

*Н.Н.Мельников, В.П.Конухин, В.А.Наумов, П.В.Амосов, С.А.Гусак,
А.В.Наумов, Ю.Г.Смирнов, А.О.Орлов
Горный институт КНЦ РАН*

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОДЗЕМНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЯДЕРНЫХ И РАДИАЦИОННО-ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ

Введение

В Концепции национальной безопасности Российской Федерации в качестве приоритетного направления деятельности государства в экологической сфере выделяется предотвращение радиоактивного загрязнения окружающей среды и минимизация последствий произошедших ранее радиационных аварий.

Для европейского Севера России данное положение Концепции имеет исключительное значение, поскольку именно в этом регионе сосредоточена большая часть объектов хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), а также радиоактивных отходов (РАО), уже накопленных и вновь образующихся при эксплуатации судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ) и энергоблоков Кольской АЭС.

В комплексных исследованиях, связанных с решением проблемы обращения с РАО и ОЯТ в регионе, в настоящее время участвует целый ряд научно-исследовательских и проектных институтов Федерального агентства по атомной энергии (до 2004 г. – Минатома) и Российской академии наук, но единственной научно-исследовательской организацией, расположенной непосредственно в регионе и ведущей широкие исследования в данной области, является Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук.

В настоящей статье дана краткая информация о разработках Горного института, посвященных созданию научных основ радиогеоэкологии подземных объектов долговременного хранения и захоронения ядерных и радиационно-опасных материалов в геологических формациях европейского Севера России.

Выбор потенциальных площадок для размещения радиационно-опасных подземных объектов на европейском Севере России

При выполнении научно исследовательских работ в составе международных программ сотрудничества в области повышения радиационной безопасности в северо-западном регионе России были проанализированы цели, стандарты и критерии выбора площадок для размещения РАО и ОЯТ Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), национального законодательства стран Европейского союза и предписаний российских нормативных актов в рассматриваемой области.

В результате анализа был сформирован перечень критериев и предполагаемых характеристик для площадок, потенциально пригодных для размещения РАО /1,2/. Этот перечень был одобрен Межведомственной комиссией РФ по геологическому обеспечению обращения с РАО.

В 1960-1990 годы в северо-западном регионе России был выполнен комплекс исследовательских работ с целью поиска рудных месторождений, месторождений строительных материалов, а также для выявления запасов подземных вод и для проектирования гидротехнических и иных инженерных сооружений. При этом использовался широкий спектр методов исследований, позволивший создать обширную базу данных по геологическим, гидрогеологическим и инженерно-геологическим аспектам, которая была применена для выбора перспективных площадок /1-3/.

На первой стадии процедуры отбора площадок были исключены из рассмотрения территории месторождений полезных ископаемых, все зоны крупных тектонических разломов и повышенной трещиноватости, а также массивы пород с нестабильными свойствами.

На второй стадии был проведен детальный анализ геологической структуры и тектонической картины региона, его сейсмичности и палеосейсмичности, геоморфологии, геологических и гидрогеологических характеристик, а также топографии, климата, поверхностного стока и подземного водообмена.

На основе имеющейся информации были отобраны 16 площадок на территории Мурманской области, 6 площадок на материковой части Архангельской области и 3 площадки на архипелагах Новая Земля и Земля Франца Иосифа. По каждой из отобранных площадок для последующего анализа и сравнения была сформирована база данных, включающая подробное описание по всем вошедшим в перечень критериев характеристик.

По результатам анализа критериев и фактических данных по площадкам для дальнейшей оценки были рекомендованы площадки Кийявр, Дальние Зеленцы, Пояконда-Нигрозеро и Кузрека на Кольском полуострове, Большая Торожма и Шапочка на материковой части Архангельской области, губа Башмачная на архипелаге Новая Земля.

