

Минимизация радиационного воздействия на население при подземном захоронении неподлежащего переработке отработавшего ядерного топлива в кристаллических породах Кольского полуострова (2 этап)

П.В. Амосов, А.В. Наумов, Н.В. Новожилова

Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация. Представлены результаты 2-го заключительного этапа исследований по проекту РФФИ №03-05-96161, посвященному минимизации радиационного воздействия на население региона от подземного хранилища регионального неперерабатываемого отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), размещаемого в кристаллических породах на Кольском полуострове. Предполагается, что в результате диверсионного акта подземный объект долговременного контролируемого хранения ОЯТ переводится в объект окончательного неконтролируемого захоронения. Представлены результаты численных экспериментов миграции в геосфере растворенной радиоактивности из объекта захоронения. Дан анализ динамики концентрации основных дозообразующих радионуклидов и мощности эквивалентной дозы для населения, потребляющего питьевую воду из мест водозабора в окрестности объекта. Показано, что для диапазона изменения гидравлического градиента, характерного для потенциальных площадок региона, размещение подземного хранилища ОЯТ в условиях принятой аварийной ситуации существенно более безопасно при глубине его размещения более 100 м от поверхности.

Abstract. The results of the 2nd final stage of investigations within RFBR N 03-05-96161 Project have been presented in the paper, the studies being carried out in the radiation impact of the regional inhabitants resulted from the underground storage facility for non-processable spent nuclear fuel (SNF) placed in the crystalline rock of the Kola Peninsula. This underground facility for long-term SNF controlled storage has been assumed to be attacked by terrorists, thus, becoming a final disposal facility. The results of numerical tests of dissolved radioactivity migration from the storage facility in the geosphere have been given. The analysis of dynamics of the concentration of the basic dose-contributing radionuclides and dose rate for people supplied with water from water intake points has been carried out. The location of the underground SNF storage at over 100 m depth has been shown to be more safe even in case of an accident for hydraulic gradient range typical for the region candidate sites.

1. Введение

Коротко напомним основную цепочку рассуждений и результаты исследований предыдущего этапа (*Амосов и др.*, 2004). На подземном объекте хранения регионального неперерабатываемого ОЯТ в результате диверсионного акта происходит пожар и взрыв. Последствием такого развития событий явилось принятие ответственными органами решения о консервации объекта (например, запечатывании всех стволов доступа, либо выполнение закладки помещений объекта бетоном). В результате объект долговременного контролируемого хранения ОЯТ фактически переходит в объект окончательного неконтролируемого захоронения отработавшего топлива. Причем этот вариант захоронения может существенно отличаться от вариантов проектируемых геологических могильников ядерных материалов, как по месту его расположения (неоптимальные глубина заложения и гидравлические характеристики вмещающей среды), так и по конструкционным особенностям.

Выполняемый проект является дальнейшим развитием подхода специалистов Горного института КНЦ РАН к проблеме оценки безопасности подземных ядерно-энергетических объектов. Исследования направлены на оценку отдельных параметров гипотетического объекта геологического захоронения в целях минимизации радиационного воздействия на население и окружающую среду от радиоактивности, высвобождаемой в течение значительных периодов времени.

В рамках проекта предполагается посредством построения гидрогеологической модели, выполнения серии компьютерных расчетов и анализа результатов выявить влияние на величину дозовых нагрузок для населения двух достаточно значимых параметров, а именно: глубины размещения объекта и расстояния от хранилища до водозаборной скважины. При этом рассматривается единственная (но весьма важная) траектория поступления радиоактивности в организм человека – потребление загрязненной питьевой воды.

Поставленная задача может быть решена в основном методами математического моделирования. Как и планировалось, решение задачи в полном объеме выполнено в два этапа. На первом этапе выполнен значительный объем подготовительной работы, в частности:

- построена гидрогеологическая модель представительной площадки размещения подземного хранилища перерабатываемого ОЯТ;
- выполнены численные эксперименты по расчету скоростных полей подземных вод с учетом размещения рассматриваемого объекта на различной глубине и вариации гидравлического градиента;
- обобщены миграционные характеристики предполагаемых для изучения долгоживущих радионуклидов (коэффициенты распределения и молярные растворимости) для типичных геохимических условий региона.

