E-01	4,0E-01

Предметом обобщения являлись показатели параметров скальных пород по перечисленным процессам – геомеханическим, гидрогеологическим, геохимическим. Были проанализированы величины напряженно-деформированного состояния, геодинамической активности с точки зрения трещинообразования, взаимосвязи геомеханических и гидрогеологических показателей, определенных в натурных и лабораторных условиях. Наибольший интерес представляло поведение тектонических нарушений-разломов, именно они являются наиболее неблагоприятными участками с точки зрения проницаемости и устойчивости скального массива пород. На рис.1, а показано типичное структурно-тектоническое строение массива скальных пород, представленного серией разномасштабных блоков, разделенных тектоническими нарушениями различных поряд-

Рис.1. Структурно-тектоническое строение массива скальных пород (а) и изменение фильтрационных характеристик монолитных (б) и нарушенных (в) участков массива в зависимости от параметров трещиноватости

Коэффициент фильтрации, экспериментально полученный: в ГХК – I, на других объектах скальных пород – II
Нарушение массива: 1 – приконтурная зона техногенной трещиноватости; 2 – зоны тектонического нарушения;
3 – контакт даек с вмещающими породами; 4 – слаботрещинистые гнейсы

ков, и приведена взаимосвязь деформационных процессов в приконтурной зоне выработок (рис.1, б) и величин раскрытия трещин (рис.1, в) с фильтрационными показателями для различных зон трещиноватости [2].

Применительно к структурно-тектоническим элементам модели массива пород были определены ключевые параметры для формализации математических моделей расчетов выхода радионуклидов с глубины размещения подземного объекта:

- длина траектории миграции по зонам тектонических нарушений различных порядков до границы области активного водообмена L (м);
- скорости движения подземных вод по зонам тектонических и других нарушений V (м/год);
- годовой водоприток через 1 м^2 поперечного сечения нарушений на глубине расположения объекта, предполагаемого для размещения отходов Q ($\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$).

В ходе исследования радионуклиды были разделены на несколько групп – представители короткоживущего радионуклидного загрязнения, долгоживущего и природные. Результаты моделирования подтвердили предположение о разной роли факторов задержки для различных групп радионуклидов. Результаты, демонстрирующие роль различных факторов в задержке распространения радионуклидного загрязнения, приведены на графиках (рис.2, 3).

На графике (рис.2) приведены зависимости предельной длины пути миграции различных нуклидов от фильтрационных и миграционных параметров, полученные в результате расчетов.

Анализ рис.2 показывает, что изменение коэффициента фильтрации K_f наиболее существенное влияние оказывает на дальность миграции плохо сорбируемых короткоживущих (^{90}Sr) нуклидов. Для долгоживущих (^{99}Tc) радионуклидов, в том числе с высоким значением коэффициента распределения K_d в породе (^{239}Pu), изменение коэффициента фильтрации приводит к ускоре-

Рис.2. Динамика распространения радионуклидного загрязнения от фильтрационных параметров массива

Рис.3. Зависимость предельной длины пути миграции ^{137}Cs (а) и ^{238}U (б) от количества локализованного изотопа и миграционных параметров

нию или замедлению процесса миграции, при этом практически не изменяется максимальный ореол распространения в силу длительных периодов сохранения потенциальной опасности. Таким образом, для долгоживущих нуклидов определяющими безопасностью захоронения параметрами являются длина путей миграции загрязнения L_m и параметры физико-химического взаимодействия K_d .

Для установления определяющих параметров для короткоживущего радионуклидного загрязнения дополнительно проведен анализ распространения на примере ^{137}Cs (рис.3, а). Полученные зависимости для различных значений миграционных параметров показали, что для нуклидов такого типа фактор «физической локализации» (K_f) является еще более преобладающим над «геохимической локализацией» (K_d). Для любых значений миграционных показателей среды (в пределах рассмотренных интервалов неопределенности) и любых исходных количеств изотопов такого типа, они, как показывает проведенный анализ безопасности, не могут быть источником возникновения экологической опасности для рассмотренных условий захоронения, так как не покинут пределов санитарной зоны ПЗРО в экологически значимых концентрациях. К наиболее важным параметрам, таким образом, относятся коэффициент фильтрации и параметры физико-химического взаимодействия (K_f , K_d).

На рис.3, б показана зависимость предельной длины пути миграции природных изотопов на примере ^{238}U от количества локализованного изотопа и миграционных параметров. Физический смысл пониженного значения продольного коэффициента дисперсии ($K_r = 1$) сводится к возможному наличию на пути фильтрации сквозных зон повышенной проводимости в направлении поверхностных водотоков, в которые не поступают дополнительные трещинные воды. Приведенные результаты показывают, что предельная длина пути миграции для природных изотопов мало зависит от скорости фильтрации вод в направлении основных путей распространения, что объясняется большим време-

нем сохранения данным радионуклидом потенциальной опасности и в большей степени определяется соотношением их уровней растворимости и вмешательства. Определяющими безопасностью изоляции параметрами геологической среды для нуклидов такого типа являются показатели водного баланса Q , геометрия области фильтрации n_0 , значения коэффициентов гидродисперсии K_r .

Совместный анализ полученных зависимостей показал, что:

• коэффициент межфазного распределения K_d является одним из наиболее значимых факторов в обеспечении безопасности долговременной изоляции радиоактивных отходов всех типов. Это определяет необходимость детального изучения этого показателя при изоляции нуклидов всех типов;

• объем изолируемых отходов также является инструментом управления безопасностью объекта окончательной изоляции всех типов отходов за исключением отходов, представленных короткоживущими нуклидами.