Поскольку не существует каких-либо жестких международных рекомендаций по оценке и сравнению площадок для размещения радиационно-опасных объектов, ранжирование площадок было выполнено на основе имеющейся практики и личного опыта экспертов. Критерии для ранжирования площадок были разделены на две категории: первая связана с природными, а вторая - с социально-экономическими условиями. Сущность процедуры ранжирования по каждому из принятых критериев для каждой площадки заключалась в определении расчетным

или экспертным путем характеристик площадки и сравнение их с критерием, и затем в определении количества баллов. В результате проведения полномасштабной процедуры ранжирования лучшими были признаны площадки Дальние Зеленцы и Кузрека. В качестве резервной была принята площадка Шапочка /1,2/.

Аналогичная процедура была применена и при выборе площадок для размещения подземного хранилища ОЯТ /3/. Предварительно выбранные площадки исследовались с точки зрения вероятности и степени воздействия как природных, так и антропогенных явлений при нормальном сценарии развития событий и при аварийных ситуациях. На основании работ, выполненных Горным институтом совместно с западноевропейскими партнерами и российскими организациями, список потенциальных площадок был ограничен следующими (см. рис. 1): Дальние Зеленцы (Мурманская область); в районе реки Кузрека (Мурманская область); на горе Шапочка (Архангельская область); в районе Сайда-губы (Мурманская область).

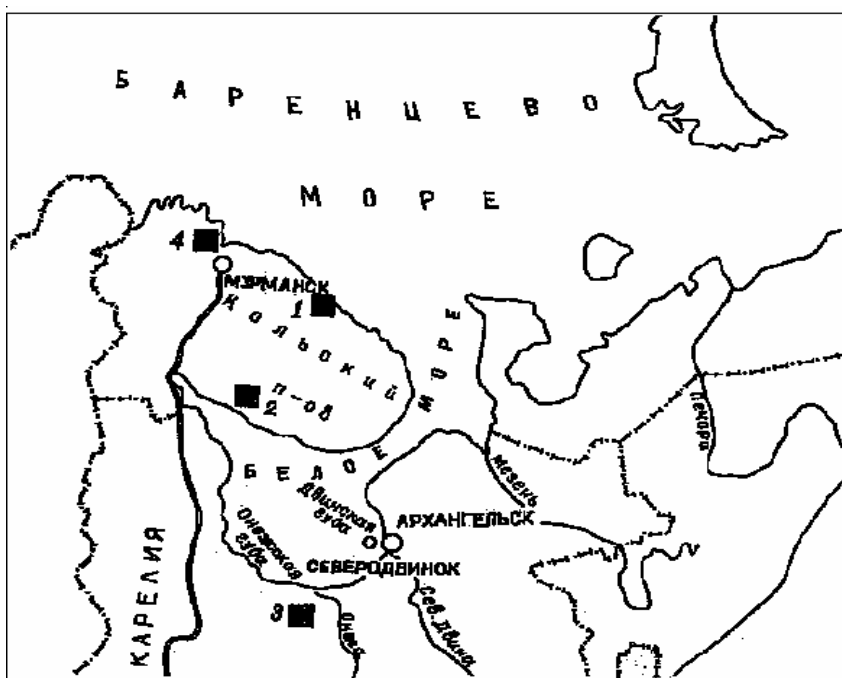


Рис. 1. Схема потенциальных площадок для размещения хранилища ОЯТ: 1 – Дальние Зеленцы; 2 – Кузрека; 3 – Шапочка; 4 – Сайда-губа.

Таким образом, три из четырех перспективных площадок пригодны для размещения, как подземного могильника кондиционированных РАО, так и подземного хранилища перерабатываемого ОЯТ.

Представленная методология выбора площадок может быть использована при решении аналогичных задач не только на европейском Севере, но и в других регионах России, имеющих аналогичные или близкие к ним природные условия.

При подготовке данного инновационного проекта были использованы базовые разработки по проектам программы TACIS, выполненным Горным институтом совместно с французскими фирмами ANTEA, BGRM и SGN.