Как и на первом этапе, для математического моделирования процессов высвобождения радиоактивности из аварийного объекта и миграции радионуклидов в напорных водоносных горизонтах использовался компьютерный код PORFLOW (ACRi) (*PORFLOW...*, 1996). На втором этапе исследований также выполнены все запланированные работы, а именно:

- подготовлены в соответствии с требованиями формата компьютерного кода PORFLOW файлы исходных данных для выполнения расчетов процессов распространения радиоактивности с учетом размещения объекта захоронения по глубине. Проведены численные эксперименты процессов высвобождения из хранилища растворенной в воде порового пространства радиоактивности, миграции радионуклидов в геосфере и мониторинг концентрации радиоактивности в точках контроля. Точки контроля располагались на глубинах 25 (№ 1), 50 (№ 2) и 100 (№ 3) м от поверхности и на различных расстояниях от хранилища;
- построены кривые динамики концентрации основных дозообразующих радионуклидов в точках контроля, а также изолинии пространственного распределения растворенной радиоактивности в геосфере. Выполнен анализ полученных результатов;
- на основе подготовленных в соответствии с НРБ-99 (*Нормы радиационной безопасности*, 1999) дозовых коэффициентов для изотопов ^{129}I и ^{79}Se выполнен расчет динамики мощности индивидуальной эквивалентной дозы для населения, потребляющего питьевую воду из мест водозабора. Отрисованы кривые, выполнена систематизация и анализ результатов динамики мощности индивидуальной эквивалентной дозы для населения посредством поступления активности в организм человека через питьевую воду;
- определены параметры модели (глубина размещения объекта захоронения и расстояние от него до источников водопользования), обеспечивающие минимум радиационного воздействия на население.

2. Результаты расчетов миграции радионуклидов

В соответствии с инструкцией пользователя компьютерного кода PORFLOW были подготовлены файлы исходных данных с учетом размещения рассматриваемого объекта на различной глубине и двух указанных выше значений гидравлического градиента. Поскольку именно содержание долгоживущих радионуклидов обуславливает радиологическую опасность подлежащего переработке ОЯТ в течение десятков тысяч лет, в численных экспериментах были задействованы следующие радионуклиды, входящие в его состав (*Мельников и др.*, 2003а): ^{79}Se , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{135}Cs , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu . Для радионуклидов, характеризующихся высокой растворимостью, использовалась модель мгновенного растворения, для остальных – модель предела растворимости (*Мельников и др.*, 2003б). Временной период исследования миграции радионуклидов был ограничен сроком 10000 лет. Основными причинами выбора такого срока явились следующие: рассмотрение более отдаленных последствий встречает ряд серьезных возражений, обусловленных как возрастающей неопределенностью при выборе миграционных параметров, так и изменением климатических и геологических условий на Земле, а также известной непредсказуемостью человеческой деятельности. Так как глубина размещения хранилища варьировалась от 80 м до 140 м относительно поверхности, то для каждого анализируемого радионуклида получилось 14 вариантов.

Далее была выполнена визуализация пространственных полей загрязнения. Для этого с помощью разработанных вспомогательных программ были сначала выделены подлежащие визуализации вертикальные и горизонтальные сечения моделируемой области, а потом с помощью программного кода SURFER отрисованы поля загрязнения в различных вертикальных и горизонтальных сечениях модели, наиболее полно отражающих особенности поля течения. Для построения изолиний был использован метод интерполяции "Kriging", позволивший, по мнению авторов, обеспечить более адекватное представление результатов. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты пространственного распределения растворенного изотопа ^{129}I для гидравлического градиента 0.01 м/м при самом глубоком (140 м, рис. 1 верхний) и самом неглубоком (80 м, рис. 1 нижний) расположении хранилища ОЯТ. Приведенные графики дают определенное представление о возможном пространственном загрязнении подземных вод изотопом ^{129}I для двух крайних положений по глубине размещения хранилища ОЯТ для минимального из рассмотренных значений гидравлического градиента.

