DOI: 10.25283/2587-9707-2024-1-69-83 УДК 621.039.7

К ВОПРОСУ ВЫБОРА СПОСОБА ЗАХОРОНЕНИЯ НИЗКО- И СРЕДНЕАКТИВНЫХ РАО

Д. И. Павлов[1], Г. С. Неуважаев[2], А. В. Дёмин[2], Г. С. Шульман[1], Е. Д. Демченко[1]

[1]АО «Компания инжиниринга и строительства «ИСТОК», Санкт-Петербург

[2]Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2023 г.

В статье рассмотрены различные способы приповерхностного захоронения низко- и среднеактивных РАО. Проведен анализ функций и конструктивных особенностей ряда инженерных барьеров безопасности ППЗРО. Показана целесообразность перехода от практики захоронения РАО в полузаглубленных пунктах захоронения к использованию наземных ППЗРО. Рассмотрены различные технические решения по их созданию, в частности препятствующие накоплению воды в сооружениях захоронения. Приведены результаты укрупненных оценок безопасности для данных решений.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, приповерхностные пункты захоронения радиоактивных отходов, инженерные барьеры безопасности, контейнеры для захоронения РАО, ограждающие конструкции, подстилающие экраны, системы отвода протечек, инспекционные галереи.*

Введение

На сегодняшний день в Российской Федерации эксплуатируется единственный приповерхностный пункт захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО) в закрытом административно-территориальном образовании (ЗАТО) «Новоуральск» [1]. Для захоронения всех накопленных и образующихся в РФ удаляемых радиоактивных отходов (РАО) 3 и 4 классов необходимо строительство еще нескольких таких пунктов. По данным [2], национальный оператор по обращению с РАО (ФГУП «НО РАО») рассматривает возможность размещения подобных объектов на территории Северо-Западного, Центрального, Уральского и Сибирского федеральных округов. В соответствии с этими планами разработаны проекты ППЗРО в ЗАТО «Озерск» [3] и ЗАТО «Северск» [4]. Их суммарная вместимость в Новоуральске, Озерске, Северске составляет около 0,425 млн м^3. Сопоставимые объемы накопленных и образующихся в Российской Федерации удаляемых низко- и среднеактивных РАО (НАО и САО) еще предстоит захоронить в новых (перспективных) ППЗРО, создаваемых с учетом опыта существующих проектов.

Для всех трех ППЗРО (ЗАТО «Новоуральск», «Озерск», «Северск») в проектной документации используются одинаковые решения — захоронение РАО 3 и 4 классов в полузаглубленных железобетонных сооружениях[1] (отсеках захоронения) с установкой РАО 3 класса в железобетонных контейнерах НЗК в нижнюю часть отсеков, а 4 класса в металлических контейнерах типа КРАД, КМ3 и бочках — в верхнюю часть.

[1] В нормативной документации РФ отсутствует термин «полузаглубленный ПЗРО». В настоящей статье под ними понимаются пункты захоронения, в которых нижние ярусы упаковок с РАО размещаются ниже поверхности земли, а верхние находятся выше или на одном с ней уровне.

Такой способ захоронения позволяет выполнить требования ПП № 1069 от 19 .10 .201 (в редакции требований до вступления в силу ПП № 1929 от 29 .10 .2022 о необходимости захоронения РАО 3 класса, размещаемых на глубине до 100 м (в полузаглубленном ППЗРО они размещаются ниже уровня земли, а 4 класса — выше), но имеет ряд недостатков.

Спорными для данного вида окончательной изоляции являются решения:

- по выбору именно полузаглубленного способа захоронения (он не имеет преимуществ ни подземного, ни наземного варианта и уязвим к поступлению грунтовых вод в отсеки захоронения) [5];
- размещению РАО разных классов в одних отсеках и, в частности, упаковок с САО под упаковками с НАО (в случае попадания воды в отсеки обводнёнными окажутся как раз те отходы, которые имеют бóльшую удельную активность) [6], [7]:
- использованию технических решений по гидроизоляции (глиняный замок) без систем защиты отсеков от переполнения дождевыми и грунтовыми водами (препятствие сценарию «bath tubbing») [8].

Отмечалось также [7], что решения по захоронению РАО в защитных бетонных контейнерах в бетонных отсеках требуют соответствующего обоснования, так как и те, и другие являются одними из основных составляющих стоимости ППЗРО.

В связи с тем, что к ПП № 1069 подготовлены изменения [9], вступающие в силу с 2024 года и пересматривающие подходы к классификации РАО по способам их захоронения, целесообразно вернуться к анализу вопросов выбора экономичного и безопасного способа приповерхностного захоронения НАО и САО.

О возможных способах приповерхностного захоронения РАО

Обзор зарубежных практик захоронения РАО [10], [11] показывает многообразие технологий окончательной изоляции НАО и САО.

Их размещают в пунктах захоронения на поверхности и под землей на различной глубине, используют разнообразные материалы и конструкции инженерных барьеров безопасности (ИББ).

Варианты возможных принципиальных решений по выбору способа приповерхностного захоронения НАО и САО и ИББ приведены на рис .1. Их сочетания приводят к тому, что в конечном итоге получается множество конечных модификаций конструкций ППЗРО.

Для выбора оптимального решения необходима привязка пункта захоронения к конкретной площадке и количественные оценки безопасности и стоимости каждого варианта (т .е. моделирование миграции радионуклидов, расчеты дозовых нагрузок, капитальных и эксплуатационных затрат). Такая задача для всех возможных конструкций ППЗРО достаточно сложна и очень трудоемка.

В связи с этим далее приведено сравнение достоинств и недостатков различных способов приповерхностного захоронения РАО и ряда конструктивных особенностей ИББ, которое позволяет отсечь менее перспективные варианты без определения экономических затрат и выполнения расчетов по миграции радионуклидов. Для принципиально различающихся решений (в частности, по выбору материала подстилающего экрана), когда качественное сравнение не позволяет однозначно отдать предпочтение лучшему, выполнены укрупненные оценки безопасности.

Вопросы обоснования выбора материалов буфера и покрывающего экрана в настоящей статье не рассматриваются.

О заглубленном и наземном способе захоронения РАО

Качественное сравнение достоинств и недостатков приповерхностных способов окончательной изоляции РАО выполнялось в работах [5], [11]. Отмечалось, что полузаглубленный метод захоронения, обладая недостатками наземного варианта, не имеет достоинств, присущих подземному способу [5].

В работе [11] приводился обзор технических решений захоронения РАО в европейских странах. Был отмечен тренд на отказ от строительства полузаглубленных конструкций ППЗРО. В частности, более чем из двадцати ПЗРО для НАО и САО, построенных или проектируемых в странах Европы, такими являются только три: Drigg (Великобритания) [12], Dukovany (Чехия) [13], Buryakivka (Украина) [14].

В США такой тенденции не отмечается, однако ППЗРО, заглубленные относительно поверхности земли, размещаются на территориях, характеризующихся низким уровнем грунтовых вод и малым количеством осадков. Например, захоронение РАО в ППЗРО Andrews, расположенном в штате Техас (США), осуществляется в заглубленном относительно поверхности земли котловане в докумских глинистых формациях мощностью около 200 м [15]. Низкий уровень грунтовых вод (более 150 м от основания сооружений захоронения) и сухой жаркий климат (менее 40 см осадков в год) позволяют захоранивать РАО без