Концептуальный проект подземного регионального могильника РАО

Концептуальный проект регионального могильника РАО - это результат работы большой группы российских и западноевропейских специалистов /4/. Была поставлена цель создать концептуальный проект экологически безопасного и экономически приемлемого могильника, предназначенного для захоронения твердых и отвержденных РАО объектов атомно-энергетического комплекса региона, а также выбор оптимально места его размещения.

Оценка объемов и характеристик кондиционированных РАО. В рамках международного проекта по программе TACIS /4/ была выполнена инвентаризация кондиционированных отходов, которые должны быть направлены на захоронение в предполагаемое подземное хранилище. Эта инвентаризация, в основном, базируется на концепции обращения с РАО в регионе, согласно которой планируется комплексная схема переработки и кондиционирования всех видов РАО.

Заключительной стадией кондиционирования отходов является их размещение в контейнерах. Российской проектной организацией ВНИПИЭТ были предложены различные типы бетонных и металлических контейнеров. Для концептуального проекта подземного хранилища была принята классификация кондиционированных отходов, согласно которой все контейнеры, предназначенные для окончательного захоронения, были дифференцированы в соответствии с мощностью дозы гамма-излучения

Рис. 2. Общая схема подземного могильника /4/.

Предварительная оценка безопасности могильника РАО. Долговременная безопасность подземного могильника РАО исследовалась для семи площадок северо-запада России /5/. Для шести из них (Кийявр, Дальние Зеленцы, Пояконда-Нигроззеро и Кузрека на Кольском полуострове; Большая Торожма и Шапочка в Архангельской области) проведены подробные расчеты переноса радионуклидов, в рамках которых выполнена также оценка мощности дозы, получаемой человеком в долговременной перспективе.

В оценке радиологического воздействия от могильника отходов основное внимание было сконцентрировано на следующих сценариях: сценарий нормальной эволюции (СНЭ) и вероятностные сценарии (ВС). В сценарии нормальной эволюции рассматривался только диффузионный перенос радионуклидов в предположении, что все барьеры в системе хранилища функционируют нормально на протяжении, по крайней мере, десяти тысяч лет, а геохимические условия в ближнем поле остаются оптимальными для удержания радионуклидов. Для вероятностных сценариев предполагалось повреждение некоторых инженерных барьеров или наличие разлома вблизи хранилища, последствием которых может стать более свободный доступ подземных вод к отходам, способный привести к ускоренному выщелачиванию.

Численное моделирование процессов в ближнем поле выполнялось с помощью компьютерного кода PORFLOW, разработанного в Лаборатории аналитических и вычислительных исследований (ACRi, США) и предназначенного для моделирования течения многофазных потоков, процессов тепло- и массопереноса в пористых средах с различной степенью насыщения. Результатами моделирования ближнего поля являются потоки и концентрации активности радионуклидов на границе раздела ближнего и дальнего поля, которые используются для изучения переноса радионуклидов в геосфере.

Для расчета переноса загрязнений с грунтовыми водами во вмещающей породе и водоносных горизонтах, составляющих дальнее поле, использовалась программа AQUA-3D, разработанная исландской фирмой Vatnaskil Consulting Engineers. Указанный компьютерный код позволяет методом конечных элементов моделировать условия течения в гетерогенной и анизотропной среде, откачивающие и нагнетательные скважины, а также пространственные изменения фильтрации и инфильтрации.

В оценках радиологических последствий облучения критической группы людей предполагалось, что радионуклиды, вышедшие из ближнего поля и перенесенные через дальнее поле, достигают биосферы через скважину, реку или озеро, а также через почву (за счет движения вверх загрязненных подземных вод). Для выполнения оценок в биосферной модели были подготовлены параметры наземных цепочек, поверхностных вод, дозовые коэффициенты, региональные почвенно-растительные параметры, параметры поверхностных вод, а также параметры потребления пищи человеком и животными. Результатом биосферных расчетов являются мощности дозы для каждого радионуклида, полученные путем перемножения предварительно рассчитанных значений приведенного дозового коэффициента и концентрации радионуклида для каждого из трех рецепторов (скважина почва и река).

