

А. В. Изотова¹, Г. Н. Белозерский¹, В. Г. Савоненков², С. И. Шабалев²

РОЛЬ ПРИРОДНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

² Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, Российская Федерация, 194021, Санкт-Петербург, 2-й Муринский пр., 28

В статье рассмотрена проблема экологически безопасного захоронения радиоактивных отходов (РАО) в Ленинградской области. Исследованы некоторые изоляционные свойства инженерных барьеров пункта захоронения РАО (ПЗРО): бетона невозвратных контейнеров и смеси глин для засыпки (забутовки). Изучена коррозионная устойчивость бетона по отношению к разным растворам.

Выявлено, что в среде захоронения РАО недопустимы низкие значения pH и вымывание кальция. Показана необходимость подробного изучения взаимодействия бетона с H₂O₂. Определены фильтрационные свойства смесей глин, что позволило предложить оптимальный состав засыпки: уплотненная смесь 70% котлинской глины и 30% бентонита. Библиогр. 16 назв. Ил. 4. Табл. 1.

Ключевые слова: захоронение РАО, инженерные барьеры, изоляционные свойства инженерных барьеров, засыпка, невозвратные железобетонные контейнеры.

A. V. Izotova¹, G. N. Belozerskiy¹, V. G. Savonenkov², S. I. Shabalev²

THE ROLE OF THE NATURAL AND ENGINEERED BARRIERS IN THE DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE

¹ St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation;

² Khlopin Radium Institute, 28, 2 Murinskiy pr., St. Petersburg, 194021, Russian Federation

The article describes environmental-friendly isolation of radioactive waste in Leningrad Region (Russia). Some isolation properties of two engineered barriers for a radwaste repository were discovered: concrete of special containers and the clay-based mixtures for buffer mass (backfill). Corrosion resistance of the concrete to various solutions was estimated experimentally. It was discovered that in the geological environment of the repository of radioactive waste the low pH values and the calcium leaching are unacceptable.

The need for detailed studies of the concrete interaction with peroxide is shown. Also, the permeability of clay-based mixtures and their variations over time has been evaluated. This made it possible to offer the optimal composition of filling: compacted mixture of 70% Kotlin clay and 30% bentonite. It has been discovered that the geological environment of the RAO repository has unacceptably low pH and leaching of calcium. Refs 16. Figs 4. Table 1.

Keywords: repository, radioactive waste, engineered barriers, buffer mass, backfill, waste containers.

Развитие атомной энергетики и промышленности определяется созданием эффективной системы безопасного обращения с радиоактивными отходами (РАО). Проблема накопленных и постоянно образующихся РАО может быть решена за счет ликвидации многочисленных временных хранилищ и создания сети пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) различных типов. Окончательная изоляция — важнейшее звено единой системы обращения с РАО в Российской Федерации. Одним из перспективных вариантов является сооружение ПЗРО в границах пунктов временного хранения РАО филиалов «РосРАО» (бывших специализированных комбинатов системы «Радон») [1]. К их числу относится площадка Ленинградского отделения филиала ФГУП «РосРАО» «Северо-Западный территориальный округ», которая

находится в Ломоносовском районе Ленинградской области. Здесь же в узкой прибрежной полосе Финского залива расположен крупнейший комплекс предприятий атомной энергетики и промышленности, в том числе действующая атомная электростанция ЛАЭС-1 и строящаяся ЛАЭС-2, НИТИ им. Александрова, завод «Экомет-С».

Строительству предприятий предшествовали обоснования выбора площадок в соответствии с требованиями комплексных критериев, правил и нормативов. Оценки безопасности всего комплекса радиационно опасных объектов, сконцентрированных на сравнительно небольшой территории, неоднозначны. С одной стороны, минимизирована площадь размещения объектов с хорошо скомпонованной логистической системой. Все предприятия сосредоточены в 30-километровой зоне наблюдений вокруг ЛАЭС-1, в которой много лет функционирует система комплексных радиоэкологических наблюдений. С другой стороны, при такой «уплотнительной застройке» аварийная ситуация на одном объекте затрагивает нормальное функционирование всех других.

Согласно нашему проекту, подземную изоляцию РАО обеспечит многобарьерная система защиты ПЗРО, в которую входят искусственные инженерные барьеры и окружающая природная геологическая среда — горные породы, соответствующие требованиям выбора площадок. Геологические формации южного побережья Финского залива являются северо-западным окончанием крупной континентальной структуры — Русской платформы. Фундамент представлен древним докембрийским комплексом метаморфических пород, который перекрыт осадочными пологозалегающими породами платформенного чехла. В состав последнего входят два мощных пласта глинистых пород — нижнекембрийских «синих» глин и более древних котлинских глин протерозойского возраста [2].

Нижнекембрийские глины по минералогическому составу иллит-каолинит-хлоритовые, их основные физико-химические параметры характерны для этого типа пород. Глины обладают достаточно высокой поглощающей способностью относительно радионуклидов, определяющейся коэффициентом распределения Kd (отношение концентрации радионуклида в твердой фазе к равновесной концентрации этого же радионуклида в растворе). Коэффициенты распределения Kd нижнекембрийских глин для ^{90}Sr и ^{137}Cs составляют $\sim 10^2 \text{ см}^3/\text{г}$, для ^{239}Pu — $\sim 10^4 \text{ см}^3/\text{г}$, ^{241}Am — $\sim 10^3 \text{ см}^3/\text{г}$ [3]. Расчетная скорость передвижения радионуклидов с просачивающимися водами будет в 10^2 – 10^4 раз меньше скорости движения просачивающихся в хранилище вод. В случае возникновения направленного водного потока через зону ПЗРО, заполненную глинистым материалом, при скорости потока 0,7 м/год и гидравлическом градиенте $(1,5\text{--}3,0) \cdot 10^{-3}$ м/м максимальное распространение радионуклидов составит $\sim 3,3$ м через 600 лет. По предварительным оценкам, время диффузионного переноса радионуклидов через слой глины мощностью в 1 м составит для стронция — 300 лет, цезия — 5000 лет, плутония — 50000 лет. Исследования, проведенные в начале 2000-х годов специалистами Санкт-Петербургского университета, подтвердили высокие барьерные свойства нижнекембрийских глин. Расчеты вертикальной миграции радиоактивных растворов через пласт глин с коэффициентом фильтрации $1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-7}$ м/сут, с пористостью 40 % и при гидравлическом градиенте 1 м/м показали, что даже при отсутствии сорбционных процессов загрязнение за 10000 лет проникнет в породу только на первые метры [4].