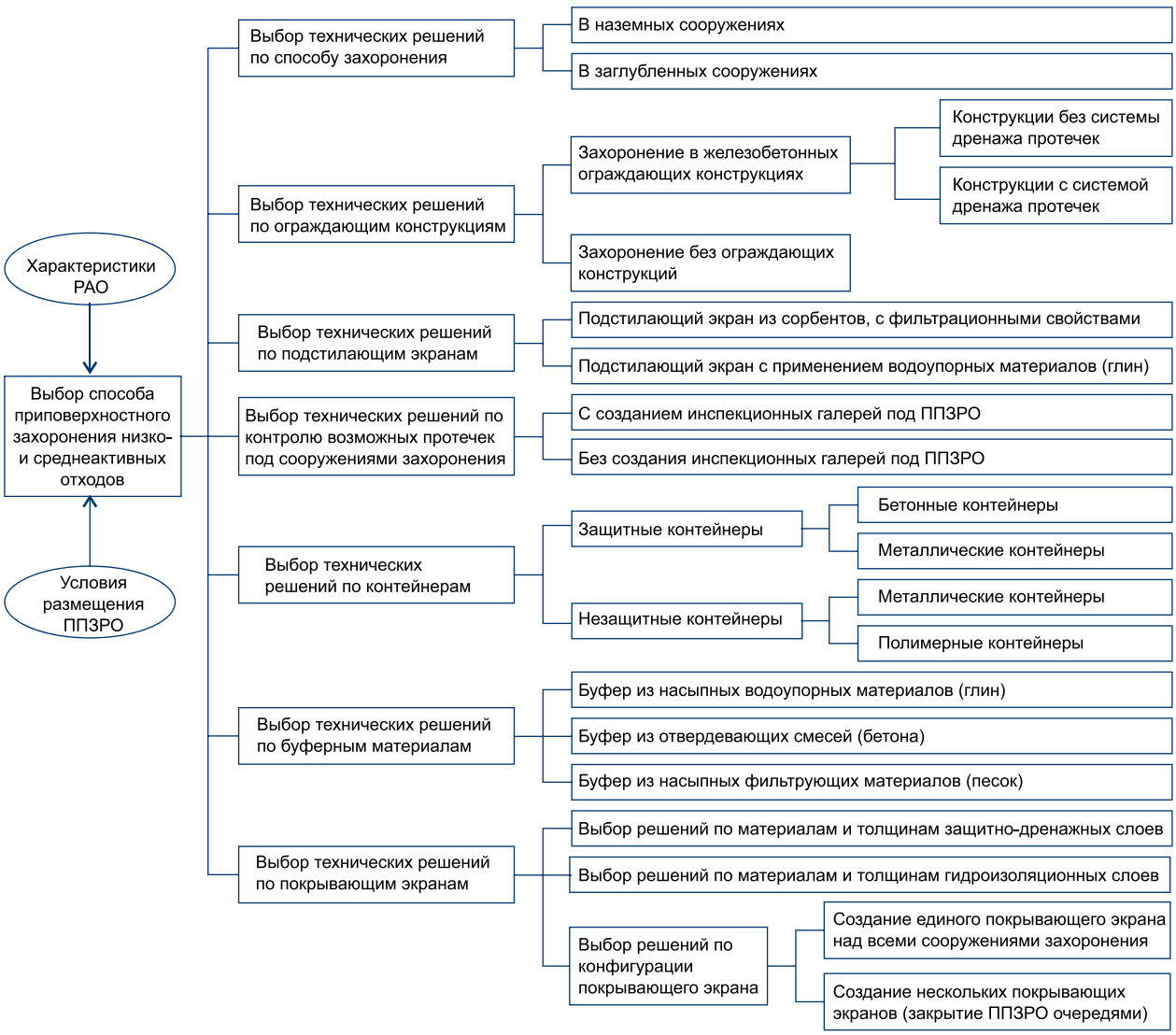


Рис. 1. Варианты различных технических решений для приповерхностного захоронения НАО и САО

каких-либо инженерных систем, предназначенных для защиты от осадков, а извлеченная при создании котлована порода (красная глина) используется для засыпки пустот и возведения покрывающего экрана (рис. 2).

Рис. 2. Захоронение РАО в США (штат Техас) [15]

В умеренном и влажном климате захоронение РАО в котлованах или траншеях приводит к проблемам, связанным с необходимостью отвода воды, накапливающейся после выпадения осадков или колебания уровня грунтовых вод.

По данным [16], попытки захоронения РАО в траншеях во Франции приводили к обводнению упаковок, в результате чего в конечном счете был выбран наземный способ для НАО и САО (рис .3) [17], тиражируемый в настоящее время во многих других странах (Испания, Литва, Корея и пр.). Российская практика размещения РАО в полузаглубленных хранилищах, возводимых в прошлом веке без намерения извлечения из них отходов, также показывает, что в большинстве случаев упаковки с ними со временем были затоплены водой (анализ опыта эксплуатации данных хранилищ представлен в статье [18]).

Французский опыт захоронения РАО в наземных и заглубленных ППЗРО показывает, что для

Рис. 3. Этапы выбора способов захоронения РАО во Франции (вверху слева — в заглубленных траншеях (1969 г.); вверху справа — на наземном бетонном основании без использования укрытия от осадков (1985 г.); внизу — современное наземное ПЗРО с бетонными отсеками, укрытием для защиты от осадков и инспекционной галереей для сбора и контроля протечек (внизу справа показан отбор проб в инспекционной галерее) [16], [17]

полузаглубленных пунктов характерно наличие следующих проблем:

- понижение их донной части относительно отметки планировки площадок приводит к приближению упаковок с РАО к водоносным горизонтам и, соответственно, к более вероятному (по сравнению с наземным вариантом) выходу радионуклидов в окружающую среду, а также к рискам, связанным с их обводнением вследствие поднятия уровня грунтовых вод и появления верховодки в межсезонный период;
- значительное количество осадков, характерное для большинства площадок, требует регулярной откачки воды из отсеков захоронения в процессе их заполнения. При этом для полузаглубленного варианта ППЗРО организация самотечной дренажной системы невозможна (требуется проектирование напорной системы водоотвода в процессе его заполнения).

Сравнение наземного и полузаглубленного способов захоронения РАО приводилось и в отечественных публикациях [5], [11]. Согласно [5] создание полузаглубленных ППЗРО возможно при размещении на слабопроницаемых (глины) или хорошо проницаемых (пески) грунтах в засушливых районах с низким уровнем грунтовых вод. В остальных случаях (т .е. для большинства регионов РФ) целесообразно выбирать наземный способ захоронения РАО как более универсальный (по сравнению с полузаглубленным) и экономичный (по сравнению с заглубленным на несколько десятков метров).

О выборе решений по ограждающим конструкциям и контейнерам ППЗРО

В соответствии с НП-069-14 «Приповерхностное захоронение РАО. Требования безопасности» конструкция сооружений ППЗРО, состав и свойства барьеров безопасности должны определяться и обосновываться в проектной документации. Проектной документацией на ППЗРО в ЗАТО «Новоуральск», «Озерск», «Северск» предусмотрено захоронение среднеактивных РАО в бетонных контейнерах НЗК, установленных в бетонных ограждающих конструкциях — отсеках захоронения. В материалах оценки долговременной безопасности (ОДБ) данных ППЗРО и контейнеры, и отсеки рассматриваются как барьеры на пути миграции радионуклидов с разницей только в сроке службы (НЗК — 300 лет, отсеки — 100 лет).

Разница в сроках службы ограждающих конструкций и контейнеров и в целом вопросы их влияния на безопасность и стоимость ППЗРО обсуждались в ряде публикаций. В [19] предлагалось предъявить требования к ограждающим конструкциям, которые позволили бы получить отсеки с характеристиками, аналогичными контейнеру НЗК (срок службы не менее 300 лет, герметичность и пр.). В работе [20] предлагалось перейти от практики использования железобетонных контейнеров к металлическим. В статье [21] предлагалось рассмотреть вариант с захоронением контейнеров НЗК без ограждающих конструкций (отсеков). Важность решения данных вопросов отмечалась в публикации [22], в которой поднимались глобальные вопросы функционирования единой государственной системы обращения с РАО.

Следует отметить, что в международной практике захоронения РАО встречаются варианты как с ограждающими конструкциями в системе ИББ, так и без них.

На рис. 4 приведены примеры зарубежных ППЗРО с размещением железобетонных упаковок с РАО в железобетонных отсеках и без них.

