

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ГЛИНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИЗОЛЯЦИИ РАО В ПГЗРО НА УЧАСТКЕ НЕДР «ЕНИСЕЙСКИЙ»

В. В. Крупская¹, Е. А. Тюпина², С. В. Закусин¹, О. А. Ильина³, Е. А. Савельева³

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

²Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва

³Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 13 февраля 2023 г.

В данной статье рассмотрена основная стратегия развития исследований, ориентированная на разработку системы инженерных барьеров (СИБ) с особым акцентом на материалы и конструкцию буферного слоя, в рамках «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения радиоактивных отходов (РАО) в пункте глубинного захоронения (ПГЗРО) с оптимизацией его эксплуатационных параметров». Были выделены основные направления требуемых исследований, которые позволят получить необходимые численные характеристики для математического описания процессов, протекающих в СИБ в ходе эксплуатации ПГЗРО и после его закрытия, скорректировать развиваемые модели, сузить объем работ на последующих этапах и оптимизировать план дальнейших исследований по созданию системы инженерных барьеров безопасности.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, система инженерных барьеров безопасности, бентонит, глубинные хранилища РАО.

Введение

На настоящий момент общепризнано, что наиболее безопасным вариантом захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) и отработанного ядерного топлива (ОЯТ) является их размещение в ПГЗРО, создаваемых в стабильных геологических формациях. Безопасность захоронения обеспечивается благодаря принципу многобарьерности, реализуемому посредством создания СИБ [1]–[3], за счет комбинации ряда последовательных и независимых уровней защиты, которые в совокупности

обеспечивают надежное удержание радионуклидов и ионизирующего излучения до срока, когда воздействия на людей или окружающую среду не будут превышать установленные допустимые значения. При корректной реализации глубокоэшелонированная защита гарантирует, что ни один природный, техногенный и антропогенный фактор не может привести к неприемлемым последствиям и что их комбинации имеют очень низкую вероятность. Независимая эффективность различных уровней

безопасности — необходимый элемент глубоководной защиты, который указан в Федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии НП-055-14 [1].

СИБ при захоронении ВАО или ОЯТ традиционно включает в себя такие элементы, как иммобилизирующая радионуклиды матрица, упаковка для захоронения (контейнер), в которую помещается матрица с РАО, и глинистые материалы, размещаемые в пространстве между контейнерами и стенками выработки (буферный слой), материалы обратного заполнения туннелей и др. (рис. 1).

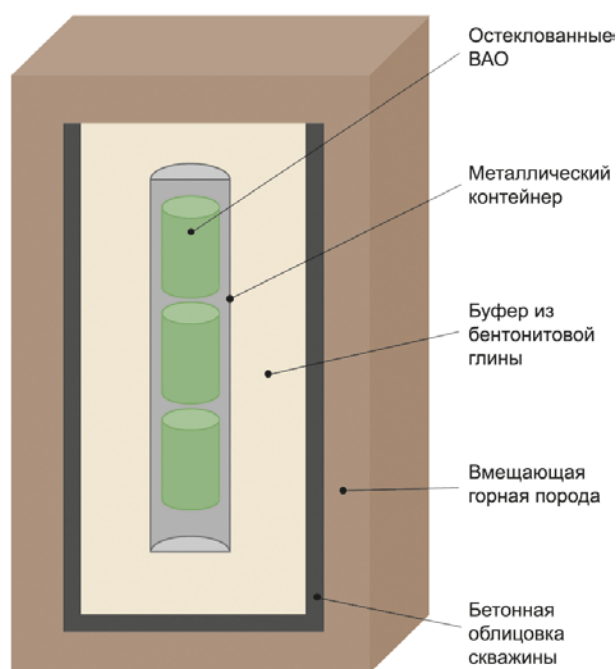


Рис. 1. Схема системы инженерных барьеров

Каждый элемент этой системы имеет свои функции безопасности, которые реализуются за счет его свойств, таких как высокая прочность и/или пластичность, специальные химические характеристики (в том числе способность к сорбции радионуклидов или уменьшению скорости коррозии металлических барьеров), возможность поддержания физической и химической стабильности (например, за счет благоприятных окислительно-восстановительных условий), низкая водопроницаемость и другие.