Минералогический состав протерозойских глин котлинского горизонта идентичен глинам нижнего кембрия — иллит, каолинит с примесью хлорита. Лабораторные эксперименты показали достаточно высокие барьерные свойства котлинских глин по отношению к радионуклидам (таблица).

Коэффициенты распределения радионуклидов для котлинских глин [5]

Радионуклиды	$Kd, \text{см}^3/\text{г}$
^{90}Sr	32–56
^{137}Cs	4000–8000
^{60}Co	600–1600
$^{239,240}\text{Pu}$	4000–25000

Котлинские, и в меньшей степени нижнекембрийские глины, являются анизотропными средами, что обусловлено присутствием в них прослоев, обогащенных крупными минеральными частицами. Проницаемость этих прослоев выше, чем породы, состоящей из мелкодисперсных частиц. Такая особенность текстуры может изменить направление миграции и в случае появления субвертикальных разрывных нарушений создает условия для развития ореола радиоактивного загрязнения в горизонтальном направлении за счет демпфирующей зоны, удерживающей мигрирующие радионуклиды в пределах пласта глин (рис. 1). Такое увеличение емкости вмещающих ПЗРО пород необходимо учитывать при моделировании миграционных процессов и прогнозировании распространения и конфигурации ореолов рассеяния радионуклидов.

Отходы, накопленные в Ленинградском отделении «РосРАО», содержат кроме ^{90}Sr и ^{137}Cs более долгоживущие радионуклиды (^{239}Pu , ^{241}Am , ^{226}Ra , ^{63}Ni , ^{129}I) [4]. Их присутствие, даже в незначительных количествах, определяет подземный вариант изоляции как наиболее безопасный. По совокупности проведенных предварительных исследований в районе расположения Ленинградского отделения филиала ФГУП «РосРАО» «Северо-Западный территориальный округ» находятся пласты глин, обладающие свойствами природных изоляционно-сорбционных барьеров [5, 6]. Для дальнейших детальных исследований рекомендуются две площадки — «Радон» и «Копорье» (рис. 2).

При подготовке РАО к захоронению производится их кондиционирование — приведение в состояние, пригодное к окончательной изоляции. На предприятии «РосРАО» и Ленинградской атомной электростанции используются различные методы и технологии уплотнения и отверждения РАО для перевода их в форму, пригодную для транспортирования, хранения и захоронения. Некоторые виды отходов включаются в состав специальных матриц из цемента или битума. Последней операцией кондиционирования является помещение переработанных форм РАО в специальные упаковки, например, в 200-литровые бочки, с последующей загрузкой упаковок в невозвратные железобетонные контейнеры. В дальнейшем герметизированные контейнеры размещаются в отсеках ПЗРО (рис. 3).

Для ПЗРО в Ленинградской области планируется использовать несколько видов невозвратных железобетонных контейнеров: НЗК-150-1,5П; НЗК-МР; ЖЗК-1, ЖЗК-2 [8]. Они близки, но не идентичны по составу бетона. Для контейнеров разработаны основные требования, обеспечивающие безопасность их хранения, транспортировки

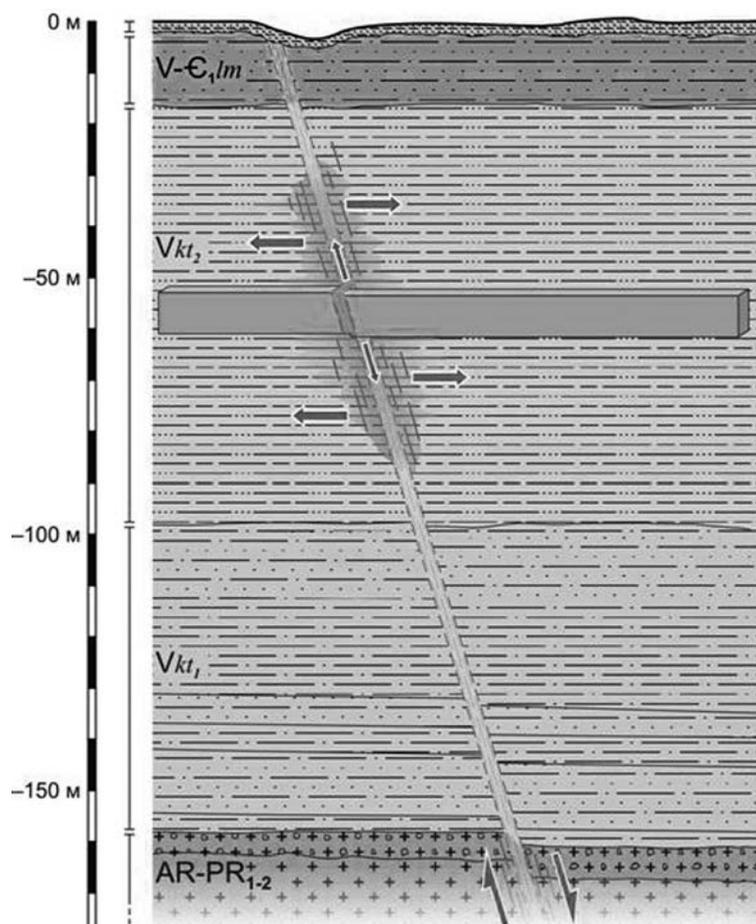


Рис. 1. Возможное развитие ореола рассеяния радионуклидов в котлинских глинах по разнонаправленной системе каналов миграции, образовавшихся после предполагаемого крупного тектонического разлома пород кристаллического фундамента [6]. Условные обозначения: Є_1 — осадочные породы нижнего кембрия; Vkt_2 — пласт вендских глин котлинского горизонта; Vkt_1 — глины, водоносные песчаники нижнекотлинского горизонта; $AR-PR_{1,2}$ — архейско-протерозойские породы кристаллического фундамента