В обобщенном виде результаты расчета суммарной годовой индивидуальной дозы для рассмотренных сценариев при поступлении радионуклидов через скважину и почву представлены в табл. 2.

В целом, результаты исследований позволили установить, что с точки зрения долговременной безопасности все рассмотренные площадки могут считаться приемлемыми для размещения могильника РАО.

Следует, отметить, что выполненные исследования представляет собой лишь предварительную оценку безопасности, в которой во многих случаях отсутствовали параметры, увязанные с конкретной площадкой или проектом, и был использован ряд предположений. Поэтому после окончательного выбора площадки следует провести оценку долговременной безопасности, учитывающей дополнительные опытные данные, относящиеся к безопасности.

Таблица 2

Годовая доза при различных путях поступления радионуклидов, Зв/год /5/

Площадка	Скважина		Почва	
	СНЭ	ВС	СНЭ	ВС
Кийявр	3.0E-07	3.6E-07	3.0E-08	3.2E-05
Дальние Зеленцы	1.0E-07	1.5E-08	5.0E-10	5.0E-07
Пояконда-Нигроззеро	1.0E-07	1.5E-08	4.0E-08	4.7E-05
Кузрека	3.0E-07	3.6E-07	2.0E-07	1.7E-04
Большая Торожма	4.0E-16	*	3.0E-17	*
Шапочка	2.0E-09	1.1E-08	3.0E-09	2.8E-06

(*) - не рассчитывалась, так как несущественна.

Для площадки на архипелаге Новая Земля предварительная оценка эксплуатационных характеристик была ограничена оценкой того, насколько слой многолетнемерзлых пород может оказаться потенциально пригодным для системы захоронения отходов, стабильной в ближайшем будущем. За основу был принят консервативный прогноз Hadley Centre's Global Climate Models, согласно которому ожидается рост

глобальной температуры до 2250 года, в частности, на 4 °С в течение первых 100 лет. Результаты выполненных исследований позволили сделать вывод, что площадка в многолетнемерзлых породах не пригодна для захоронения рассматриваемых отходов, содержащих значительное количество радионуклидов с периодом полураспада 30 или более лет.

Концептуальный проект подземного хранилища отработавшего ядерного топлива судовых ЯЭУ

Концептуальный проект подземного хранилища ОЯТ был разработан в рамках программы академических исследований, выполненных Горным институтом в 1999-2002 гг. /3/. Основная идея этого проекта состоит в использовании геологических формаций региона для безопасного долговременного хранения ОЯТ судовых ЯЭУ, которое в настоящее время не принимается на переработку промышленностью, главным образом, по причине отсутствия необходимых технических средств по его утилизации на производственном объединении «Маяк».

Концептуальная конструктивно-компоновочная схема подземного хранилища ОЯТ. Согласно предлагаемой концепции долговременного хранения ОЯТ предполагается создание подземного хранилища в приповерхностных геологических формациях на глубине около 100-150 м, сухой способ хранения упаковок с ОЯТ и многобарьерная система изоляции. В рамках этой концепции рассмотрены различные принципиальные схемы возможных решений по архитектуре подземного комплекса хранилища, основное отличие которых заключается в использовании различных по конструкции выработок доступа, имеющих различное функциональное назначение в части выполнения транспортных и вспомогательных операций. В качестве примера, на рис. 3 приведена схема подземного комплекса хранилища ОЯТ, при использовании которой главной выработкой доступа является уклон, а вертикальный ствол имеет вспомогательное назначение.

В качестве основных вариантов конструктивно-компоновочной схемы приняты конструкции модулей для хранения ОЯТ в металлобетонных контейнерах (МБК) или в чехлах, размещаемых во встроенной железобетонной конструкции. Эти конструкции позволяют достигать высокой плотности размещения ОЯТ, что приведет к уменьшению объемов горнопроходческих работ, снижению затрат на поддержание выработок, а также обеспечивают более широкие возможности контроля и управления процессами, происходящими в породном массиве и инженерных сооружениях как при строительстве, так и при эксплуатации хранилища.