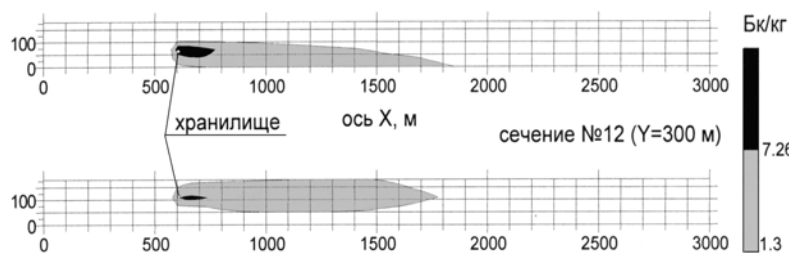


Рис. 1. Пространственное распределение изотопа ^{129}I растворенного в воде порового пространства при гидравлическом градиенте 0.01 м/м для двух крайних положений по глубине размещения хранилища ОЯТ на 10000 лет

На рис. 1 выделены два значения концентрации этого изотопа. Минимальное значение отвечает принятому в НРБ-99 определению уровня вмешательства, соответствующего мощности эффективной дозы 0.1 мЗв/год. Максимальное значение является отношением предела годового поступления к массе питьевой воды, с которой радионуклид поступает в организм на протяжении календарного года (*Нормы радиационной...*, 1999). На рисунках хорошо видно, что при самом глубоком размещении хранилища ОЯТ распространение загрязнения происходит, в основном, в нижней части моделируемой области (рис. 1 верхний), а при размещении хранилища ОЯТ ближе к поверхности распространение примеси имеет место в верхней части водоносного горизонта (рис. 1 нижний). Можно заметить, что объем области загрязнения с границей выше значения 7.26 Бк/кг для самого глубокого размещения хранилища от поверхности существенно больше, чем для самого неглубокого. Данный результат имеет объективное объяснение: как показано на 1-м этапе исследований по этому проекту, скорости течения подземных вод на высотных отметках порядка 80 м существенно выше, чем на отметках 140 м. Аналогичное построение пространственного распределения загрязнения при максимальном гидравлическом градиенте (0.05 м/м), в целом, повторяет приведенную картину: при глубоком размещении хранилища ОЯТ распространение радиоактивности происходит в нижней части области моделирования, а при менее глубоком – в верхней части водоносного горизонта. При этом на время 10000 лет область загрязнения выше уровня 7.26 Бк/кг при глубоком размещении хранилища ОЯТ существенно меньше, а при неглубоком размещении область с этим уровнем загрязнения к указанному времени уже полностью отсутствует. Очевидно, что такая ситуация обусловлена более быстрым разбавлением загрязнения.

Для всех указанных точек контроля проанализирована динамика концентрации анализируемых радионуклидов. Выполненный анализ показал, что сорбирующиеся и слабо сорбирующиеся радионуклиды (изотопы плутония, урана, цезия, технеция и т.п.) на расстояниях от хранилища более 500 м проявляют себя в незначительных концентрациях, не представляющих опасности для окружающей среды. Интересные для последующего анализа потенциально опасные концентрации радионуклидов на расстояниях свыше 500 м проявляются лишь для несорбирующихся и практически несорбирующихся долгоживущих радионуклидов (^{129}I , ^{79}Se). При этом концентрация каждого из радионуклидов имеет вполне определенные, разделенные во времени и пространстве максимумы, зависящие, в первую очередь, от значения гидравлического градиента. Например, для изотопа ^{79}Se при размещении хранилища на глубинах менее 100 м от поверхности и гидравлическом градиенте 0.05 максимумы в точках контроля на расстояниях 500, 1100 и 1700 м от объекта проявляются через ~5000, ~7000 и более 10000 лет, соответственно. Причем на одном и том же расстоянии время достижения максимума зависит еще и от глубины расположения точки контроля.