В тех регионах, где климатические условия позволяют проводить работы на открытом воздухе, захоронение РАО осуществляется без ограждающих конструкций, а в тех регионах, где необходима защита от атмосферных воздействий, предусматриваются отсеки с укрытиями. При этом ограждающие конструкции ППЗРО оснащены системами дренажа атмосферных осадков на период загрузки упаковок и, как правило, устройствами отвода возможных протечек на период активного контроля.

Они предусмотрены в ППЗРО Франции, Бельгии, Испании, Болгарии, Японии и предназначены для того, чтобы избежать накопления воды в массиве упаковок с РАО в случае нарушения целостности гидроизоляции покрывающего экрана (в терминологии бельгийского ППЗРО [24] такая система именуется «antibathtub system», т.е. препятствующая развитию сценария переполнения). Необходимость учета такого варианта обосновывалась и для российских пунктов захоронения в статье [27].

Для обслуживания устройств отвода протечек в некоторых ППЗРО в составе ограждающих конструкций предусматриваются инспекционные галереи (рис. 5).

Данная схема на примере той, что представлена на рис. 5, требует регулярного обслуживания и особых решений по ее закрытию, а до этого

Рис. 4. Захоронение железобетонных контейнеров с РАО в ограждающих конструкциях и без них: слева вверху — Франция [23]; справа вверху — Бельгия [24]; внизу слева — США, штат Южная Каролина [25]; внизу справа — ЮАР [26]

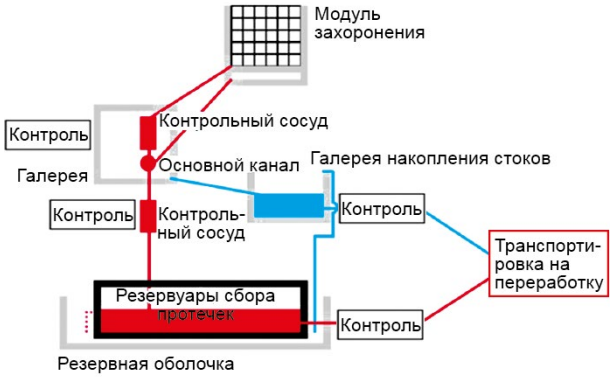


Рис. 5. Схема системы отвода протечек ППЗРО с инспекционной галереей и комплексом инженерных сооружений (резервуаров, трубопроводов) для сбора и контроля дренируемой воды (Бельгия [24])

Таблица 1. Функции ограждающих конструкций и контейнеров

Основные функции ограждающих конструкций	Основные функции контейнеров
• биологическая защита персонала площадки ППЗРО (согласно ОСПОРБ-99/2010 мощность дозы на поверхности сооружений – не более 0,6 мкЗв/ч); • ограждение («опалубка») для засыпки буферного материала; • препятствие техногенным и природным воздействиям на период от закрытия отсеков захоронения до возведения покрывающего экрана; • восприятие механических нагрузок на контейнеры от покрывающего экрана	• биологическая защита при транспортировке и обращении с ними (согласно НП-053-16 мощность дозы на поверхности контейнера – не более 2 мЗв/ч); • предотвращение проникновения воды к их содержимому; • препятствие выходу радионуклидов из их содержимого

момента (т. е. заполнения всех пустот буферными материалами) создает потенциальные условия для миграции радионуклидов между границей подстилающего экрана и внешней средой (емкостью для сбора стоков).

По этой причине в настоящее время некоторые страны выбирают конструкции сооружений захоронения без инспекционных галерей. Например, современные проекты ППЗРО в Литве [28] (объект «B-25») и Словении/Хорватии [29] (для РАО АЭС Кршко), разработанные, в частности, на основе французского опыта, не предполагают наличие инспекционных галерей, а используют пассивные системы отвода протечек, не позволяющие реализоваться сценарию переполнения (за счет конструктивных решений в основании ограждающих систем, осуществляющих постепенную инфильтрацию просачивающихся в отсеки осадков). Контроль за стоками после закрытия ППЗРО при этом осуществляется регулярным отбором проб через наблюдательные скважины по периметру сооружений захоронения.

Наличие систем отвода протечек в ограждающих конструкциях и подходы к их использованию (или не использованию) за рубежом наглядно показывают различия в функциях, выполняемых ими и контейнерами в системе ИББ ППЗРО (табл. 1).

Применительно к российским климатическим особенностям, фактическому состоянию контейнерного парка, требованиям отечественной нормативной документации (ОСПОРБ-99/2010, НП-064-17, НП-053-16, НП-069-14, НП-093-14) можно констатировать, что и ограждающие конструкции, и защитные контейнеры для приповерхностного захоронения необходимы, но технические решения по их конструкции и срокам службы должны приниматься индивидуально для каждого ППЗРО, исходя из удельной

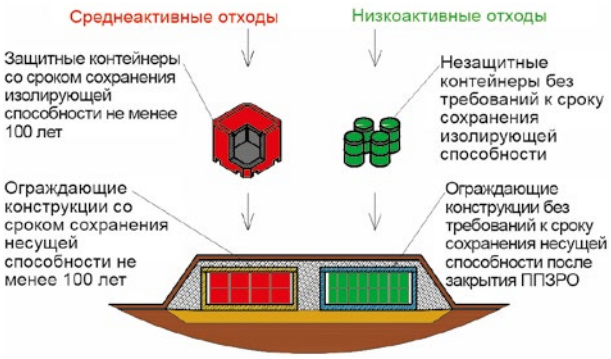


Рис. 6. Выбор решений по глубине размещения, контейнерам и ограждающим конструкциям для перспективных наземных российских ППЗРО

активности и радионуклидного состава захораниваемых РАО (рис. 6).

Если упаковки не рассчитаны на нагрузки от покрывающего экрана, то ограждающие конструкции отсека должны обеспечивать несущую способность в течение того срока, который назначен контейнеру как барьеру на пути миграции радионуклидов. Обеспечение несущей способности железобетонных ограждающих конструкций (для восприятия нагрузок от покрывающего экрана) на уровне срока сохранения изолирующей способности контейнера НЗК (около 300 лет) видится вполне достижимой задачей при условии проектирования таких конструкций с запасом прочности.

Они должны оснащаться самотечной дренажной системой со сбором и контролем стоков на период загрузки РАО. При проектировании ППЗРО целесообразно предусматривать пассивную систему отвода возможных протечек (без инспекционных галерей), препятствующую развитию сценария переполнения после его закрытия. При условии разработки ограждающих конструкций с системами отвода протечек

требования к их изолирующей способности могут не предъявляться.

О выборе решений по подстилающим экранам ППЗРО

Вопросы отвода протечек из ограждающих конструкций прямо связаны с выбором решений по их устройству и материалу подстилающего экрана.

В российских проектах ППЗРО [1], [3], [4] основным сырьем для него является глина — по периметру и нижней части сооружений захоронения организуется так называемый глиняный замок, обеспечивающий гидроизоляцию сооружений захоронения. В случае возможных протечек через покрывающий экран, подстилающий экран будет препятствовать выходу загрязнения в грунтовые воды. Решения, обеспечивающие их отвод во избежание накопления в зоне захоронения, не предусмотрены. Результаты численного моделирования влагопереноса для таких ППЗРО [6] показывают, что как минимум нижние ярусы упаковок будут затоплены.

В зарубежных проектах ППЗРО встречаются решения с организацией подстилающего экрана из природных сорбентов, способных пропускать воду и обеспечивать поглощение выходящих с ней радионуклидов, например конструкция ИББ, предусмотренная проектом ППЗРО для РАО АЭС Козлодуй (Болгария) [30] (рис. 7).

Рис. 7. Конструкция верхнего и нижнего экранов ППЗРО для АЭС Козлодуй [30]

Слой лёссово-цементной подушки инженерного засыпного барьера обеспечивает геотехнически устойчивый фундамент данного ППЗРО, повышает толщину ненасыщенной зоны под ячейками захоронения и состоит из выбранных почв участка (т.е. лёссовых пород, обнаруженных на участке), смешанных с добавкой 5% цемента. Вместе эти компоненты, в соответствии с их поглощающей способностью, действуют как сорбционный барьер для замедления миграции радионуклидов, растворенных в воде, протекающей через дно сооружений захоронения.