Модуль для хранения топлива в контейнерах представляет собой камерную выработку сечением в свету 155 м² и длиной 77 м. Модуль разделен железобетонной перегородкой на зону приемки и зону хранения. Для доставки контейнеров с торца модуля устраивается транспортный заезд сечением 39 м² и длиной 30 м. С противоположной стороны модуля располагается вентиляционная сбойка сечением 18 м² и длиной 20 м.

Модуль для хранения топлива в чехлах, представляет собой камерную выработку сечением в свету 244 м² и длиной 62 м, которая дополнительно оснащена встроенной конструкцией. Встроенная конструкция состоит из железобетонных стен и перекрытия. В перекрытие встроены металлические трубы-колодцы, в которые размещают на хранение чехлы. Колодцы имеют герметичное основание и сверху закрываются герметичной заглушкой.

Следует отметить, что конструктивно-компоновочная схема хранилища ОЯТ предусматривает создание расширенной подземной инфраструктуры для обеспечения функционирования подземного комплекса. Вместимость и количество модулей позволяет принять на хранение все количество ОЯТ, независимо от формы их подготовки поставщиками (чехол или МБК).

Оценки безопасности при хранении ОЯТ. Обоснование безопасности является одним из основных положений предлагаемой концепции подземного хранилища ОЯТ. В соответствии с российскими нормативными документами и рекомендациями МАГАТЭ в рамках данной научно-технической задачи рассмотрены, как основные, следующие вопросы /3,6/: определение радиационных характеристик проблемных видов ОЯТ; отвод остаточных тепловыделений ОЯТ; обеспечение подкритичности системы хранения; обеспечение радиационной защиты персонала и населения.

Методика расчета изотопного состава ОЯТ основана на применении специализированных реакторных программ РИТМ и КРАТЕР, предназначенных для расчета ядерных реакторов как с учетом, так и без учета выгорания топлива в течение кампании. Эти программы описывают не только изменение во времени концентрации ядер из состава начальной загрузки (²³⁴U, ²³⁵U и ²³⁸U), но и определяют содержание в топливе еще 22 долгоживущих актинидов и осколков деления, играющих существенную роль в оценках ядерной и радиационной безопасности хранения ОЯТ. Для решения поставленной задачи была выполнена систематизация данных о реакторах ЯЭУ, с последующей разработкой упрощенных, но надежных (робастных) математических моделей. Результаты выполненных расчетов позволили определить ядерный и радиационный потенциал неперерабатываемого ОЯТ.