В качестве вмещающей геологической среды для захоронения ВАО и ОЯТ рассматриваются массивы кристаллических пород, в которых предполагают сооружать ПГЗРО такие страны, как Швеция (разработана концепция захоронения), Финляндия (имеет лицензию на строительство), Китай и Чехия. Возможности их использования также рассматриваются в США,

Канаде, Великобритании [4]–[14]. При этом, независимо от используемого материала контейнеров с РАО и даже компоновки (расположения упаковок в горных выработках), в качестве материала для буферной зоны и обратной засыпки технологических горных выработок однозначно признаны бентонитовые глины с высоким содержанием монтмориллонита (не менее 75%), который способен обеспечить выполнение требований по сохранению функций безопасности на длительную перспективу [15]–[18]. Особенности его структуры обуславливают высокие гидроизоляционные свойства [19]–[21], сорбционную способность по отношению ко многим радионуклидам [22]–[26] и позволяют бентонитовым глинам сохранять свои эксплуатационные характеристики при взаимодействии с концентрированными кислотами [27]–[30] и в высокощелочных условиях на границе с бетоном [31]–[33].

В данной работе рассматриваются вопросы разработки системы инженерных барьеров безопасности для захоронения ВАО в контексте выбранного в Российской Федерации участка «Енисейский» (Красноярский край). Он сложен кристаллическими породами (архейские гнейсы) и в настоящее время рассматривается потенциально пригодным для размещения ПГЗРО. ФГУП «НО РАО» имеет лицензию на сооружение на этом участке подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). Ее создание требуется для проведения в реальных условиях участка массива на глубине около 500 м исследований, экспериментов и опытных работ, которые позволят сделать прогнозы долговременной безопасности и оценить возможности достижения требуемых характеристик защищенности потенциального ПГЗРО при различных сценариях. Особое место среди запланированных в ПИЛ работ отводится экспериментам, связанным с СИБ, в частности проверки функционирования в условиях ПГЗРО материалов буферного слоя. С точки зрения возложенных на него функций безопасности и сочетания внешних факторов, влияющих на эволюцию его состава и свойств, вопросу выбора глинистого материала для буферной зоны должно быть уделено особое внимание.

Разработка системы инженерных барьеров для обеспечения долговременной безопасности ПГЗРО

Разработка системы инженерных барьеров выполняется для выбранного варианта системы захоронения РАО, который может, например, предполагать размещение РАО в металлических

контейнерах в вертикальных скважинах в окружении буфера из глинистого материала. На основе этой концепции рассматривается компоновка, задающая количественные характеристики (глубина и диаметр скважин, количество упаковок в них, слоев и т. п.). Разработка системы безопасности состоит в выборе и обосновании материалов контейнера (углеродистая или нержавеющая сталь, с медным покрытием или медь) и глинистого материала (например, блоки или пеллеты из компактированного бентонита, каолин-бентонитовая смесь, бентонит с песком и т. п.), включая выбор конкретного месторождения [34].

Разработка системы инженерных барьеров должна основываться на обеспечении функций безопасности, которые предъявляются к СИБ и ее отдельным элементам в соответствии с принятой компоновкой РАО для ПГЗРО. Например, назначением контейнера с отходами является обеспечение долгосрочной локализации радионуклидов, содержащихся в ВАО, что реализуется за счет его герметичности до момента возникновения зон разгерметизации, вызванных коррозионными процессами.

Выполнение функции безопасности барьером осуществляется благодаря тому, что он обладает соответствующими свойствами. Так, в случае с контейнером долговременная непроницаемость обеспечивается прежде всего механической прочностью и коррозионной стойкостью. Следовательно, для него нужно выбирать тот материал, который обладает необходимыми характеристиками и сохраняет их в условиях ПГЗРО в течение заданного времени. Использование расчетных оценок и моделирования позволяет сформировать численные требования к материалу и/или конструкции с определенным допуском по разбросу значений. Далее осуществляется оценка их практической реализуемости, что может привести как к обоснованию выбора материала и конструкции элемента СИБ, так и потребности в изменении компоновки или концепции ПГЗРО.

Исходя из вышесказанного, для систематизации и обоснования выбора СИБ следует

организовать исследования по четырем взаимосвязанным направлениям:

1. Проведение лабораторных опытных работ с целью получения численных характеристик свойств материалов и изделий СИБ, используемых в данной концепции, с максимальным акцентом на обеспечивающие выполнение функции безопасности элемента системы.

2. Выполнение лабораторных, стендовых и макетных испытаний, направленных на изучение процессов, присутствующих в ПГЗРО и влияющих на эволюцию свойств материалов СИБ, особенно тех, на которые опирается выполнение функций безопасности.

3. Осуществление исследований, ориентированных на создание и отработку технологии изготовления изделий из глинистых материалов для создания инженерных барьеров различных участков ПГЗРО.

4. Реализация расчетно-аналитического инструментария для сопровождения экспериментальных работ, а именно математических моделей эволюции поведения материалов СИБ и миграции в ней радионуклидов.

Целью этих исследований является получение численных характеристик изменения состава, строения и свойств материалов СИБ в условиях ПГЗРО. Кроме того, проводимые испытания позволяют калибровать и валидировать развиваемые модели, а также обосновывать возможность их использования для оценок в рамках подтверждения безопасности ПГЗРО.