и захоронения (сохранность, герметичность, механическая прочность и пр.). Далеко не полностью исследованы изменения первичных свойств контейнеров под воздействием агрессивной водной среды, с образованием новых минеральных компонентов бетона, накоплением этих новообразований в порах и капиллярах бетона.

Для лабораторных исследований был выбран бетон контейнера НЗК-150-1,5П, изготовленного на предприятии «345-й механический завод», г. Балашиха Московской области, который является базовым при разработке модификаций контейнеров с учетом специфики конкретных видов отходов и методов их переработки [8]. По имеющимся данным, коэффициент диффузии ^{137}Cs во влагонасыщенном бетоне составляет $2,4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$. В слабопроницаемых породах с незначительной скоростью

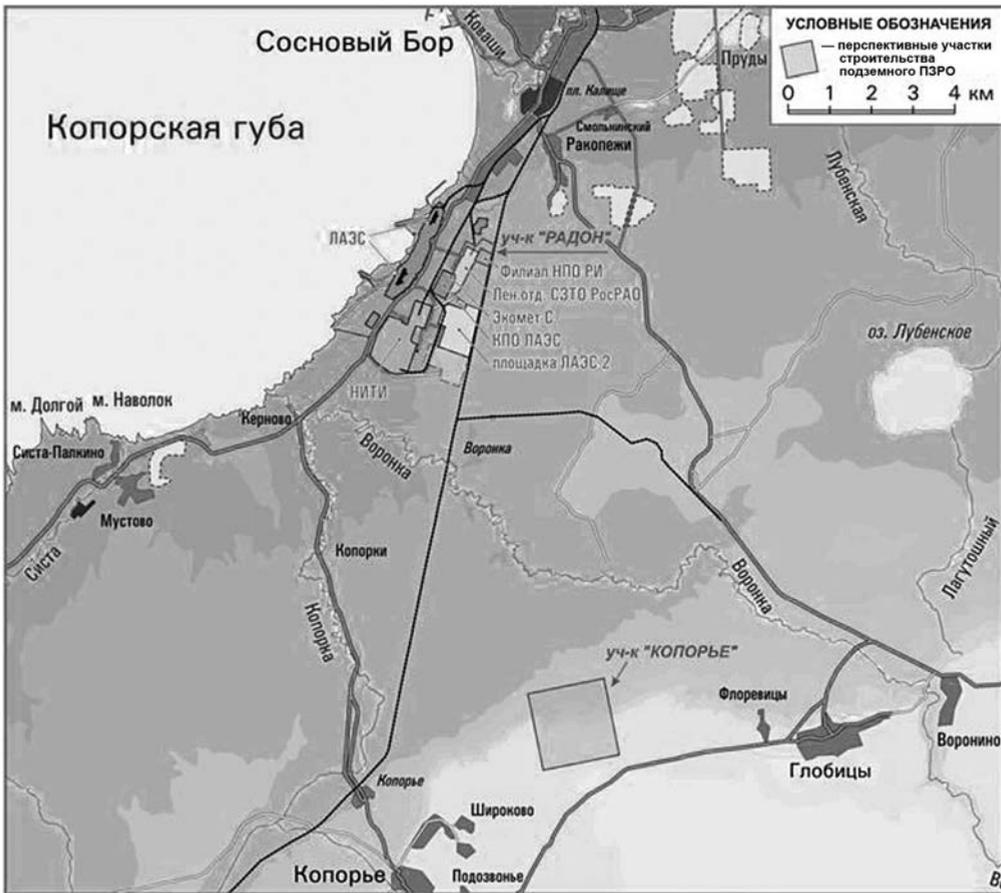


Рис. 2. Участки, перспективные для строительства ПЗО в протерозойских («Радон») и нижнекембрийских («Копорье») глинах Ленинградской области [6]

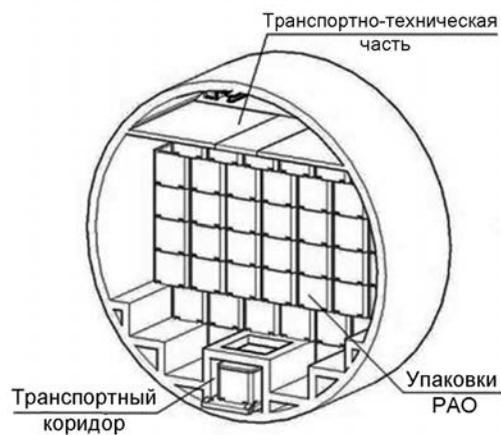


Рис. 3. Размещение контейнеров с РАО в ПЗО тоннельного типа [7]

фильтрации и неагрессивным по отношению к бетону составом подземных вод его долговечность будет определяться скоростью выщелачивания оксида кальция (минерал — известь).