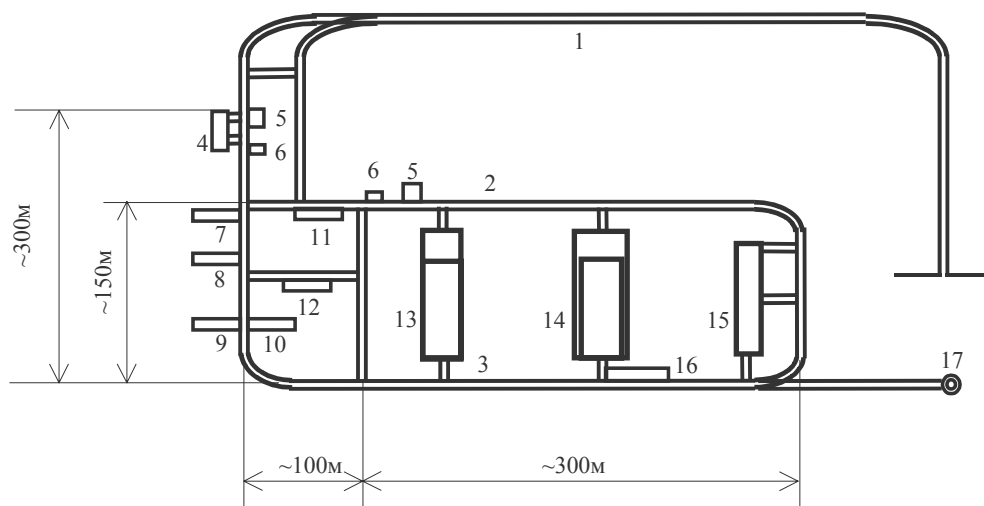


Рис. 3. Схема подземного комплекса хранилища ОЯТ /2,3/: 1 - транспортный уклон; 2 - транспортная галерея; 3 - вентиляционно-сборочная галерея; 4 - лаборатория; 5 - камеры насосов и фильтров; 6 - электроподстанция; 7 - компрессорная; 8 - мастерская и гараж; 9 - бетонный узел; 10 - склад материалов; 11 - участок приемки; 12 - пульт управления; 13 - модуль контейнеров; 14 - модуль чехлов; 15 - модуль РАО; 16 - камера очистки воздуха; 17 - вспомогательный ствол.

Целью исследований теплового режима хранилища являлось изучение возможности отвода остаточных тепловыделений за счет естественных процессов: теплопроводности, радиационного теплообмена и свободной конвекции. Численное моделирование процесса теплопереноса выполнялось с использованием программы FFM, позволяющей реализовать численное решение уравнения нестационарной теплопроводности в трехмерной постановке. Результаты выполненных расчетов позволили сделать вывод о том, что оптимизация компоновки хранилища позволяет обеспечить отвод остаточных тепловыделений без применения системы принудительного охлаждения упаковок с ОЯТ.

В задаче обоснования ядерной безопасности хранилища ОЯТ основное внимание было уделено изучению нейтронно-физических процессов для условий хранения топлива в чехлах, которое представляет научно-практический интерес с точки зрения специфики факторов, определяющих масштаб размножения нейтронов в системе хранения ОЯТ. При этом были рассмотрены как условия нормальной эксплуатации, так и аварийных ситуации, связанных с затоплением хранилища. Параметры размножения нейтронов в системе хранилища были изучены с помощью реакторной программы РИТМ, в которой уравнение переноса нейтронов решается методом последовательных столкновений. В обобщенном виде результаты выполненных исследований представлены на рис. 4.

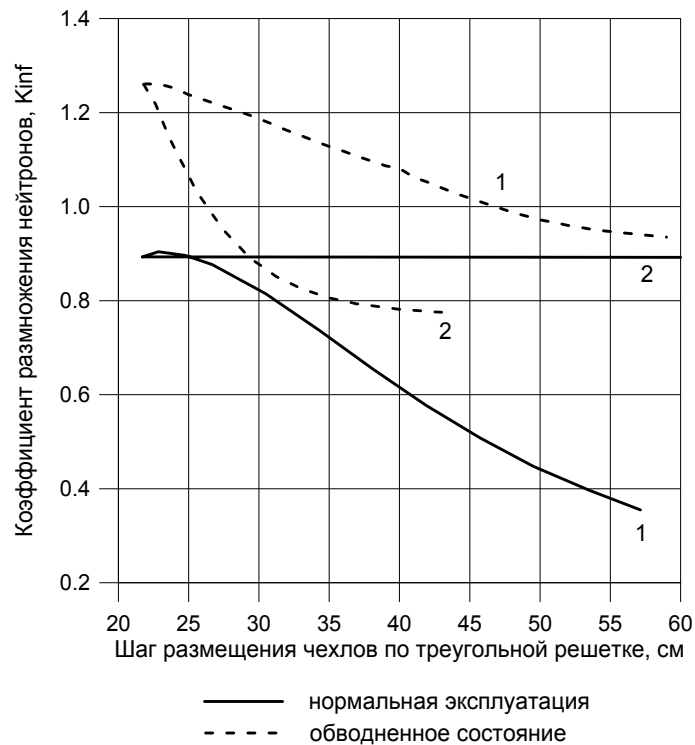


Рис. 4. Характеристика ядерной безопасности хранения чехлов с ОЯТ, размещаемых в модуле подземного хранилища /6/: 1 – в бетонном массиве; 2 – в воздушной среде.