Создание СИБ для конкретной концепции захоронения представляет собой итеративный процесс, который состоит из циклов экспериментальных исследований и моделирования (рис. 2). Он включает в себя анализ происходящего в СИБ в период эксплуатации ПГЗРО и после его закрытия, разработку требований к системе инженерных барьеров безопасности и ее отдельным элементам, уточнение характеристик материалов и их эволюции при взаимодействии друг с другом и геологической средой (породой и подземными водами).

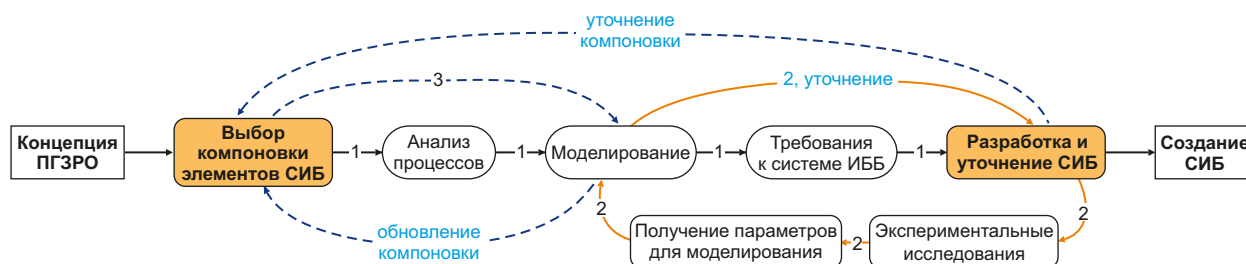


Рис. 2. Разработка системы исследований для создания СИБ

В условиях незавершенного выбора концепции ПГЗРО разработка СИБ усложняется необходимостью рассмотрения множественных вариантов компоновок. Можно отметить, что во всех предлагаемых на настоящий момент концепциях [3]–[8] в буферной зоне присутствуют глинистые материалы. Исходя из этого, в качестве первоочередных можно выделить исследования, направленные на их выбор и обоснование этого выбора. Эти результаты могут быть использованы для уточнения любой из рассматриваемых концепций.

При проведении исследований в обоснование выбора материала для буферной зоны, а также глинистого материала при обратном заполнении туннелей и шахт ПГЗРО, создании изоляционных заглушек и т. д. должен соблюдаться следующий порядок:

- определение функций безопасности, которые возлагаются на буферную зону, вне зависимости от выбранного типа компоновки (то есть в любом случае), а также составление списка критических свойств материалов, обеспечивающих реализацию каждой из этих задач;
- проведение сравнительного анализа изоляционных, физико-механических и других свойств бентонитов и вариаций смесей глин с ранжированием результатов по приоритетности их использования в буферном слое ПГЗРО (в условиях наземной лаборатории);
- исследование эволюции состава и свойств (изоляционных, физико-механических, теплофизических и др.) материалов буферной зоны под влиянием внешних воздействий, характерных для ПГЗРО, включая взаимодействие с поровой водой, горной породой, другими материалами инженерных барьеров, продуктами коррозии, микробиологическим сообществом и т. п. (в условиях наземной лаборатории и ПИЛ);
- проведение аналитических и модельных расчетов для определения требований к свойствам материалов и изделий для буферной зоны;
- изучение технологических возможностей промышленного производства изделий с требуемыми свойствами различной формы и плотности, в том числе из компактированных глин (прямоугольные блоки, сегменты дисков и колец, фасонные изделия, пеллеты, гранулированные материалы и пр.) (в условиях опытного производства).

Общим принципом для всех этапов испытаний и моделирования является обеспечение прослеживаемости информации, выполнение ее записи, хранения и актуализации в доступной форме для последующего численного и семантического анализа.

Подходы к комплексному исследованию для обоснования состава и свойств буферного слоя ПГЗРО

Опираясь на предложенные варианты концепций, которые описаны в отчетах [35], проектной документации [36] и ряде статей [19], [37]–[42], можно выделить два типа глинистых материалов для буферной зоны: компактированные изделия и сырье для засыпки повышенной плотности. В качестве потенциальных вариантов рассматриваются бентониты различных месторождений, смеси каолин/бентонит как имеющие опыт использования при выводе из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов [42]–[44], хотя перспективность применения добавок каолиновых глин в бентониты вызывает у авторов большие сомнения, основанные на последних исследованиях [45]. При этом в некоторых компоновках бентонит (или смесь на его основе) находится в контакте с бетоном/цементом (или с материалами на его основе) и сталью [46].

Функциями безопасности буферного слоя являются:

1. Создание и поддержание предварительно рассчитанных и благоприятных для изоляции упаковки с РАО механических, геохимических и гидрогеологических критериев:

- условия для развития низких скоростей миграции радионуклидов;
- способность к самогерметизации после начальной установки и к самовосстановлению в результате прогнозируемых гидравлических и механических повреждений.