Для ППЗРО АЭС Козлодуй выполнялись расчеты миграции радионуклидов, по результатам которых была отмечена эффективность работы лёссово-цементного сорбционного подстилающего экрана. На рис. 8 показаны данные по поступлению радионуклидов ^{14}C, высвобождающихся из железобетонных сооружений захоронения в данный слой (красная линия) и из него в нижележащие пласты песка (синяя линия).

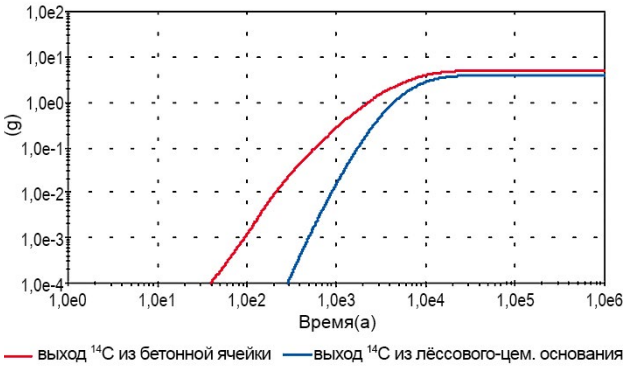


Рис. 8. Замедление ^{14}C в лёссово-цементном подстилающем экране [30]

Поскольку сорбционная способность лёссово-цементного материала довольно высока, может наблюдаться значительное замедление выхода радионуклидов порядка сотен или даже тысяч лет.

Решение по организации сорбционного слоя в подстилающем экране реализовано и для пункта захоронения очень низкоактивных РАО (ОНРАО) в Швеции на АЭС Oskarshamn. Фундамент данного ППЗРО оснащен дренажными канавками, по которым вода должна стекать в сторону слоя из смеси ракушечника, песка и торфа, обеспечивающего ее инфильтрацию и поглощение радионуклидов (рис. 9).

В Российской Федерации попытка внедрения технических решений по использованию

Рис. 9. Пункт захоронения ОНАО в Швеции на АЭС Oskarshamn [31]

сорбционного слоя в подстилающем экране была предпринята при проектировании пункта временного хранения ОНАО в губе Андреева [32], где в качестве него было предложено использовать смесь из песка (60 %) и цеолита (40 %).

Для данного объекта были выполнены многовариантные расчеты миграции с различным расположением сорбционного слоя: на краю бетонной фундаментной плиты, частично под и на ней (рис. 10).

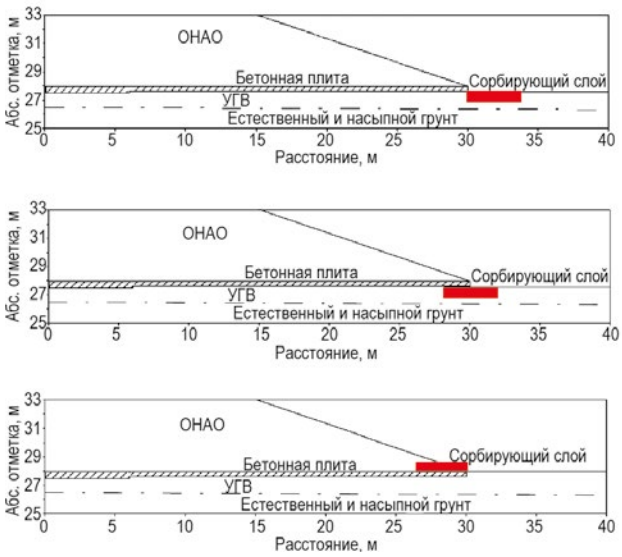


Рис. 10. Варианты организации сорбирующего слоя для пункта временного хранения ОНАО в губе Андреева (сверху – расположение на краю фундаментной плиты, посередине – частично под ней, внизу – на плите) [32]

В расчетной модели предполагалось, что поступление радионуклидов в окружающую среду происходит вследствие их вымывания из ОНАО инфильтрационным потоком с его переносом по бетонной фундаментной плите к краю, откуда радионуклиды попадают в сорбционный слой, а затем в водоносный горизонт, в котором происходит их горизонтальный перенос с грунтовыми водами.

Расчеты миграции радионуклидов для пункта временного хранения ОНАО в губе Андреева доказали эффективность использования сорбционного слоя. Результаты расчетов представлены в табл. 2, в которой в строке «объемная активность» приведены два числа: верхнее соответствует расстоянию 2 м от края плиты, нижнее — 10 м от плиты, в строке «поступление в воду» верхнее число — поступление радионуклидов из могильника в водоносный горизонт, нижнее — в губу Андреева. Доза облучения населения оценивалась из результатов, по которым поступлению 10^{10} Бк/год соответствует доза примерно 10 мкЗв как для ^{90}Sr, так и для ^{137}Cs.

Таблица 2. Результаты расчетов миграции радионуклидов из пункта временного хранения ОНАО в губе Андреева для различных вариантов организации сорбирующего слоя [32]

Расчетный параметр	Вид расчета для нуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs					
	Сорбирующий слой на краю фундаментной плиты		Сорбирующий слой частично под фундаментной плитой		Сорбирующий слой на фундаментной плите	
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
Объемная активность, Бк/л	0,95 0,62	0,25 0,12	0,57 0,38	0,12 0,065	0,66 0,45	0,10 0,05
Поступление в воду, Бк/год	$8{,}0\cdot10^{5}$ $6{,}2\cdot10^{5}$	$2{,}4\cdot10^{5}$ $1{,}2\cdot10^{5}$	$5{,}0\cdot10^{5}$ $3{,}6\cdot10^{5}$	$1{,}2\cdot10^{5}$ $6{,}0\cdot10^{4}$	$5{,}0\cdot10^{5}$ $4{,}5\cdot10^{5}$	$7{,}5\cdot10^{4}$ $5{,}0\cdot10^{4}$
Доза облучения, мкЗв/год	$6{,}2\cdot10^{-4}$	$1{,}2\cdot10^{-4}$	$3{,}6\cdot10^{-4}$	$6{,}0\cdot10^{-5}$	$4{,}5\cdot10^{-4}$	$5{,}0\cdot10^{-5}$
Время максимума облучения, год	30	70	30	70	40	100

Из табл. 2 видно, что сорбирующий слой уменьшает возможное облучение населения, связанное с ^{90}Sr, примерно в 2, а с ^{137}Cs — в 4 раза, а расположенный частично под плитой или на краю нее с ^{90}Sr — примерно в 4, а с ^{137}Cs — в 10 раз.

Для будущих российских проектов ППЗРО для НАО и САО вопрос выбора материала подстилающего экрана также является актуальным. Ниже приведены результаты расчетов миграции радионуклидов для вариантов с подстилающим экраном из водоупорного материала и из природного сорбента, обладающего фильтрационными свойствами.