Эти результаты, в частности, иллюстрируют параметры компоновки упаковок с топливом в модуле подземного хранилища, при которых обеспечивается гарантированный уровень подкритичности системы хранения ($K_{inf} \leq 0,95$) за счет внутренне присущих хранилищу свойств безопасности (физические свойства защитных барьеров и определенное пространственное размещение упаковок с топливом).

В рамках изучения радиационной безопасности персонала были выполнены расчеты, целью которых являлась оценка эффективности встроенной конструкции в подземном модуле хранилища как основного инженерного защитного барьера в условиях хранения ОЯТ в отдельных чехлах. Оценка дозовой нагрузки на персонал от воздействия ионизирующих излучений проводилась для отсеков встроенной конструкции, в которых содержатся трубные блоки с чехлами для уран-циркониевого и уран-бериллиевого ОЯТ, содержащие источники гамма-излучения (^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{154}Eu) с суммарной активностью примерно $2 \cdot 10^6$ Ки и источники нейтронов спонтанных делений (^{244}Cm и ^{238}Pu) интенсивностью примерно $5 \cdot 10^9$ нейтр/с.

Результаты расчетов прохождения нейтронного и гамма-излучения через защитные барьеры показывали, что бетон обладает эффективными защитными свойствами по отношению к рассмотренным источникам ионизирующих излучений. Эти свойства позволяют рекомендовать толщину защитного барьера встроенной конструкции 1 м при плотности бетона 2200 кг/м^3 .

В рамках обоснования радиационной безопасности населения были выполнены расчетные исследования геологической среды как контейнента долгоживущей активности для аварийного сценария. В этом сценарии предполагается, что в результате воздействия техногенного или природного характера хранилище переводится в объект неконтролируемого захоронения топлива с закладкой помещений объекта бетоном. Ставилась задача изучить миграцию долгоживущих наиболее радиотоксичных радионуклидов (временной период 10000 лет) во вмещающей геологической среде и выявить потенциал защитных свойств породного массива.

Численное моделирование переноса радионуклидов выполнялось с помощью программы PORFLOW на основе концептуального представления трехмерной миграционной модели, состоящей из нескольких слоев с различными значениями коэффициента гидравлической проводимости и пористости.

В качестве примера результатов расчетов, на рис. 5 показано пространственное распределение адсорбированной активности ^{90}Sr через 300 лет после аварии при гидравлическом градиенте $0,01 \text{ м/м}$.