2. Защита упаковки с РАО от воздействия опасных процессов, явлений и факторов (особенности, события и процессы (ОСП) – согласно международной классификации), в том числе гидравлических, механических, химических и микробиологических, которые могут поставить под угрозу ее функции безопасности:

- способность уменьшать воздействие скальных пород на контейнер за счет создания благоприятных физико-механических условий;
- поддержка других компонентов систем: буферный слой должен обеспечивать подпорку стен скважины размещения, чтобы уменьшить потенциально возможное воздействие повреждения скальной породы, а также быть в состоянии удерживать контейнер в правильном положении (чтобы не допустить проседания и опрокидывания).

3. Препятствование (ограничение и замедление) переноса радиоактивных веществ (миграции

радионуклидов) в случае нарушения целостности упаковки с РАО, для чего определяются:

- состав глинистого или цементного/бетонного материала, наличие функциональных добавок;
- особенности технологии размещения материала (заливка, засыпка, закладка);
- тип глинистого материала или изделий (блоки, диски, сегменты, пеллеты и др., сыпучие вещества на их основе — порошок, гранулы и т. д.);
- использование суперконтейнеров: многослойная упаковка с РАО, содержащая внутри себя также и буферный слой.

Основные характеристики (свойства) буферного слоя, которые обеспечивают достижение требуемых функций безопасности, следующие:

1. Изоляционные: способность поддерживать низкие скорости миграции радионуклидов (фильтрации, диффузии), высокие показатели давления набухания и сорбции по отношению к загрязнителям.

2. Эксплуатационные: необходимо разработать его таким образом, чтобы он имел способность к самогерметизации после начальной установки и к самовосстановлению в результате любых гидравлических и механических повреждений.

3. Теплопроводность: требуется достаточно эффективно передавать тепло от контейнера.

4. Перенос газа: способность пропускать через себя газы, не вызывая повреждений в системе ПГЗРО.

5. Химическая защита: способность ограничивать микробную деятельность и сохранять скорость коррозии контейнера на прогнозируемом уровне.

6. Механическая защита: способность обеспечивать поддержку стенкам горных выработок, чтобы уменьшить потенциально возможное воздействие скальной породы на упаковки с РАО, быть в состоянии удерживать контейнер в проектном положении (чтобы не допустить проседания и опрокидывания).

Представленные формулировки могут обеспечиваться различными барьерными материалами, но определяются требованиями к составу, плотности скелета и толщине буферного слоя. При использовании многослойных буферов функции безопасности должны быть разделены на несколько компонентов для различных материалов.

Свойства глинистых материалов, которые обеспечивают достижение этих целей, называются критическими и определяют выбор сырья для создания инженерных барьеров, размещаемых на разных участках ПГЗРО. Для буферного слоя они, в некоторой степени условно могут быть подразделены на три категории в целях более

удобного координирования работ между исследовательскими группами:

1. Функциональные (фундаментальные качества материалов и их изменение вследствие взаимодействий, например, компактирования) в текущем состоянии работ включают физические показатели, а также физико-механические, водно-физические (прочность, водопроницаемость и пр.) и физико-химические (набухаемость, самозалечивание и др.).

2. Показатели, отвечающие за развитие СИБ в условиях ПГЗРО (эволюционные свойства), охватывают взаимодействие таких компонентов барьеров, как бетон и бентонит, а также влияние микробной деятельности на потенциальные преобразования порового пространства компактированных бентонитов буферного слоя.

3. Миграционные, под которыми (на данный момент) понимаются сорбционные параметры по отношению к радионуклидам, диффузия через уплотненные материалы буфера, коллоидный транспорт радионуклидов.

При характеристике функциональных свойств мы использовали терминологию, признанную в инженерной геологии, грунтоведении и строительстве, согласно [47].

Начиная с 2022 года проводятся комплексные исследования по анализу физико-механических и физико-химических процессов, протекающих в СИБ при эксплуатации и после закрытия ПГЗРО, которые включают получение численных характеристик, в том числе набухания, водопроницаемости, прочности на одноосное сжатие, сопротивления сдвигу, самозалечивания после сдвиговых нагрузок и др., необходимых для разработки в дальнейшем моделей напряженно-деформированного состояния (НДС) компактированных глинистых материалов буфера и уточнения миграционных моделей с учетом изменения порового пространства при набухании, фильтрации жидкости на границе барьер—барьер, тепловых нагрузках и т. д. Схема работ для получения численных характеристик свойств, обеспечивающих сохранение функций безопасности СИБ, которые реализуются в период 2022—2023 гг., приведена на рис. 3. На момент подготовки статьи в список исполнителей входят порядка 10 организаций: ИБРАЭ РАН, ИГЕМ РАН, ИГЭ РАН, РХТУ им. Д. И. Менделеева (кафедра химии высоких энергий и радиоэкологии), СПбО ИГЭ РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова (химический факультет и факультет почвоведения), Сколтех, ООО «Дека Сервис», АНО НИЦ «Открытый регион», ООО «Бентонит