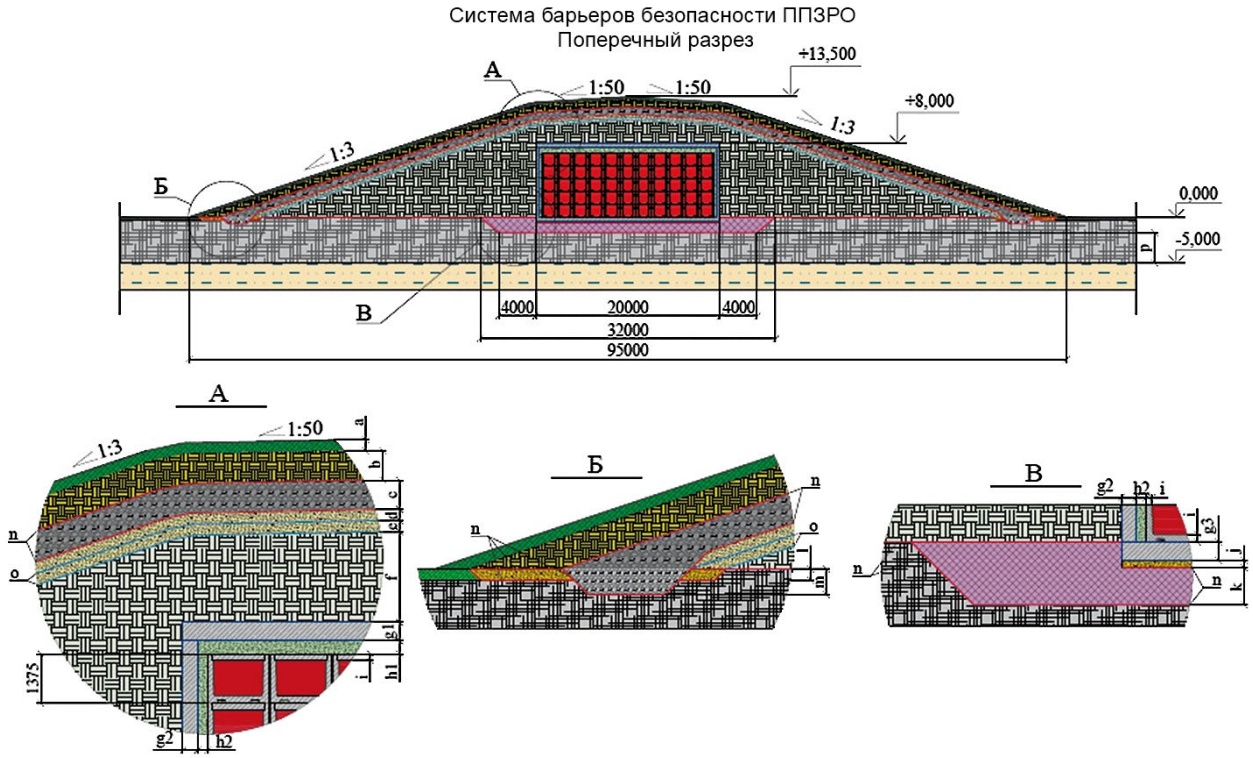
Оценки миграции радионуклидов для различных материалов подстилающего экрана

Для выполнения сравнительных оценок был рассмотрен условный пункт захоронения, расположенный на поверхности земли, вместимостью нетто 10 тыс. м^3 РАО (рис. 11).

Для него принято, что упаковки с РАО размещаются в одном железобетонном модуле с габаритами 20 × 8 × 220 м.

Покрывающий экран ППЗРО представляет собой систему из гидроизоляционных, защитно-дренажных почвенно-растительных слоев.

Подстилающие экраны выполнены: для варианта 1 — из клиноптилолита (природного сорбента, обладающего свойствами фильтрующего материала), для варианта 2 — из глины, обладающей водоупорными свойствами.



Перечень конструктивных элементов ППЗРО

Элемент	Наименование элемента	Толщина, мм
a	Плодородный слой земли и травяной покров	300
b	Глино-песчаный слой	800
c	Защитно-дренажный слой из щебня	500
d	Слой песка (песчаная подушка между щебнем и бентоматом)	300
e	Слой песка для укладки слоя бентоматов	300
f	Слой глины	2 200 (не менее)
g1	Верхнее перекрытие отсека	500
g2	Стенка отсека	400
g3	Нижнее перекрытие отсека	500
h1	Слой буферного материала над упаковками РАО	625

Перечень конструктивных элементов ППЗРО
(продолжение таблицы)

Элемент	Наименование элемента	Толщина, мм
h2	Слой буферного материала между упаковками РАО и стенками отсеков	300
i	Стенки, дно и крышка контейнера	150
j	Песчаная подушка для основания отсеков	300
k	Вариант 1 — Слой клиноптилолита Вариант 2 — Слой глины	1 200
l	Песчаная подушка для выравнивания поверхности под покрывающим экраном	300
m	Дренажная канавка, заполненная щебнем	500
n	Геотекстиль	2—3
o	Бентомат	5—7
p	Супесь (вмещающая порода от подстилающего экрана "k" до водоносного горизонта)	3 200

Рис. 11. Облик ППЗРО, взятый за основу для выполнения сравнительных оценок миграции радионуклидов для различных материалов подстилающего экрана

При моделировании были приняты следующие гидрогеологические условия:

- приповерхностный слой супесей мощностью около 5 м начинается непосредственно от почвенно-растительного слоя;
- песчаный водоносный горизонт расположен на глубине более 5 м и проходит на глубину до 7 м от земной поверхности;
- глинистые формации пролегают на глубине от 7 м и ниже.

Была использована треугольно-призматическая сетка, которая учитывает особенности геометрии расчетной области и содержит 37 220 ячеек.

В ходе моделирования численно решалась профильная задача стационарной насыщено-ненасыщенной фильтрации, а также имитировались процессы адвекции, дисперсии и диффузии. Расчеты выполнялись с применением аттестованного программного комплекса GeRa [33].

В ходе их проведения была определена загрузка для четырех радионуклидов (^{60}Co, ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{134}Cs) с суммарной удельной активностью $2{,}75 \cdot 10^7$ Бк/кг, наибольший вклад в которую вносит ^{137}Cs ($2{,}7 \cdot 10^7$ Бк/кг). Удельная активность и радионуклидный состав приблизительно соответствуют цементированным среднеактивным ЖРО, образующимся при эксплуатации АЭС с реакторами ВВЭР-1200. **По результатам моделирования было получено, что в обоих вариантах ни один из радионуклидов не выходит из зоны захоронения.** Это связано с тем, что данные радионуклиды обладают малым периодом полураспада и высокими сорбционными характеристиками.

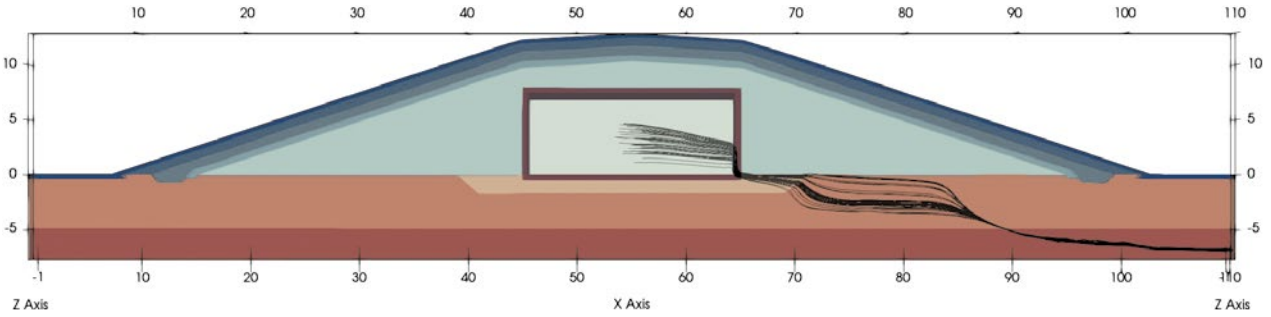


Рис. 12. Трассеры миграции ^{129}I, полученные по результатам моделирования для варианта с клиноптилолитом (черным цветом — траектории миграции ^{129}I)

Это позволяет заключить, что для наземного ППЗРО в качестве подстилающего экрана могут быть использованы как глина, так и сорбент типа клиноптилолита. При этом вариант с клиноптилолитом обеспечивает отвод воды из зоны захоронения за счет своих фильтрационных качеств и препятствует реализации сценария переполнения.

В связи с тем, что расчеты по короткоживущим радионуклидам не давали наглядной информации о возможных направлениях миграции для оценки «слабых мест» в конструкции наземного ППЗРО, были в дальнейшем проведены расчеты миграции слабосорбируемого радионуклида с большим периодом полураспада (^{129}I) с суммарной активностью 10^{10} Бк (рис. 12).