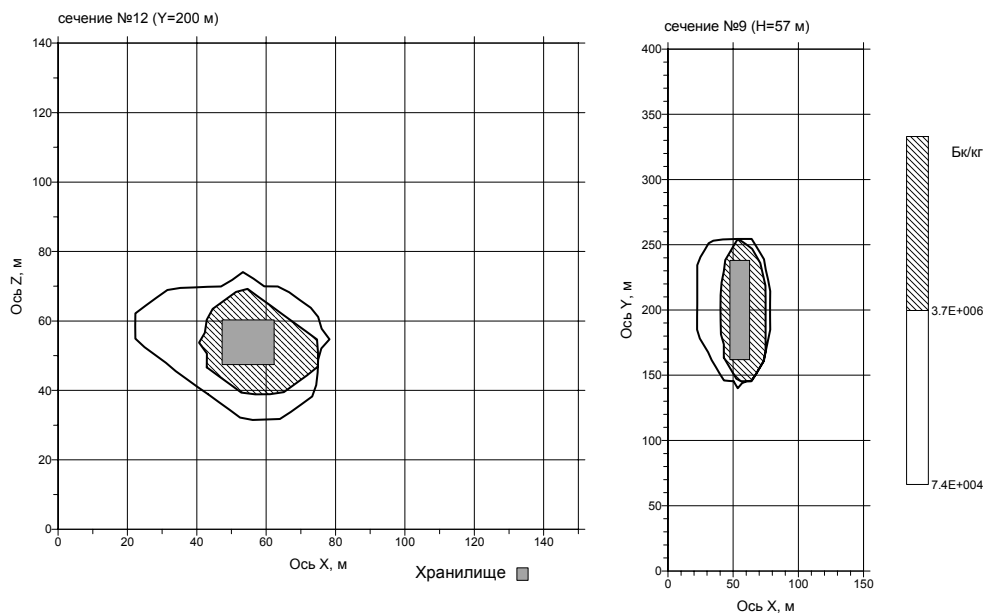


Рис. 5. Распределение во вмещающем массиве адсорбированной активности ^{90}Sr на 300 лет при гидравлическом градиенте $0,01\text{м/м}/3/$.

Выполненные исследования показали, что в результате сорбционного механизма задержки переноса радионуклидов и их радиоактивного распада обеспечиваются высокие изолирующие и защитные свойства вмещающих горных пород по предотвращению загрязнения среды обитания человека.

Выводы

Коллективом Горного института КНЦ РАН при сотрудничестве с отечественными и зарубежными организациями выполнены комплексные научно-исследовательские работы, направленные на обоснование выбора экологически безопасных технологий долговременного хранения и захоронения ядерных и радиационно-опасных материалов в стабильных геологических формациях. В рамках выполненных НИР разработаны три инновационных проекта и дано научное обоснование их концептуальных положений:

- выбор перспективных площадок для подземного размещения ядерно- и радиационно-опасных объектов;
- концептуальный проект регионального могильника РАО;
- концептуальный проект подземного регионального хранилища для долговременного хранения неперерабатываемого ОЯТ судовых ЯЭУ.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы в качестве научно-технического обоснования стратегии совершенствования системы обращения с РАО и ОЯТ на европейском Севере России, как составной части комплексной проблемы повышения радиационной и экологической безопасности окружающей среды и населения региона, а также при проектировании и строительстве подземных хранилищ ОЯТ и могильников РАО как на северо-западе России, так и в других регионах, имеющих аналогичные инженерно-геологические условия.

Литература

1. Определение подходящих площадок. Отчет по задаче 3 проекта R4.10/95 «Повышение безопасности обращения с радиоактивными отходами в северо-западном регионе России. Размещение радиоактивных отходов. Этап 2». - Горный институт КНЦ РАН - ANTEA-BRGM (Франция), 1998, 210 с.
2. Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А., Амосов П.В., Гусак С.А., Наумов А.В. Инновационные проекты подземных объектов долговременного хранения и захоронения ядерных и радиационно-опасных материалов в геологических формациях европейского Севера России. - Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2005, 111 с.
3. Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А., Амосов П.В., Гусак С.А., Наумов А.В., Катков Ю.Р. Отрабатываемое ядерное топливо судовых энергетических установок на европейском Севере России. В 2-х частях - Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2003.
4. Концептуальный проект регионального могильника для радиоактивных отходов, нарабатываемых в северо-западной России. Отчет по задаче 2 проекта R.4.10/95. «Повышение безопасности обращения с радиоактивными отходами в Северо-Западном регионе России. Размещение радиоактивных отходов. Этап 2». - Горный институт КНЦ РАН – ANDRA (Франция), 1998, 147 с.
5. Предварительная оценка безопасности. Отчет по задаче 6 проекта R4.10/95 «Повышение безопасности обращения с РАО в северо-западном регионе России. Размещение РАО. Этап 2». - Горный институт КНЦ РАН - Belgom (Бельгия), SCK•CEN (Бельгия), 2000, 238 с.

6. Melnikov N.N., Konukhin V.P., Naoumov V.A., Amosov P.V., Goussak S.A., Naoumov A.V., Katkov Yu.R., Smirnov Yu.G., Orlov A.O., Rybin Yu.Yu. A concept and assessment of the safety of long-term storage of spent nuclear fuel from ship power units in underground storage facility in the north-west region of Russia. - Proceedings of International conference on radioactive waste disposal «DisTec 2004», Berlin, April 26-28, 2004, pp. 540-554.