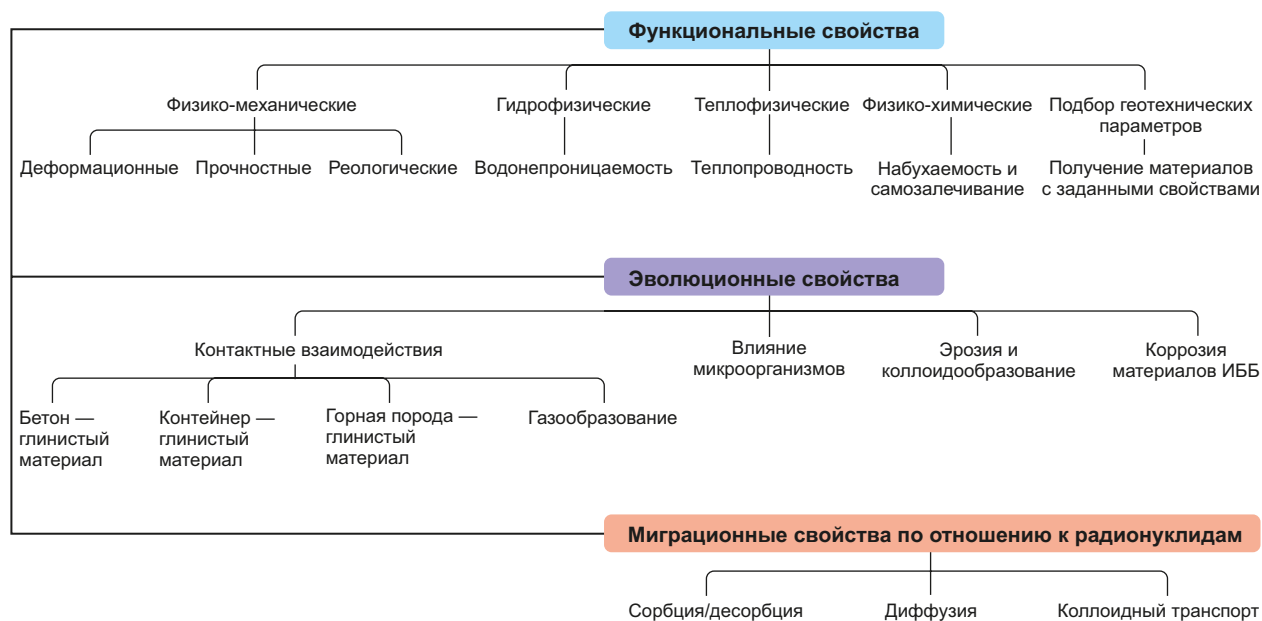


Рис. 3. Концептуальная схема работ по получению численных характеристик свойств буферного слоя, обеспечивающих сохранение функций безопасности ПГЗРО на заданную перспективу времени

Хакасии». Перечень соисполнителей может увеличиться уже в течение 2023 года.

Списочный состав как направлений исследований, так и научных групп может изменяться, но будет оставаться в рамках «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронений РАО и оптимизации эксплуатационных параметров», согласованной Госкорпорацией «Росатом» (Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО в Нижнеканском массиве (Красноярский край)).

При анализе результатов исследований следует учитывать всестороннее проявление свойств материалов. Так, например, если выбранный потенциальный образец будет обладать наилучшими теплопроводящими характеристиками, но не обеспечит необходимые изоляционные свойства, допустим, по водонепроницаемости, он не подойдет для использования в ПГЗРО, и проводить на нем длительные эксперименты по сохранению стабильности свойств в этих условиях будет нецелесообразно. Вместе с тем в случае достижения сходных свойств при заданном уплотнении следует проводить и остальной комплекс работ. В этих целях расширения объема исследований при обосновании приемлемости глинистых материалов для создания СИБ должен быть разработан многофакторный критерий, учитывающий важность каждой из приведенных на рис. 3 характеристик. Принимая во внимание влияние технологических параметров изготовления глинистых

материалов требуемой плотности (фракционный состав и показатели влажности) на изоляционные свойства получаемых изделий, можно подобрать характеристики, при которых будут созданы изделия из компактированных глинистых материалов с оптимальными свойствами. На основании сказанного, по результатам испытаний может быть проведен сравнительный анализ противомиграционных и других свойств бентонитов и вариаций смесей глин с ранжированием результатов по приоритетности их использования в буферном слое ПГЗРО.