В случае использования для строительства ПЗРО участка «Радон» подземные выработки будут расположены на глубине около 70 м, в пределах зоны водного насыщения. Здесь пустоты и поры пород полностью заполнены свободной и связанной водой. Таким образом, несмотря на довольно низкую водопроницаемость глин, в ее порах содержится некоторое количество влаги, которая неизбежно будет взаимодействовать с инженерными барьерами. Для оценки этого взаимодействия были смитированы условия проникновения вод в могильник. Следует отметить, что процесс коррозии бетона, тем более бетона, из которого изготавливаются контейнеры для РАО, чрезвычайно медленный. Но поскольку в рамках поставленной задачи важно оценить процессы длительностью в сотни лет, есть основания «ускорить» естественную коррозию бетона, искусственно увеличив «агрессивность» среды.

В качестве рабочих гипотез проникновения вод в ПЗРО были приняты 3 сценария:

— поровые воды из вмещающей толщи мобилизованы в результате нарушения ближней приконтурной зоны вследствие воздействия проходческого щита, с помощью которого создаются тоннели;

— подземные воды проникают либо из вышележащего (ломаносовского) водоносного горизонта, либо из нижележащего (гдовского) в результате тектонических нарушений (запроектная авария);

— поверхностные (подземные) воды вышележащих толщ попали в подземные сооружения из-за нарушения гидроизоляции шахт или наклонного хода (строительного тоннеля).

Так или иначе, можно предположить, что количество влаги, проникшей в подземные выработки, будет незначительным, а режим движения — практически застойным. Но в лаборатории смоделированы самые неблагоприятные, по сравнению с реальными, условия:

— всестороннее воздействие растворов на материал бетона (образцы полностью погружались в раствор);

— движение воды (имитируется периодической сменой растворов).

В случае любого из перечисленных выше сценариев проникновения вод в ПЗРО нельзя наверняка предсказать химический состав этих вод. Но, принимая во внимание, что подземные воды будут двигаться к упаковкам РАО либо через толщу котлинских глин, либо через засыпку (основной компонент засыпки — извлеченные при проходке котлинские глины), состав модельного раствора в экспериментах выбрали исходя из соотношений основных катионов и анионов вод, содержащихся в толще котлинских глин.

Изменение состава и длительность воздействия природных подземных вод были имитированы добавлением контактных растворов. Длительное воздействие вод с повышенными значениями рН моделировалось за счет насыщенных растворов гидрокарбоната натрия или 0,1М раствора едкого натра. Воздействие вод с кислой реакцией имитировалось добавлением растворов соляной кислоты со значениями рН — 0,1М и 1М.

Воздействие ионизирующих излучений на воду приводит к ее радиолизу, одним из продуктов которого является перекись водорода, оказывающая негативное воздействие на контейнеры. Для эксперимента был использован 0,1М раствор перекиси водорода. Кроме того, был приготовлен раствор, имитирующий воздействие основных макроэлементов подземных вод, с концентрацией в 140 раз выше, чем в среде вмещающих глин. В качестве индикатора потери массы, а значит, и прочности бетона выбран Са — компонент бетона, наиболее сильно подверженный выщелачиванию при воздействии агрессивных сред [8].

По результатам лабораторных экспериментов можно сделать следующие заключения:

— растворы 0,1М NaOH; 0,1М NaHCO₃ и имитаторы подземных вод с концентрацией в 140 раз выше реальных Na, K, HCO₃, SO₄, Cl оказывают незначительное воздействие на материал бетона;

— регистрируемое (до степени интенсивного) воздействие на материал бетона оказывают соляная кислота и перекись водорода.

Под воздействием кислых растворов происходит уменьшение массы образцов, что связано с преимущественным переходом в раствор кальция. Общие потери массы при выдержке бетона в 1М кислоте выше, чем при обработке 0,1М кислотой. Однако доля потери кальция в первом случае составляет 33–43, а во втором — 50–71%. Потеря кальция сопровождается механическими разрушениями бетона с образованием сети трещин, дезинтеграцией монолитной массы цемента, выпадением из образцов частиц наполнителя. Следовательно, в условиях кислой водной среды одновременно с потерей кальция происходит уменьшение прочностных свойств бетона защитных контейнеров.

Аналогичное явление разрыхления и начала дезинтеграции бетона произошло при воздействии на него в течение 40 дней 1М соляной кислоты (рН=0). В меньшей степени эффекты дезинтеграции проявляются под воздействием 0,1М соляной кислоты (рН=1).

Лабораторные эксперименты показали, что стабильность бетонной компоненты контейнера НЗК-150-1,5П будет сохраняться при условии высоких значений рН водной среды, проникшей в ПЗРО. В противном случае произойдет коррозия бетона с последующим разрушением контейнера и возможным выходом радионуклидов за пределы барьера.

Кислая среда водных подземных растворов оказывает негативное воздействие не только на сохранность бетонных инженерных барьеров, но и на условия миграции радионуклидов. Как известно, большинство радионуклидов имеют минимальную миграционную подвижность при близонейтральных или слабощелочных величинах рН и пониженных значениях Eh. При таких условиях среды подавляющая часть радионуклидов, включая долгоживущие, не распространяется на большие расстояния при разрушении инженерных защитных барьеров.