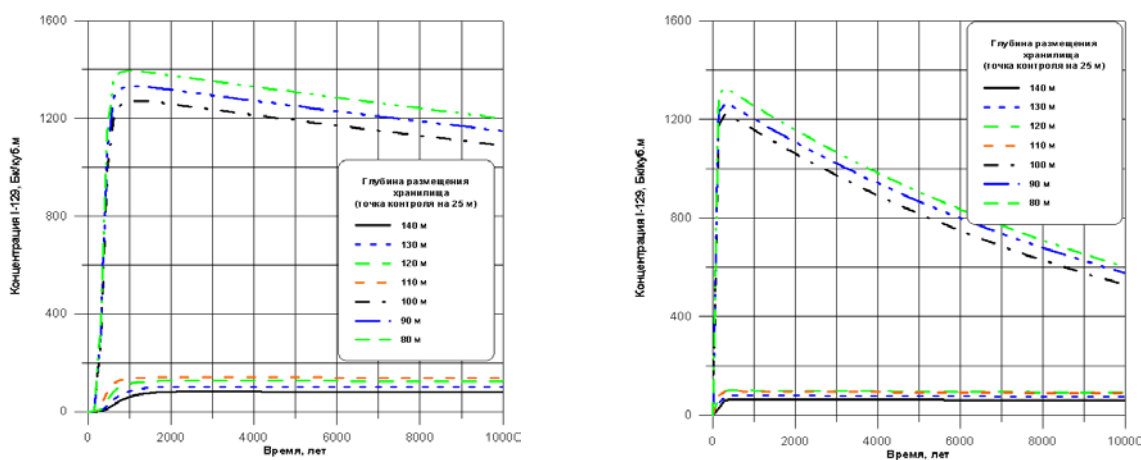


Рис. 2. Динамика концентрации изотопа ^{129}I при различных глубинах расположения объекта захоронения радиационно-опасных материалов для гидравлических градиентов 0.01 (слева) и 0.05 (справа) на расстоянии 1100 м от хранилища вдоль оси X

Для несорбирующегося во вмещающем массиве изотопа ^{129}I аналогичные максимумы проявляются уже в течение первых 4000 лет, существенным образом завися от величины гидравлического градиента и глубины расположения точки контроля. При выборе глубины размещения хранилища от поверхности более 100 м имеет место ситуация, когда ярко выраженных максимумов не фиксируется и сам уровень концентраций существенно ниже. В качестве примера на рис. 2 представлена динамика концентрации изотопа ^{129}I при различных глубинах расположения объекта захоронения для гидравлических градиентов 0.01 и 0.05, соответственно, в точке контроля на глубине 25 м от поверхности на расстоянии 1100 м от хранилища. Можно отметить, что концентрация ^{129}I при гидравлическом градиенте 0.05 на расстоянии 1100 м от хранилища в самой верхней точке контроля, достигнув своего максимального значения, начинает резко падать, уменьшаясь почти в 2 раза через 10000 лет, а при гидравлическом градиенте 0.01 максимальная концентрация этого радионуклида уменьшается не столь резко. Отмеченная особенность относится и к точкам контроля более глубокого залегания.

3. Результаты расчетов мощности индивидуальной дозы

На основе НРБ-99 были получены коэффициенты перехода от концентрации радиоактивности изотопов ^{129}I и ^{79}Se в поровой воде ($\text{Бк}/\text{м}^3$) к мощности эквивалентной дозы ($\text{Зв}/\text{год}$). С помощью этих коэффициентов выполнен расчет динамики мощности индивидуальной эквивалентной дозы для населения, потребляющего питьевую воду из мест водозабора. Результаты расчета визуализированы и систематизированы. На основе анализа результатов динамики мощности индивидуальной эквивалентной дозы для населения определены параметры модели (глубина размещения объекта захоронения и расстояние от него до источников водопользования), обеспечивающие минимум радиационного воздействия на население. В качестве примера расчетных данных в таблице приведены пиковые значения мощности индивидуальной эквивалентной дозы для индивидуума посредством поступления активности в организм человека через питьевую воду, выкачиваемую из скважин глубиной 25, 50 и 100 м, расположенных на расстояниях 1100 и 1700 м от хранилища для обоих значений гидравлического градиента.

Дополнительно, для большей наглядности на рис. 4 представлены экстремумы мощности эквивалентной дозы для изотопа ^{129}I на расстоянии источника водопользования 1100 м от хранилища ОЯТ при гидравлическом градиенте 0.01.

Таблица. Максимальные значения мощности эквивалентной дозы для изотопа ^{129}I при водозаборе питьевой воды с глубин 25, 50 и 100 м от поверхности на различных расстояниях от хранилища для двух значений гидравлических градиентов, мЗв/год