Расчеты трассеров миграции, полученные для ^{129}I, позволяют сделать предположение, что отвод протечек целесообразно осуществлять таким образом, чтобы вода попавшая в ППЗРО и содержащая радионуклиды распределялась по всей площади подстилающего экрана. Для этого в его основании могут быть использованы марки бетона с низкими показателями водонепроницаемости, а также увеличена площадь подстилающего экрана.

Заключение

Анализ различных способов приповерхностного захоронения РАО показывает тесную связь между решениями по глубине размещения ППЗРО, выбору ограждающих конструкций, материалов подстилающих экранов и водоотведению, что в очередной раз подтверждает необходимость системного подхода к рассмотрению этих вопросов.

С вступлением в силу изменений к ПП № 1069 [9], вероятно, будут созданы предпосылки для совершенствования складывающегося в РФ подхода к использованию полузаглубленных ППЗРО.

При проектировании и строительстве новых пунктов захоронения НАО и САО с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов в России целесообразно применять следующие решения:

- размещение ППЗРО на поверхности земли таким образом, чтобы упаковки с РАО находились не ниже отметки планировки площадки;
- эксплуатация разных инженерных барьеров для САО и НАО (захоронение в отдельных модулях, долговечность которых, в части обеспечения несущей способности, должна соответствовать срокам службы устанавливаемых в них контейнеров);
- применение пассивных систем отвода возможных протечек (без использования инспекционных галерей), препятствующих накоплению воды в отсеках захоронения и развитию сценария переполнения.

Данные требования близки к решениям по захоронению НАО и САО во Франции, Испании, Бельгии, Литве, Корее и ряде других стран. Одно из концептуальных отличий — создание фильтрационно-сорбционного подстилающего экрана, который позволяет отказаться от эксплуатации сложной системы сбора протечек с инспекционными галереями и обеспечивает пассивную безопасность ППЗРО.

Литература

1 . Подробности о проекте ПЗРО в Новоуральске / Атомная энергия 2 .0 — URL: https://www .atomi - energy.ru/SMI/2017/01/11/61738?ysclid=lg2hmixz 3s2898191 (дата обращения: 20 .09 .2023

2 .Финальная изоляция радиоактивных отходов 3 и 4 классов (среднеактивных короткоживущих и низкоактивных): геологические и инженерные барьеры безопасности / НО РАО. — URL: https:// www .norao .ru/about/isolation (дата обращения: 20 .09 .2023

3 . Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Челябинская область, Озерский городской округ (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду). Том 1. — URL: https://www.

norao.ru/upload/%D0%9C%D0%9E%D0%9B%20%D0%9E%D0%B7%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BA_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201_09.09.18.pdf (дата обращения: 20.09.2023).

4 . Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Томская область, городской округ ЗАТО Северск (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду). Том 1. — URL: https://www.norao.ru/upload/%D0%9C%D0%9E%D0%9B%20%D0%A1%D0%B5%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BA_%D1%82%D0%BE%D0%BC1%20(2).pdf (дата обращения: 22.09.2023).

5 . *Павлов Д. И., Сорокин В. Т., Баринов А. С., Дёмин А. В., Сыченко Д. В.* Научно-технические и проектные основы создания конструкций приповерхностных пунктов захоронения низко- и среднеактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2021. № 4 (17). С. 65—77. DOI: 10 .25283/258 -9707-2021-4-65-77.

6 . *Анисимов Н. А., Куваев А. А.* Численное моделирование влагопереноса в конструкциях приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С .97—106. DOI: 10 .25283/258 -9707-2022-3-97-106.

7 . *Павлов Д. И., Ильина О. А.* О системном подходе к выбору барьеров безопасности для захоронения РАО классов 3 и 4 // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 54—65. DOI: 10 .25283/258 -9707-2020-3-54-65.

8 . Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Results of a coordinated research project. V. 1. Review and enhancement of safety assessment approaches and tools. Vienna, IAEA, 2004. 413 p.

9 . Постановление Правительства Российской Федерации от 29 .10 .202 № 1929 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19 .10 .201 № 1069. — URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202211010002?ysclid=lg2ictd4bc215453822 (дата обращения: 20 .09 .2023

10 . *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Капырин И. В. и др.* Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. — М. : Комтехпринт, 2015. 208 с.

11 . *Сорокин В. Т., Павлов Д. И.* Технологии окончательной изоляции радиоактивных отходов: европейский опыт и тенденции // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 24—32.

12 . *McKenney D. E.* Hanford's Radioactive Mixed Waste Disposal Facility // Fifth international conference on radioactive waste management and environmental remediation. Germany, Berlin, 3—9 Sep. 1995.

13 . *Horyna J.* Dukovany Radioactive Waste Disposal Facility. IAEA-CN-73/57. State Offi e for Nuclear Safety, Prague, Czech Republic.

14 . The Chernobyl Gallery: Buriakivka — radioactive waste facility. — URL: www .cherno ylgallery . om/galleries/buriakivka-radioactive-waste-disposal-facility/ (дата обращения: 20 .09 .2023

15 . Texas Compact Waste Facility (CWF). Waste Control Specialists LLC (WCS), 2023. — URL: https://www.wcstexas . om/safety/environmental/ (дата обращения: 20 .09 .2023

16 . *Jousselin D., Medal G., Augustin X.* French Experience in Design and Construction of Near-Surface Disposal Facilities for Low-Level Waste. INIS IAEA, NCL Collection. 200—213 p. — URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/050/26050947 .pdf (дата обращения: 20 .09 .2023

17 . Andra's Disposal Facilities Feedback of 40-year Operations in France, National Radioactive Waste Management Agency, ATOMECO. Moscow, 2013. — URL: http://www .atome o .org/mediafiles/u/fil Prezentetion_31_10_2013/Bolia .pdf (дата обращения: 20 .09 .2023

18 . *Прозоров Л. Б.* Оценка состояния хранилищ РАО приповерхностного типа // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. № 2. — URL: https://www .atomi -energy.ru/articles/2013/05/17/41640 (дата обращения: 20 .09 .2023

19 . *Игин И. М., Минин А. В., Бамборин М. Ю., Кузьмин Е. В., Трофимова Ю. В.* Определение прогнозных сроков долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов при различных сценариях их эксплуатации//Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С .50—60. DOI: 10 .25283/258 -9707-2022-3-50-60.

20 . *Радченко М. В., Кормилицына Л. А., Матюнин Ю. И., Могулян В. Г.* Многоцелевые упаковки для радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 76—86.

21 . ПЗРО в Приволжском федеральном округе: предпроектные работы / Атомная энергия 2 .0 — URL: https://www.atomic-energy.ru/articles/2017/01/11/40647 (дата обращения: 20 .09 .2023

22 . *Большов Л. А., Линге И. И.* О согласовании этапов развития атомного энергопромышленного комплекса и системы обращения с РАО // Радиоактивные отходы. 2019. № 3 (8). С .14—27. DOI: 10 .25283/258 -9707-2019-3-14-27.