Незначительное выщелачивание кальция происходит при воздействии на бетон 0,1М раствора перекиси водорода, что было установлено по присутствию этого элемента в растворе после обработки образцов. Однако при взвешивании не было зафиксировано потерь массы, напротив, образцы прибавили в весе (не более 1 г при исходной массе около 20 г). Вероятно, в ходе эксперимента произошло образование новых минералов, мелкие кристаллы которых заполнили поры и трещины в бетоне и отмечены нами на поверхности образцов (рис. 4). Ранее было установлено, что при

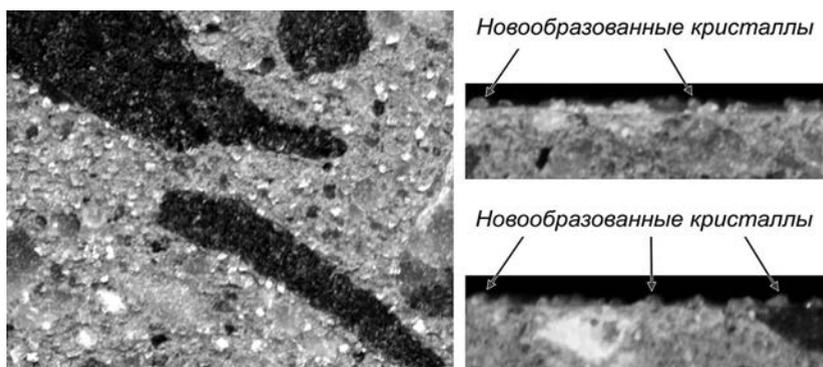


Рис. 4. Кристаллические новообразования на поверхности образцов бетона, выдержанного в 0,1М растворе перекиси водорода. Увеличено в 16 раз

выщелачивании цементов, кроме преобладающего по количеству оксида кальция (извести) образуются гидросиликаты кальция (гиролит, ксонотлит) [9].

После размещения контейнеров с РАО в подземных выработках оставшиеся пустые пространства заполняются сыпучими материалами, для чего используется дробленая порода, образующаяся при горнопроходческих работах, с добавками изоляционно-сорбционных компонентов. Пустоты и разуплотнения ликвидируются во внутренних подземных пространствах ПЗРО и во внешней приконтурной зоне за пределами креплений. В качестве инженерного барьера засыпка выполняет несколько конструкционно-технологических функций:

- сохраняет подземные конструкции ПЗРО от механического разрушения, которое может произойти под влиянием литостатического давления со временем;
- препятствует проникновению в заполненные РАО отсеки горных выработок подземных вод с последующим развитием фильтрационных миграционных процессов;
- материалы засыпки способны удерживать и поглощать радионуклиды, проникшие за пределы предыдущих инженерных барьеров.

Засыпка является переходной зоной геотехнологической системы подземной изоляции РАО, в которой присутствие извлекаемых при проходке горных пород обеспечивает совместимость с вмещающей геологической средой, а различные добавки будут ограничивать миграцию радионуклидов. Кроме вышперечисленных функций для засыпки требуется выбрать (или создать) такой материал, который бы обладал достаточными жестко-прочностными свойствами с одновременной пластичностью для заполнения разрывных нарушений и трещин, которые могут образоваться со временем в приконтурной зоне выработок (тоннеля). Свои барьерные функции засыпка должна сохранять на все время требуемой изоляции радионуклидов, что может быть обеспечено преобладанием в ее составе природных минеральных компонентов и сохранением изначальных геологических условий на участке ПЗРО. Засыпки или буферные закладки — это инженерный барьер, создаваемый на основе природных минеральных композиций, состав и способы размещения которого могут быть скорректированы в процессе заполнения подземных камер отходами.

Оптимальный состав засыпки для ПЗРО на площадке «Радон» определялся по двум критериям — изменениям набухаемости (как следствие — водопроницаемости, выраженной коэффициентом фильтрации) и сорбционных свойств.

Изменение водопроницаемости регулируется вариациями состава засыпки и ее насыпной плотности. Для лабораторных опытов использовались:

- котлинские глины, извлеченные при разбурировании интервала глубин предполагаемого ПЗРО;
- нижекембрийские глины Никольского месторождения Ленинградской области;
- активированный натрийсодержащими добавками бентонит Зырянского месторождения Курганской области (60–80% монтмориллонита).

В рамках эксперимента определялась зависимость водопроницаемости (коэффициента фильтрации) от времени нахождения в водной среде смесей глин различного состава. Смесь, состоящая из 70% котлинских глин и 30% активированного бентонита Зырянского месторождения, оказалась оптимальной в качестве гидроизолирующей среды в условиях избыточного увлажнения.

Такой же состав засыпки имеет максимальный коэффициент удержания ^{239}Pu , но для ^{137}Cs и ^{90}Sr наилучшими барьерными свойствами обладает смесь уплотненной котлинской и нижекембрийской глин. Однако последний состав не является оптимальным из-за водонепроницаемости (коэффициента фильтрации). Для окончательного выбора необходимо сравнить возможные уровни загрязнения подземных вод основными компонентами РАО ^{137}Cs и ^{90}Sr , для которых время изоляции составляет 300–500 лет, или незначительными количествами присутствующего в отходах ^{239}Pu , с периодом полураспада 24110 лет. Не исключаются вариации состава засыпки для «исторических» РАО и более близких по времени образования отходов, в которых долгоживущие радионуклиды отсутствуют.

В природных условиях по мере возрастания литостатической нагрузки (глубины погружения) происходят структурные изменения глин с отдачей части свободной воды, увеличением плотности и уменьшением пористости. В конечном результате уменьшается проницаемость глин. В лабораторном эксперименте взаимосвязь этих параметров выявляется в уменьшении водопроницаемости уплотненных образцов по сравнению с неуплотненными смесями глин. Уплотнение приводит к уменьшению количества и объема пустот и пор и, как следствие, — снижению скорости просачивания водных растворов через образцы глин. Уплотнение засыпок — необходимая техническая операция, которая производится в процессе загрузки РАО и при подготовке ПЗРО к закрытию и консервации.

При оценках радиоэкологической безопасности захоронения радиоактивных отходов анализируются и прогнозируются изменения системы изоляции во времени. Время является одним из главных факторов, определяющих безопасность ПЗРО и достоверность разработанного прогноза этой безопасности. В этом плане будем рассматривать два последовательных этапа — оперативно-эксплуатационный и перспективный (мониторинговый):

- интервал времени, в течение которого происходит загрузка РАО и консервация ПЗРО с возможностью оперативного вмешательства во все горно-технические и технологические операции;

- время после консервации ПЗРО и до окончания сохранения радиационно-токсической опасности наиболее долгоживущих радионуклидов, в течение которого проводится радиоэкологический мониторинг, а в случае необходимости — противоаварийные мероприятия.