В данной работе внимание сконцентрировано на рассмотрении вопросов разработки и обоснования структуры, строения (фракционный состав, влажность и т. д.) и конструкции (такие геометрические параметры, как размер и количество колец/сегментов, толщина и пр.) буферного слоя с учетом имеющихся неопределенностей в концепциях. Кроме того, в СИБ входит материал обратного заполнения туннелей, шахт и горных выработок, заглушек и гидроизоляционных пробок между различными участками ПГЗРО. В настоящий момент разработка этих компонентов систем ведется не так интенсивно, хотя многие результаты, полученные для буферного слоя, могут быть экстраполированы на другие глинистые компоненты СИБ.

Важной и неотъемлемой составляющей выбора и оценки выполнения своих функций безопасности системой инженерных барьеров является создание методических основ и оборудования для проведения экспериментов различного масштаба.

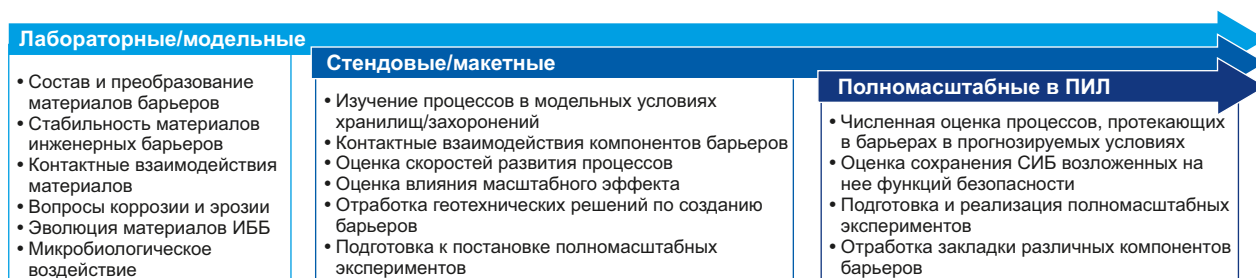


Рис. 4. Комплексный подход к постановке экспериментов разного уровня

Исследования глинистых материалов в обоснование долговременной безопасности потенциального ПГЗРО включают в себя не только определение их критических свойств, но и более широкие группы экспериментальных работ, реализуемые в лабораторных, макетных/стендовых (в том числе среднемасштабных) и полномасштабных экспериментах (рис. 4).

Стоит пояснить, что к первым отнесены эксперименты, в которых используются образцы лабораторного масштаба (суспензии, порошки, компактированные изделия размеры которых ограничены). Ко вторым — эксперименты, в которых моделируется один из процессов, действующих на систему барьеров ПГЗРО, например, фильтрация жидкости через СИБ, газогенерация, воздействие ионизирующего излучения и т. д. В третьих рассматривается комплекс испытаний, сюда же относятся среднемасштабные эксперименты как подготовительные для перехода к полномасштабным, под которыми понимаются опыты и стенды, которые воссоздают работу СИБ в условиях ПИЛ, т. е. наиболее приближенных к ПГЗРО.

Эксплуатационные характеристики и технологические возможности промышленного производства

Выше упоминалось, что свойства создаваемого глинистого буферного слоя можно регулировать при помощи создания уплотненных (компактированных) материалов. В рамках поиска технологических решений по подготовке сырья к уплотнению и изготовлению материалов с заданными свойствами была создана программа по выработке геологических критериев приемлемости глинистых материалов. Ее реализация позволяет ответить на такие актуальные вопросы, как:

- выбор месторождения глинистого сырья в качестве источника материала для создания инженерных барьеров;
- доступность месторождений различного типа в РФ;

- однородность минерального состава получаемого сырья;
- особенности строения монтмориллонита разных пластов одного месторождения;
- скорости добычи и перспективы использования сырья того или иного месторождения в течение 10 лет и дольше и т. д.

Выбор месторождения/пласта для использования сырья в качестве компонентов СИБ должен осуществляться с учетом всех требований к материалу и геологических критериев приемлемости.

Общая последовательность работ по выбору материалов и проектированию строения и конструкции буферного слоя должна начинаться с определения показателей свойств в лабораторном масштабе на основе существующих стандартов или методов, получивших распространение в научно-исследовательском сообществе. Далее необходимы геотехническое исследование, по результатам которого осуществляется обратная связь с предыдущим этапом, и, наконец, промышленное исследование.