Выводы. Одним из аспектов планирования исследований в ПИЛ является установление перечня измеряемых параметров и необходимой точности измерительных процедур. Увеличение точности измерения всех параметров, используемых в расчетных процедурах, приведет только к необоснованному росту трудозатрат.

Предложен подход к определению приоритетных характеристик массива пород, заключающийся в использовании метода анализа чувствительности – системного изменения пределов характеристик физических процессов в ходе моделирования безопасности ПГЗРО с целью определения их влияния на выходные показатели.

Результаты проведенного исследования позволили выделить приоритетные механизмы изоляции различных групп нуклидов и соответствующие им параметры геологической среды, имеющие наибольшее влияние на безопасность объекта захоронения РАО и требующие проведения высокоточных измерений:

- для короткоживущего радионуклидного загрязнения – «задержка» (K_f , V_f);
- для радиоактивных отходов, содержащих долгоживущие радионуклиды – «физическая локализация» (величины водопритоков к камерам захоронения Q , мощность фильтрующих зон h , коэффициент гидродисперсии K_r) и «геохимическая локализация» (K_d , сорбционная емкость, химический состав подземных вод, длины траекторий миграции L по зонам проницаемости и открытой пористости n_o с конвективным механизмом миграции);
- для природных радионуклидов или отходов с невысоким уровнем активности – «деконцентрация» (гидрогеологический баланс Q , геометрия путей фильтрации).

Объем изолируемых отходов также является инструментом управления безопасностью объекта окончательной изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов А.А. Создание подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» Нижнеканского массива / А.А.Абрамов, В.П.Бейгул. URL: www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690 (дата обращения 19.11.2018).
2. Гупало В.С. Оценка долговременных изменений фильтрационных характеристик зоны техногенной и природной трещиноватости объектов подземной изоляции БАО // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 115-121. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-115-121
3. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности № SSR-5. Нормы МАГАТЭ по безопасности. Вена. МАГАТЭ, 2011. 104 с.
4. Мальковский В.И. Изоляция твердых радиоактивных отходов в приповерхностных хранилищах / В.И.Мальковский, С.В.Юдинцев, В.С.Гупало // Материалы XIX междунар. конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИГЕМ РАН. 2018. С. 226-229.
5. Опыт применения международных требований по обоснованию долговременной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов: проблемы и уроки / И.И.Линге, С.С.Уткин, А.А.Хамаза, Р.Б.Шарафутдинов // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 4. С. 201-208.
6. Alexander W. Natural analogues: studies of geological processes relevant to radioactive waste disposal in deep geological repositories / W.Alexander, H.Reijonen, I.McKinley // Swiss Journal of Geosciences. Vol. 108. 2015. P. 75-100. DOI: 10.1007/s00015-015-0187-y
7. Baghbanan A. Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture / A.Baghbanan, L.Jing // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 2007. Vol. 44(5). P. 704-719.
8. Blechschmidt I. Underground research facilities and rock laboratories for the development of geological disposal concepts and repository systems / I.Blechschmidt, S.Vomvoris // Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste. Woodhead Publishing. Camdridge. 2010. P. 82-118.
9. Birkholzer J. Geologic disposal of high-level radioactive waste: Status, key issues, and trends / J.Birkholzer, J.Houseworth, C.Tsang // Annual Review of Environment and Resources. 2012. Vol. 37. P. 79-106. DOI: 10.1146/annurev-environ-090611-143314
10. ISTC PROJECT #307B-97 Development of quantitative criteria for suitability of rock mass for safe long-term storage of waste from weapons-grade plutonium production, illustrated by Krasnoyarsk mining chemical combine, 2001.
11. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project, Vol. I, II. SKB Technical Report. 2011, TR-11-01. URL: skb.se/upload/publications/pdf/TR-11-01_vol1.pdf

12. *Ohberg A.* Posiva groundwater flow measuring techniques / A.Ohberg, P.Rouhiainen. 2000. Posiva Reports. 2000-12. 87 p.
13. *Raven K.* Geoscientific site characterization plan for the deep geologic repository at the Bruce site, Kincardine, Ontario / K.Raven, S.Sterling, J.Avis. Avis Intera Engineering Ltd. URL: www.opg.com/generating-power/nuclear/nuclear-waste-management/Deep-Geologic-Repository/Documents/HPD/4.3.55_geoscientificsitecharacter.pdf
14. *Stober I.* Hydraulic properties of the crystalline basement / I.Stober, K.Bucher // Hydrogeology Journal. 2007. Vol. 15. P. 213-224.
15. Stress dependent permeability of fractured rock masses a numerical study / K.Min, J.Rutqvist, C.Tsang, L.Jing // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 2004. Vol. 41(7). P. 1191-1210.
16. *Tsang C.* Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories / C.Tsang, I.Neretnieks, Y.Tsang // Water Resources Research. 2015. Vol. 51. Iss. 9. P. 6923-6972. DOI: [org/10.1002/2015WR017641](https://doi.org/10.1002/2015WR017641)
17. Underground Research Laboratories OECD/NEA 2013. № 78122.

Автор В.С.Гупало, д-р техн. наук, профессор, vs.gupalo@misis.ru (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия).

Статья поступила в редакцию 1.02.2019.

Статья принята к публикации 15.07.2019.