Оперативно-эксплуатационный этап охватывает интервал времени 20–40 лет, в течение которого происходит загрузка ПЗРО. Тоннельный вариант строительства предусматривает доступный для посещения транспортно-технологический проем в кровлевой части ПЗРО над контейнерами (см. рис. 3). Наличие такого проема позволяет проводить наблюдения и отбор проб по всему объему размещенных в тоннеле упаковок РАО, включая донную часть подземной выработки, где может скапливаться проникающая в ПЗРО вода. По результатам внутреннего мониторинга могут быть скорректированы распределительно-загрузочные, защитные и контролирующие операции. Для оптимизации объемов и режима наблюдений, оперативного получения информации для принятия решений требуется создание подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), входящей в научно-эксплуатационное подразделение ПЗРО. Результаты предварительных лабораторных экспериментов и основанные на них расчетные данные должны быть проверены натурными исследованиями в ПИЛ. В случае необходимости проводится корректировка прогнозных данных или технологий отдельных процессов загрузки и создания защитных инженерных барьеров ПЗРО, использования буферных и закладочных материалов.

Перспективный (мониторинговый) этап начинается после консервации ПЗРО. Продолжительность наблюдений определяется периодом полураспада преобладающих изолируемых радионуклидов, который для ^{90}Sr и ^{137}Cs составляет 300–500 лет. Государственный стандарт Российской Федерации определяет мониторинг геологических формаций как часть мониторинга окружающей природной среды (экологического мониторинга) [10]. Выводы об условиях подземной изоляции РАО опираются на данные сети контрольных скважин, пробуренных в пределах горного отвода ПЗРО. Создается специальная система наблюдений за состоянием подземных выработок. Мониторинг должен быть комплексным, учитывающим начальные причины изменения условий подземной изоляции, каковыми являются активизация сейсмостектонических процессов и изменение климата, в первую очередь увеличение количества осадков. Для ПЗРО наиболее опасны разрывные нарушения, с последующим заполнением возникших каналов миграции подземными водами. На площадке «Радон» прогноз должен учитывать разломно-блоковую структуру кристаллического фундамента, залегающего под верхнекотлинскими глинами, наличие активных разломов, возможность образования наведенных землетрясений за счет резонансных процессов в земной коре. Изменения сейсмического режима или климата в районе расположения законсервированного ПЗРО требуют активизации радиоэкологического контроля, увеличения частоты замеров, разработки в случае необходимости превентивных мероприятий, снижающих вероятность появления аварийных ситуаций. Программа мониторинга должна быть связана с данными прогнозирования изменений геологической среды в районе размещения хранилища.

Негативные изменения условий подземной изоляции определяются активизацией миграционных процессов, способных вывести находящиеся в ПЗРО радионуклиды за пределы горного отвода в области активного водообмена. В 2013 г. опубликованы материалы по моделированию миграционных процессов для условий подземного хранилища на площадке «Радон» [11]. В качестве основной среды распространения радионуклидов в биосферу рассматривается высокопроницаемый горизонт четвертичных отложений, по которому подземные воды разгружаются

в Финский залив. Показано, что предполагаемое радиоактивное загрязнение будет распространяться преимущественно в западном и в меньшей степени в северном направлении. Вне зависимости от расположения места утечки расстояние, на которое могут мигрировать ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{60}Co за 50 лет будет ограничено первыми десятками метров. Для построения моделей в качестве исходных данных авторы исследования используют параметры водоносных горизонтов на участке предполагаемого строительства ПЗРО, существующие до завершения строительства ЛАЭС-2 и сооружения ПЗРО. Принятие этих данных для расчета моделей миграции некорректно, поскольку планировка строительных площадок, сооружение крупных зданий, градирен, прокладка дорог и коммуникаций вызывают изменения инженерно-геологических условий среды. Сооружение котлованов с последующим перемещением ранее извлеченных грунтов приводит к образованию зон повышенной проницаемости, нарушает существующий режим и направление движения не только грунтовых, но и ближайших к поверхности подземных вод. При строительстве крупных промышленно-энергетических объектов, таких как АЭС, формируется специфическая техногенно-природная среда, образованная ранее существующими геологическими и гидрогеологическими условиями, которые были изменены горнотехническими, инженерно-коммуникационными, мелиоративными и др. работами. Корректные исходные данные для разработки прогнозных моделей миграции радионуклидов из ПЗРО на площадке «Радон» должны соответствовать состоянию гидрогеологической среды после строительства ЛАЭС-2 и стабилизации гидрогеологического режима.

Кроме того, в процессе сооружения магистрального тоннеля ПЗРО могут быть выявлены трещины и ослабленные зоны в верхнекотлинских глинах, как это уже наблюдалось при строительстве метрополитена в Санкт-Петербурге [12]. Новая информация должна дополнять прогнозное моделирование, а при необходимости — служить обоснованием для разработки и внедрения мероприятий по ликвидации обнаруженных негативных явлений. Радиоэкологический прогноз включает условия применения противоаварийных действий, а также способы восстановления изоляции РАО.

Необходимо отметить, что принятие решений о создании радиационно опасных объектов должно быть согласовано с мнением жителей района предполагаемого строительства. При этом большинство населения и представители общественности не являются специалистами в области знаний о радиоактивности или радиационной экологии в требуемых объемах общеизвестных образовательных курсов, позволяющих оценивать безопасность подземной изоляции РАО [13]. Проект строительства ПЗРО на площадке «Радон» встретил негативную реакцию различных общественных движений [14]. Строительство ПЗРО воспринималось как «появление вблизи г. Соновый Бор нового радиационно опасного объекта». В действительности предлагается не создавать новый объект, а переместить накопленные и образующиеся РАО из временных поверхностных хранилищ в более безопасные условия пункта окончательной подземной изоляции. Аналогичная трактовка сложившейся ситуации была принята экологической организацией «Зеленый крест», пришедшей к заключению, что «замена старого хранилища на новое, современного типа, в толще глин — это требование безопасности и времени, и должно быть поддержано всеми защитниками окружающей среды» [15].