Расчетно-аналитическое сопровождение разработки системы инженерных барьеров безопасности

Расчетное моделирование сопровождает все этапы разработки системы инженерных барьеров безопасности. Именно использование результатов вычислений позволяет установить требования к материалам элементов инженерных барьеров для выполнения ими функций безопасности. Только модельные расчеты позволяют рассмотреть различные варианты изменения свойств материалов в зависимости от внешних воздействий и условий. Кроме того, построение модели, результаты которой согласуются с экспериментом, позволяет констатировать, что сформировано понимание данного процесса.

Модели в контексте проблем выбора и обоснования материалов для элементов СИБ можно разделить на два типа:

- описывающие процессы переноса радионуклидов через элементы системы инженерных барьеров при заданных свойствах материалов;
- отображающие изменения свойств материалов в результате химических реакций, физико-механических воздействий и т. п., для которых также возможна постановка экспериментов.

Для моделирования химических процессов, вызывающих изменение свойств материалов, могут быть использованы три подхода:

- 1) равновесный, при котором используются только равновесные и аналитические модели без учета кинетики;
- 2) кинетический, в котором происходит учет аналитических и численных моделей кинетики разных процессов;
- 3) комбинация кинетического и равновесного подхода.

Разработка каждой модели представляет собой итерационный процесс, при котором на начальном этапе используется имеющаяся информация о рассматриваемом процессе: данные по свойствам материалов, физико-химическим условиям в среде, химическом составе поровой воды и минеральной структуре глинистых и прочих материалов СИБ. Полученные в ходе экспериментов сведения должны предоставить возможность параметрического обеспечения расчетно-прогностических моделей. В свою очередь, результаты моделирования должны соответствовать наблюдаемым в ходе экспериментов трендам, а также обладать как описательной, так и прогнозной способностью по отношению к исследуемым процессам. Разработка модели должна сопровождаться оценкой ее чувствительности к входным параметрам, что позволяет выявить, какие из них оказывают наибольшее влияние на изменение результата, а следовательно, какие характеристики требуют уточнения. В некоторых случаях для уточнения свойств модели могут потребоваться дополнительные экспериментальные исследования (рис. 5).

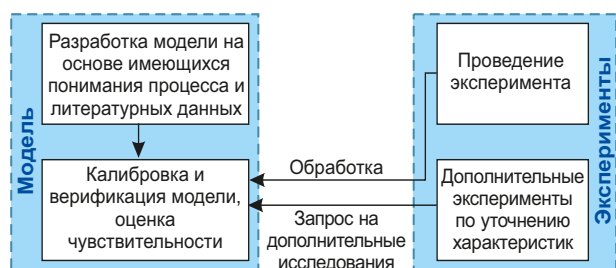


Рис. 5. Взаимосвязь экспериментальных исследований и разработки модели

Информационная система научного сопровождения ПИЛ

Имеющаяся и получаемая в результате экспериментов информация о составе, свойствах и эволюции перспективных для СИБ материалов, а также описание и схемы экспериментов загружаются в базу данных PULSE [48], которая является агрегатором сведений, связанных с проектом создания ПИЛ/ПГЗРО на участке «Енисейский» (рис. 6).

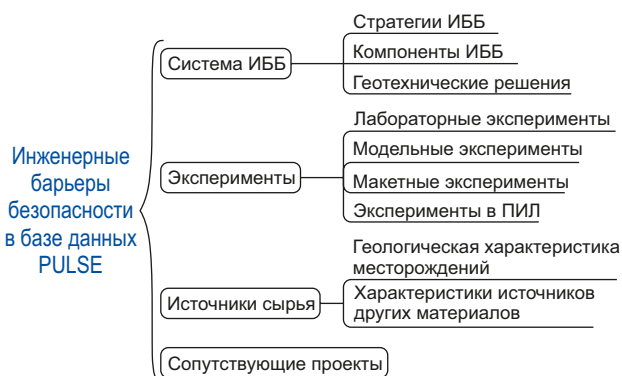


Рис. 6. Схема организации PULSE для данных о потенциальных глинистых материалах инженерных барьеров безопасности

Организация структуры для хранения и применения информации является важным аспектом обеспечения прозрачности в рамках обоснования безопасности. Данные по каждому эксперименту, включая условия проведения, результаты, а также их использование в разработке и верификации моделей, позволяют проследить обоснованность делаемых на их основе выводов.

Заключение

В данной статье рассмотрена стратегия развития работ, выполняемых в рамках «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронений РАО и оптимизации эксплуатационных параметров», ориентированных на создание системы инженерных барьеров безопасности, с особым вниманием к выбору буферных материалов. Выделены основные направления: определение комплекса физических, химических, физико-химических, физико-механических, теплофизических и других свойств материалов, их эволюция под воздействием различных потенциально возможных факторов в условиях ПГЗРО, технологические особенности создания составов с требуемыми характеристиками,

а также развитие подходов к моделированию эволюции сырья для выполнения долгосрочных прогнозов. Проведение этого комплекса испытаний позволит получить необходимые численные характеристики для математического описания процессов, протекающих в СИБ в ходе эксплуатации ПГЗРО и после его закрытия, скорректировать развиваемые модели, сузить объем работ на последующих этапах и оптимизировать план дальнейших исследований по созданию системы инженерных барьеров безопасности.