23 . Andra: A Collective International Dynamic for The Disposal of Radioactive Waste, Aube Waste Disposal Facility (CSA), — URL: https://international.andra.fr/operational-facilities/aube-waste-disposal-facility-csa/concept-and-design (дата обращения: 20 .09 .2023

24 . General Data required under Article 37 of the Euratom Treaty / Repository for the surface disposal of radioactive waste in Dessel, Belgium // Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials, 2019. — URL: https://afcn .be/fr/system files/2019-11-14-euratom-art3 -rapport .pdf (дата обращения: 20 .09 .2023
25 . *Bee M.* Dealing with America's nuclear waste: a promising new patent / American Security Project, posted 01 .10 .201 — URL: https:// www.americansecurityproject.org/dealing-with-americas-nuclear-waste-a-promising-new-patent/ (дата обращения: 20 .09 .2023
26 . National Radioactive Waste Disposal Institute (NRWDI): Vaalputs low and medium level nuclear waste facility disposal. — URL: https://www .n wdi. org .za/vaalputs .htm(дата обращения: 20 .09 .2023
27 . *Богатов С. А., Неуважаев Г. Д., Коновалов В. Ю.* К вопросу выбора инженерных барьеров пунктов приповерхностного захоронения РАО на примере сценария переполнения // Вопросы радиационной безопасности. 2019. № 3 (95). С. 3—14.
28 . B25 project. Near Surface Repository for Low and Intermediate Level Short-lived Radioactive Waste: — URL: https://www .iae .l en/b25-project.-near-surface-repository-for-low-and-intermediate-level-short-lived-radioactive-waste/470.
29 . *Veinović Ž., Vučenović H., Rožman I., Uroić G.* Improved conceptual design of LILW repository // Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin), 2023.
30 . Design and Construction of a Loess-Cement Cushion as an Integral Component of an SL-LILW Repository — 16077. WM2016 Conference, March 6—10, 2016, Phoenix, Arizona, USA.
31 . *Рыбальченко И. Л.* Обращение с отходами очень низкого уровня активности. Шведский опыт. — Санкт-Петербург : [б. и.], 2009. 36 с.
32 . Материалы презентации проекта пункта временного хранения ОНАО в Губе Андреева. — URL: https://inis .iaea .org ollection/ NCLCollectionStore/_Public/51/118/51118207.pdf (дата обращения: 22 .09 .2023
33 . Аттестационный паспорт программного средства «Программа для трехмерного геофильтрационного и геомиграционного моделирования (GeRa/V1)». Регистрационный номер 443 от 17 апреля 2018 года. Ростехнадзор.

Информация об авторах

Павлов Дмитрий Игоревич, начальник технологического отдела по проектированию систем обращения с РАО, АО «Компания инжиниринга и строительства «ИСТОК» (197183, Санкт-Петербург, ул .Дибуновская, д. 55), e-mail: pavlovdi@kis-istok .ru

Неуважаев Георгий Дмитриевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: neyvazhaev@ibrae .ac .r

Дёмин Анатолий Викторович, главный эксперт, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: demin .122@yand x .ru

Шульман Георгий Сергеевич, доктор технических наук, начальник отдела расчетов и научно-исследовательской работы, АО «Компания инжиниринга и строительства «ИСТОК» (197183, Санкт-Петербург, ул. Дибуновская, д. 55), e-mail: shulmangs@kis-istok .ru

Демченко Екатерина Дмитриевна, инженер-технолог по проектированию систем обращения с РАО, АО «Компания инжиниринга и строительства «ИСТОК» (197183, Санкт-Петербург, ул. Дибуновская, д. 55), e-mail: demchenkoed@kis-istok .ru

Библиографическое описание статьи

Павлов Д. И., Неуважаев Г. Д., Дёмин А. В., Шульман Г. С., Демченко Е. Д. К вопросу выбора способа захоронения низко- и среднеактивных РАО // Радиоактивные отходы. 2024. № 1 (26). С. 69—83. DOI: 10 .25283/258 -9707-2024-1-69-83.

ON THE SELECTION OF A DISPOSAL OPTION FOR LOW- AND INTERMEDIATE-LEVEL WASTE

Pavlov D. I.[1], Neuvazhaev G. D.[2], Demin A. V.[2], Shulman G. S.[1], Demchenko E. D.[1]

[1]JSC «Company of engineering and construction «ISTOK», St-Petersburg, Russia

[2]Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on December 19, 2023

The paper overviews different options considered for the near-surface disposal of low- and intermediate-level waste. It evaluates the engineered safety barriers proposed under the near-surface disposal concepts, their functions and designs. The paper demonstrates that the practice providing for RW disposal in shallow near-surface disposal facilities can be feasibly replaced by the one of surface disposal. It considers different engineering designs proposed for such surface repositories, in particular, those preventing water accumulation in the repository structures. It summarizes the findings o some broad safety assessments focused on such designs.

Keywords: *radioactive waste, near-surface disposal facilities, engineering safety barriers, containers for radioactive waste, disposal cells, bottom layers, antibathtub system, inspection galleries.*

References

1 . Podrobnosti o proyekte PZRO v Novoural'ske [Information on the RWDF project in Novouralsk]. *Atomnaya energiya 2.0 — Atomic Energy 2.0.* — URL: https://www.atomic-energy.ru/SMI/2017/01/11/61738?ysclid=lg2hmixz3s2898191 (accessed on: 20 .09 .2023

2 . *Final'naya izolyatsiya radioaktivnykh otkhodov 3 i 4 klassov (sredneaktivnykh korotkozhivushchikh i nizkoaktivnykh): geologicheskiye i inzhenernyye bar'yery bezopasnosti* [Final disposal of RW Class 3 and 4 (short-lived intermediate- and low-level waste): geological and engineered safety barriers]. NO RAO .— URL: https://www .norao .ru/about/isolation (accessed on: 20 .09 .2023

3 . *Materialy obosnovaniya litsenzii na razmeshcheniye i sooruzheniye pripoverkhnostnogo punkta zakhoroneniya tverdykh radioaktivnykh otkhodov 3 i 4 klassov, Chelyabinskaya oblast', Ozerskiy gorodskoy okrug (vklyuchaya materialy otsenki vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu)* [Siting and Construction License Application for a Near-Surface Disposal Facility for Class 3 and 4 Solid Radioactive Waste, Chelyabinsk region, Ozersky urban district (including the environmental impact assessment). Volume 1. — URL: https://www .norao .r upload/%D0%9C%D0%9E%D0%9B%20%D0%9E%D0%B7%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BA_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201_09 .09 .18 .p (accessed on: 20 .09 .2023

4 . *Materialy obosnovaniya litsenzii na razmeshcheniye i sooruzheniye pripoverkhnostnogo punkta zakhoroneniya tverdykh radioaktivnykh otkhodov 3 i 4 klassov, Tomskaya oblast', gorodskoy okrug ZATO Seversk (vklyuchaya materialy otsenki vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu)* [Siting and Construction License Application for a Near-Surface Disposal Facility for Class 3 and 4 Solid Radioactive Waste, Tomsk region, restricted administrative and territorial entity Seversk (including the environmental impact assessment). Volume 1. — URL: https://www.norao.ru/upload/%D0%9C%D0%9E%D0%9B%20%D0%A1%D0%B5%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BA_%D1%82%D0%BE%D0%BC1%20().pdf (accessed on: 20 .09 .2023

5 . Pavlov D. I., Sorokin V. T., Barinov A. S., Demin A .V., Sychenko D. V. Nauchno-tekhnicheskie i proektnye osnovy sozdaniya konstruktsii pripoverkhnostnykh punktov zakhoroneniya nizko- i sredneaktivnykh otkhodov [Scientific and Design Aspects in the Development of Near-Surface Disposal Facilities for Low-And Intermediate-Level Waste]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2021, no. 4 (17), pp .65—77. DOI: 10 .25283/258 -9707-2021-4-65-77.

6 . Anisimov N. A., Kuvaev A. A. Chislennoe modelirovanie vlagoperenosa v konstruktsiyakh pripoverkhnostnogo punkta zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Numerical Modeling of Moisture Transfer in the Structures of a Near-Surface Radioactive Waste Disposal Facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2022, no. 3 (20), pp. 97—106. DOI: 10 .25283/258 -9707-2022-3-97-106.

7 . Pavlov D. I., Ilina O. A. O sistemnom podkhode k vyboru bar'erov bezopasnosti dlya zakhoroneniya RAO klassov 3 i 4 [On a System Approach to the Selection of Safety Barriers for the Disposal of Radioactive Waste Class 3 and 4]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2020, no. 3 (12), pp. 54—65. DOI: 10 .25283/258 -9707-2020-3-54-65.

8 . *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Results of a coordinated research*

project. V. 1. Review and enhancement of safety assessment approaches and tools / IAEA. — Vienna, 2004. — 413 p.

9 . *Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 29.10.2022 No. 1929 "O vnesenii izmenenii v postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 19.10.2012 No. 1069"* [Government Decree of the Russian Federation of October 29, 2022 No. 1929 On Amendments to the Government Decree of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069]. — URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202211010002?ysclid=lg2ictd4bc215453822 (accessed on: 20 .09 .2023

10 . Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V. et al. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhoroneniya OYAT i RAO* [Overview of International Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Disposal Practices]. Moscow, Komtekhprint Publ., 2015. 208 p.