По результатам проведенных исследований площадка «Радон» по геологическим критериям удовлетворяет требованиям радиационной безопасности населения и окружающей среды на весь период потенциальной опасности РАО [16]. Продолжение исследований различных аспектов надежности барьерной системы проектируемого ПЗРО дополняет обоснование радиоэкологической безопасности для конкретных условий изоляции радионуклидов в пласте котлинских глин.

Литература

1. Козырев Д. В., Прозоров Л. Б., Прокопова О. А. и др. Перспективы использования площадок ФГУП «РосРАО» для окончательной изоляции радиоактивных отходов // Безопасность окружающей среды. 2009. № 3. С. 74–77.
2. Геология СССР. Т. 1. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Полезные ископаемые. М.: Недра. 1975. 326 с.
3. Кривохатский А. С., Дубровин В. С., Rogozin Ю. М. и др. О возможности создания хранилища радиоактивных отходов в залежах глин Ленинградской области // Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики. Апатиты. 1995. Часть 3. С. 34–40.
4. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты (г. Сосновый Бор Ленинградской области) / под ред. В. Г. Румынина. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2003. 248 с.
5. Ruminin V. G., Pankina E. B., Volckaert G. et al. Geotechnical, flow and transport properties of Kotlin (Vendian age) and Blue (Cambrian age) clays with respect to design of underground storage facilities for radioactive waste disposal in the north-west region of Russia // IV International Nuclear Forum. St. Petersburg, 2009. P. 195–210.
6. Савоненков В. Г., Андерсон Е. Б., Шабалев С. И. Глины как геологическая среда для изоляции радиоактивных отходов. СПб.: Издательский дом «ИнфоОл», 2012. 216 с.
7. Суханов И. А., Литвиненко А. Г., Сорокин В. Т. Создание пункта захоронения низко- и среднеактивных РАО в Ленинградской области // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. № 1. С. 59–63.
8. Гатауллин Р. М., Давиденко Н. Н. и др. Контейнеры для РАО низкого и среднего уровня активности / под ред. Сорокина В. Т. М.: Логос, 2012. 255 с.
9. Atabek R., Billon A., Brodwersen K. et al. Characteristics of buffer materials and radionuclide behavior in cementitious and clay barriers // Proc. Third Europ. Comm. Conf. on Radioact. Waste Manag. And Disposal. Luxebourg. 17–21 Sept. 1990. P. 364–377.
10. ГОСТ РФ 22.1.06-99. Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов. Дата введения 01.01.2000.
11. Мальковская В. И., Пэк А. А., Румынин В. Г. и др. Оценка безопасности подземного хранилища радиоактивных отходов в районе Ленинградской АЭС // Атомная энергия. 2013. Т. 114, вып. 4. С. 206–211.
12. Шатская Е. Ю. Инженерно-геологическое обоснование условий строительства и эксплуатации подземных транспортных сооружений в пределах исторической части Санкт-Петербурга: дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб., ГГИ им. Г. В. Плеханова, 2010.
13. Белозерский Г. Н. Радиационная экология: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 384 с.
14. Зернова Л. ПЗРО в Сосновом Бору: ОВОС и ныне там // Родной берег. Общественное движение жителей южного берега Финского залива. URL: <http://rodnoj-bereg.ru/pabl/ehkologija/4-1-0-61> (дата обращения: 20.12.2014).
15. Петербургу и Ленобласти необходимо новое хранилище радиоактивных отходов. URL: <http://rbcdaily.ru/industry/562949985086012> (дата обращения: 05.12.2014).
16. Глаголев А. В. Результаты наблюдений за состоянием недр в районе расположения ЯРОО должны быть модельно ориентированы, достоверны и регулярны // Электрон. журнал «Безопасность ядерных технологий и окружающей среды». 2015. № 7. URL: <http://www.atomic-energy.ru/interviews/2015/05/07/56766> (дата обращения: 05.08.2015).