Глубина размещения хранилища ОЯТ	Гидравлический градиент			
	0.05		0.01	
	Расстояние от хранилища вдоль оси X			
	1110 м	1710 м	1110 м	1710 м
25 м от поверхности				
140 м	0.0089	0.0108	0.0113	0.0136
130 м	0.0112	0.0121	0.0142	0.0152
120 м	0.0138	0.0135	0.0175	0.0171
110 м	0.0134	0.0120	0.0196	0.0175
100 м	0.170	0.142	0.177	0.148
90 м	0.176	0.145	0.185	0.152
80 м	0.185	0.148	0.194	0.155
50 м от поверхности				
140 м	0.0106	0.0115	0.0134	0.0144
130 м	0.0128	0.0126	0.0162	0.0159
120 м	0.0153	0.0139	0.0194	0.0175
110 м	0.0144	0.0122	0.0209	0.0177
100 м	0.179	0.143	0.185	0.148
90 м	0.183	0.145	0.192	0.152
80 м	0.190	0.148	0.199	0.155
100 м от поверхности				
140 м	0.0242	0.0175	0.0301	0.0219
130 м	0.0250	0.0174	0.0311	0.0218
120 м	0.0255	0.0173	0.0318	0.0217
110 м	0.0205	0.0138	0.0294	0.0198
100 м	0.224	0.147	0.232	0.153
90 м	0.220	0.148	0.230	0.154
80 м	0.214	0.148	0.223	0.154

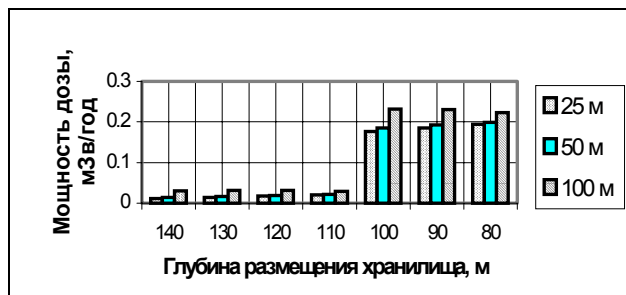


Рис. 3. Мощность дозы для изотопа ^{129}I на расстоянии источника водопользования 1100 м от хранилища ОЯТ при гидравлическом градиенте 0.01

Выполненный анализ результатов для всех трех глубин расположения точек контроля показывает, что пиковые значения мощности дозы, отвечающие максимумам концентрации изотопа ^{129}I в поровой воде на расстояниях от хранилища более 1000 м и при расположении хранилища на глубине 80-100 м, оказываются ниже величины 1 мЗв/год, установленной НРБ-99, примерно в 4-6 раз. При размещении хранилища на глубине 110-140 м от поверхности аналогичные величины получаются еще на порядок ниже и находятся на уровне 0.01-0.03 мЗв/год при всех проанализированных глубинах точек контроля. Как видно из приведенной таблицы, а также анализа аналогичных результатов для более глубоких точек контроля, размещение хранилища ОЯТ на глубинах более 100 м от поверхности приводит к существенно более низким уровням мощности дозы, чем при размещении хранилища на глубине 100 м и менее от поверхности. Рассчитанные в рамках принятой модели значения мощности дозы для глубины размещения хранилища ОЯТ более 100 м от поверхности близки эквиваленту уровня пренебрежимого риска для населения (0.014 мЗв/год (*Нормы радиационной безопасности*, 1999)).

4. Заключение

Таким образом, в рамках используемых модельных представлений можно констатировать, что для диапазона изменения гидравлического градиента, характерного для потенциальных площадок региона, в условиях изученной аварийной ситуации существенно более безопасно размещение подземного хранилища ОЯТ на глубине более 100 м от поверхности. При этом организацию водозабора питьевой воды с помощью скважин предлагается осуществлять на расстояниях не менее 1000 м от объекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Мурманской области (проект № 03-05-96161).

Литература

- PORFLOW:** A software tool for multiphase fluid flow, heat and mass transport in fractured porous media. User's manual. Version 3.07. *Analytic & Computational Research, Inc. (ACRi)*, 326 p., 1996.
- Амосов П.В., Наумов А.В., Новожилова Н.В.** Минимизация радиационного воздействия на население при подземном захоронении не подлежащего переработке отработавшего ядерного топлива в кристаллических породах Кольского полуострова (1 этап). *Сборник статей "СЕВЕР-2003: Проблемы и решения"*, Апатиты, КНЦ РАН, с.55-64, 2004.
- Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А., Амосов П.В., Гусак С.А., Наумов А.В., Катков Ю.Р.** Отработавшее ядерное топливо судовых энергетических установок на европейском Севере России. Часть 1. *Апатиты, КНЦ РАН*, 166 с., 2003а.
- Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А., Амосов П.В., Гусак С.А., Наумов А.В., Катков Ю.Р.** Отработавшее ядерное топливо судовых энергетических установок на европейском Севере России. Часть 2. *Апатиты, КНЦ РАН*, 209 с., 2003б.
- Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы.* М., Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 116 с., 1999.