11 . Sorokin V. T., Pavlov D. I. Technologies of radioactive waste disposal: European experience and trends. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 4 (5), pp. 24—32.

12 . McKenney D. E. Hanford's Radioactive Mixed Waste Disposal Facility. *Fifth international conference on radioactive waste management and environmental remediation.* Germany, Berlin, 3—9 Sep. 1995.

13 . Horyna J. *Dukovany Radioactive Waste Disposal Facility.* IAEA-CN-73/57. State Offi e for Nuclear Safety, Prague, Czech Republic.

14 . *The Chernobyl Gallery: Buriakivka — radioactive waste facility.* — URL: www .cherno ylgallery . om/galleries/buriakivka-radioactive-waste-disposal-facility/ (accessed on: 20 .09 .2023

15 . *Texas Compact Waste Facility (CWF).* Waste Control Specialists LLC (WCS), 2023. — URL: https://www.wcstexas . om/safety/environmental/ (accessed on: 20 .09 .2023

16 . Jousselin D., Medal G., Augustin X. *French Experience in Design and Construction of Near-Surface Disposal Facilities for Low-Level Waste*. INIS IAEA, NCL Collection. 200—213 p. — URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/050/26050947.pdf (accessed on: 20.09.2023).

17 . *Andra's Disposal Facilities Feedback of 40-year Operations in France,* National Radioactive Waste Management Agency, ATOMECO. Moscow, 2013. — URL: http://www .atome o .org/mediafiles/u/fil Prezentetion_31_10_2013/Bolia .pdf (accessed on: 20 .09 .2023

18 . Prozorov L. B. Otsenka sostoyaniya khranilishch RAO pripoverkhnostnogo tipa [Evaluating the state of near-surface radioactive waste storage facilities]. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologiy i okruzhayushchey sredy — Safety of nuclear technologies and the environment,* 2011, no. 2. — URL: https://www.atomic-energy.ru/articles/2013/05/17/41640 (accessed on: 20 .09 .2023

19 . Igin I. M., Minin A. V., Bamborin M. Yu., Kuzmin E .V., Trofim va Iu. V. Opredelenie prognoznykh srokov dolgovremennoi bezopasnosti punktov pripoverkhnostnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov pri razlichnykh stsenariyakh ikh ekhspluatatsii [Forecasted timeframes for the long-term safety of near-surface disposal facilities for radioactive waste calculated considering various scenarios of their operation]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2022, no. 3 (20), pp. 50—60. DOI: 10 .25283/258 -9707-2022-3-50-60.

20 . Radchenko M. V., Kormilitsyna L. A., Matyunin Yu .I., Mogulyan V. G. Mnogotselevye upakovki dlya radioaktivnykh otkhodov [Multi-purpose Packages for Radioactive Waste]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2017, no. 1, pp. 76—86.

21 . PZRO v Privolzhskom federal'nom okruge: predproyektnyye raboty [Disposal facility in the Volga Federal District: pre-design stage of development]. *Atomnaya energiya 2.0 — Atomic energy 2.0.* — URL: https://www .atomi -energy .ru/articles/2017/01/11/40647 (accessed on: 20 .09 .2023

22 . Bolshov L. A., Linge I. I. O soglasovanii etapov razvitiya atomnogo ehnergopromyshlennogo kompleksa i sistemy obrashcheniya s RAO [Building Consistency between Development Stages of Nuclear Power Complex and RW Management System]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 3 (8), pp. 14—27. DOI: 10 .25283/258 -9707- 2019-3-14-27.

23 . A*ndra: A Collective International Dynamic for The Disposal of Radioactive Waste,* Aube Waste Disposal Facility (CSA), — URL: https://international.andra.fr/operational-facilities/aube-waste-disposal-facility-csa/concept-and-design (accessed on: 20.09.2023).

24 . *General Data required under Article 37 of the Euratom Treaty.* Repository for the surface disposal of radioactive waste in Dessel, Belgium. Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials, 2019 .— URL: https://afcn.be/fr/system/files/2019-11-14-euratom-art3 -rapport.pdf (accessed on: 20.09.2023).

25 . Bee M. *Dealing with America's nuclear waste: a promising new patent.* American Security Project, posted 01 .10 .201 — URL: https://www .america -securityproject.org/dealing-with-americas-nuclear-waste-a-promising-new-patent/ (accessed on: 20 .09 .2023

26 . National Radioactive Waste Disposal Institute (NRWDI): *Vaalputs low and medium level nuclear waste facility disposal.* — URL: https://www .n wdi. org .za/vaalputs .html (cessed on: 20 .09 .2023

27 . Bogatov S. A., Neuvazhaev G. D., Konovalov V. Yu. K voprosu vybora inzhenernykh bar'yerov punktov

pripoverkhnostnogo zakhoroneniya RAO na primere stsenariya perepolneniya [On the selection of engineered barrier designs for near-surface RW disposal facilities based on the case study of an overflow scenario]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2019, no. 3 (95), pp .3—14.
28 . *B25 project. Near Surface Repository for Low and Intermediate Level Short-lived Radioactive Waste.* — URL: https://www.iae.lt/en/b25-project.-near-surface-repository-for-low-and-intermediate-level-short-lived-radioactive-waste/470 (accessed on: 20.09.2023).
29 . Veinović Ž., Vučenović H., Rožman I., Uroić G. *Improved conceptual design of LILW repository.* Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin), 2023.
30 . Design and Construction of a Loess-Cement Cushion as an Integral Component of an SL-LILW Repository — 16077. *WM2016 Conference,* March 6—10, 2016, Phoenix, Arizona, USA.
31 . Rybalchenko I. L. *Obrashcheniye s otkhodami ochen' nizkogo urovnya aktivnosti. Shvedskiy opyt* [Management of very low-level waste in Sweden]. St .Petersburg, 2009. 36 p.
32 . *Materialy prezentatsii proyekta punkta vremennogo khraneniya ONAO v Gube Andreyeva* [Materials from the presentation on a temporary storage facility for VLLW in Andreeva Bay]. — URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/51/118/51118207 .pdf (a cessed on: 20 .09 .2023
33 . *Attestatsionnyi pasport programmnogo sredstva "Programma dlya trekhmernogo geofil'tratsionnogo i geomigratsionnogo modelirovaniya (GeRa/V1)"* [Certification passport for a software product designed for three-dimensional fl w and transport modeling in geological medium (GeRa/V1)]. Registration number 443 of April 17, 2018. Rostekhnadzor.

Information about the authors

Pavlov Dmitriy Igorevich, Head of radioactive waste management department, JSC «Company of engineering and construction «ISTOK» (55, Dibunovskaya st., St-Petersburg, 197183, Russia), e-mail: pavlovdi@kis-istok .ru

Neuvazhaev Georgiy Dmetrievich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: neyvazhaev@ibrae .ac .r

Demin Anatoly Viktorovich, chief expert, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: demin .122@yand x .ru

Shulman Georgy Sergeevich, PhD, Head of estimation and research department, JSC «Company of engineering and construction «ISTOK» (55, Dibunovskaya st., St-Petersburg, 197183, Russia), e-mail: shulmangs@kis-istok .ru

Demchenko Ekaterina Dmitrievna, engineer of radioactive waste management department, JSC «Company of engineering and construction «ISTOK» (55, Dibunovskaya st., St-Petersburg, 197183, Russia), e-mail: demchenkoed@kis-istok .ru

Bibliographic description

Pavlov D. I., Neuvazhaev G. D., Demin A. V., Shulman G. S., Demchenko E. D. On the Selection of a Disposal Option for Low- and Intermediate-Level Waste. *Radioactive Waste,* 2024, no. 1 (26), pp. 69—83. DOI: 10 .25283/258 -9707-2024-1-69-83. (In Russian).