References

1. Kozyrev D. V., Prozorov L. B., Prokopova O. A. et al. Perspektivy ispol'zovaniia ploshchadok FGUP "RosRAO" dlia okonchatel'noi izoliatsii radioaktivnykh otkhodov [Prospects of utilization of platforms of Federal State Unitary Enterprise ROSRAO for final isolation of radioactive waste]. *Bezopasnost' okruzhaiushchei sredy* [Safety of environment], 2009, no. 3, pp. 74–77. (In Russian)
2. *Geologiya SSSR. T. 1. Leningradskaia, Pskovskaia i Novgorodskaia oblasti. Poleznye iskopaemye* [USSR geology vol. 1. Leningrad., Pskov., Novgorod. region. Mineral resources]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 326 p. (In Russian)
3. Krivokhatskii A. S., Dubrovin V. S., Rogozin Iu. M. et al. O vozmozhnosti sozdaniia khranilishcha radioaktivnykh otkhodov v zalezkhakh glin Leningradskoi oblasti [Possibility of creation of storage of radioactive waste in deposits of clays of the Leningrad region]. *Ispol'zovanie podzemnogo prostranstva strany dlia povysheniia bezopasnosti iadernoi energetiki* [Use of underground resources of the country for increase of safety of nuclear power. Apatity], 1995, part 3, pp. 34–40. (In Russian)
4. *Otsenka vliianiia atomno-promyshlennogo kompleksa na podzemnye vody i smezhnye prirodnye ob'ekty (g. Sosnovyi Bor Leningradskoi oblasti)* [Assessment of influence of a nuclear industry on underground waters and adjacent natural objects (Sosnovy bor, Leningrad. region)]. Ed. V. G. Rumynina. St. Petersburg, St.-Petersburg University Press, 2003. 248 p. (In Russian)
5. Rumynin V. G., Pankina E. B., Volckaert G. et al. Geotechnical, flow and transport properties of Kotlin (Vendian age) and Blue (Cambrian age) clays with respect to design of underground storage facilities for radioactive waste disposal in the north-west region of Russia. *IV International Nuclear Forum*. St. Petersburg, 2009, pp. 195–210.
6. Savonenkov V. G., Anderson E. B., Shabalev S. I. *Gliny kak geologicheskaiia sreda dlia izoliatsii radioaktivnykh otkhodov* [Clays as geological environment for isolation of radioactive waste]. St. Petersburg, Publishing House "InfoOl", 2012. 216 p. (In Russian)
7. Sukhanov I. A., Litvinenko A. G., Sorokin V. T. Sozdanie punkta zakhoroneniia nizko- i sredneaktivnykh RAO v Leningradskoi oblasti [Creation of dumping point of radioactive wastes of low and medium activity levels- in the Leningrad. region]. *Bezopasnost' iadernykh tekhnologii i okruzhaiushchei sredy* [Safety of environment], 2011, no. 1, pp. 59–63. (In Russian)
8. Gataullin R. M., Davidenko N. N. et al. *Kontainery dlia RAO nizkogo i srednego urovniia aktivnosti* [Containers for radioactive wastes of low and medium activity levels]. Ed. by V. T. Sorokin. Moscow, Logos Publ., 2012. 255 p. (In Russian)
9. Atabek R., Billon A., Brodwarsen K. et al. Characteristics of buffer materials and radionuclide behavior in cementitious and clay barriers. *Proc. Third Europ. Comm. Conf. on Radioact. Waste Manag. And Disposal. Luxembourg. 17–21 Sept. 1990*, pp. 364–377.
10. GOST RF 22.1.06-99. *Monitoring i prognozirovaniie opasnykh geologicheskikh iavlenii i protsessov* [State Standard of the Russian Federation. Monitoring and forecasting of the dangerous geological phenomena and processes]. Moscow, GOST RF 22.1.06-99. 2000-01-01. (In Russian)
11. Mal'kovskaia V. I., Pek A. A., Rumynin V. G. et al. Otsenka bezopasnosti podzemnogo khranilishcha radioaktivnykh otkhodov v raione Leningradskoi AES [Assessment of safety of underground storage of radioactive waste around the Leningrad NPP]. *Atomnaia energiya* [Atomic energy], 2013, vol. 114, issue 4, pp. 206–211. (In Russian)
12. Shatskaia E. Iu. *Inzhenerno-geologicheskoe obosnovanie uslovii stroitel'stva i ekspluatatsii podzemnykh transportnykh sooruzhenii v predelakh istoricheskoi chasti Sankt-Peterburga*. Autoref. Diss. kand. geol.-miner. nauk [Engineering-geological validation of conditions of construction and operation of underground transport constructions within historical part of St. Petersburg. Cand. geol.-miner. sci. diss.]. St. Petersburg, GGI im. G. V. Plekhanova Publ., 2010. (In Russian)
13. Belozerskii G. N. *Radiatsionnaia ekologiya: ucheb. dlia stud. vyssh. ucheb. zavedenii* [Radiation ecology: textbook for university students]. Moscow, Izdatel'skii tsentr "Akademiia", 2008. 384 p. (In Russian)
14. Zernova L. PZRO v Sosnovom Boru: OVOS i nyne tam [Underground storage of radioactive waste in Sosnovyi Bor. EIA and nowadays there]. *Rodnoi bereg. Obshchestvennoe dvizhenie zhitelei iuzhnogo berega Finskogo zaliva* [Rodnoy bereg. Social movement of residents of the southern shore of the Gulf of Finland]. Available at: <http://rodnoj-bereg.ru/pabl/ehkologija/4-1-0-61> (accessed: 20.12.2014). (In Russian)
15. *Peterburgu i Lenoblasti neobkhodimo novoe khranilishche radioaktivnykh otkhodov* [St.-Petersburg and Leningrad. region need a new nuclear waste repository]. Available at: <http://rbcdaily.ru/industry/562949985086012> (accessed: 05.12.2014). (In Russian)
16. Glagolev A. V. Rezul'taty nabludeniia za sostoianiem nedr v raione raspolozheniia IaROO dolzhny byt' model'no orientirovany, dostoverni i reguliarni [Results of monitoring of a subsurface condition around

an locaton of YaROO have to be model oriented, reliable and regular]. *Elektron. zhurnal «Bezopasnost' iadernykh tekhnologii i okruzhaiushchei sredy»* [Electronic magazine "The safety of nuclear technology and environmental protection"], 2015, no. 7. Available at: <http://www.atomic-energy.ru/interviews/2015/05/07/56766> (accessed: 05.08.2015).

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2015 г.

Контактная информация:

Изотова Алена Викторовна — аспирант; galifrey_13@mail.ru

Белозерский Геннадий Николаевич — доктор физико-математических наук, профессор; g.belozerskiy@gmail.com

Савоненков Владимир Григорьевич — доктор геолого-минералогических наук; v.savonenkov@khlopin.ru

Шабалев Станислав Игоревич — руководитель лаборатории; s.shabalev@khlopin.ru

Izotova A. V. — post graduate student; galifrey_13@mail.ru

Belozerskiy G. N. — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; g.belozerskiy@gmail.com

Savonenkov V. G. — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; v.savonenkov@khlopin.ru

Shabalev S. I. — Head of Laboratory; s.shabalev@khlopin.ru