Первостепенной задачей разработки СИБ на данном этапе является обоснование выбора материала для создания буферного слоя из предложенного к рассмотрению перечня (бентонит различных месторождений, каолин, смеси каолин/бентонит). Этот процесс должен опираться на возможность выполнения возложенных на СИБ функций безопасности, таких как: (1) создание и поддержание предварительно рассчитанных механических, геохимических и гидрогеологических условий, благоприятных для изоляции упаковки с РАО; (2) защита ее от воздействия опасных процессов, явлений и факторов (ОСП, в том числе гидравлических, механических, химических и микробиологических), которые могут поставить под угрозу поддержание ею функции безопасности; (3) препятствование (ограничение и замедление) переноса радиоактивных веществ (миграции радионуклидов) в случае нарушения целостности упаковки с РАО. Эта задача должна быть решена в ближайшее время по результатам реализации комплексных работ.

Благодарности

Работы выполнены при частичной поддержке темы государственного задания ИГЕМ РАН. Исследования реализуются в рамках «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров (Стратегического мастер-плана исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО в Нижнеканском массиве (Красноярский край))» утвержденной Госкорпорацией «Росатом» с горизонтом планирования до 2030 г.

Литература

1. НП-055-14. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности.

2. НП-100-17. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов.

3. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 32—41.

4. Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management CO. Posiva SKB Report 01, 2017.

5. Design, production and initial state of the canister. Technical Report TR-10-14. Svensk Kärnbränslehantering AB. SKB, 2010.

6. Technical Report TR-20-10. Äspö Hard Rock Laboratory. Annual Report 2019. Svensk Kärnbränslehantering AB. SKB, 2020.

7. Technical Report TR-19-24. RD&D Programme 2019. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. Svensk Kärnbränslehantering AB. SKB, 2019.

8. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Капырин И. В., Медянцева Н. В., Шамина А. В. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Под ред. И. И. Линге и Ю. Д. Полякова. — М. : Комтехпринт, 2015. 208 с.

9. Pospikova I. et al. Czech national programme and disposal canister concept // Corrosion Engineering Science and Technology. 2017. Vol. 52. No. 1. Pp. 6—10. DOI: 10.1080/1478422X.2016.1174326.

10. Technical Report TR-06-30. Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. Svensk Kärnbränslehantering AB. SKB, 2006.

11. Deep geological repository for radioactive waste and spent nuclear fuel. Czech Radioactive Waste Repository Authority, SURAO, 2019. 42 p.

12. FEBEX project. Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock. Final Report. Enresa, 2000.

13. Bukov Underground Research Facility. Czech Radioactive Waste Repository Authority, SURAO, 2020. 22 p.

14. Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management CO. Report 01. Posiva Oy SKB, 2017.

15. Geological Disposal: A review of the development of bentonite barriers in the KBS-3V disposal concept. NDA Technical Note 21665941, 2014. 84 p.

16. Ahonen L., Korkeakoski P., Tiljander M., Kivikoski H., Laaksonen R. Quality Assurance of the Bentonite Material. Posiva Working Report 2008-33. Finland, Eurajoki, 2008. 126 p.
17. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Линге И. И., Пронь И. А. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть I. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в европейских странах. — М. : ИБРАЭ РАН, 2017. 35 с.
18. Baborova L., Vopalka D. et al. Migration Behaviour of Strontium in Czech Bentonite Clay // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2016. Vol. 4. No. 3. Pp. 293–306. DOI: 10.13044/j.sdewes.2016.04.0023.
19. Крупская В. В., Закусин С. В., Лехов В. А. и др. Изоляционные свойства бентонитовых барьерных систем для захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 35–55. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.
20. Sellin P., Leupin O. X. The use of clay as an engineered barrier in radioactive-waste management — a review // Clays and Clay Minerals. 2013. Vol. 61. No. 6. Pp. 477–498. DOI:10.1346/CCMN.2013.0610601.
21. Kaufhold S., Dohrmann R., Ufer K. et al. Interactions of bentonite with metal and concrete from the FEBEX experiment: Mineralogical and geochemical investigations of selected sampling sites // Clay Minerals. 2018. Vol. 53. No. 4. Pp. 745–763. DOI: 10.1180/clm.2018.54.
22. Sabodina M. N., Kalmykov S. N., Sapozhnikov Yu. A. et al. Neptunium, plutonium and ¹³⁷Cs sorption by bentonite clays and their speciation in pore waters // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2006. Vol. 270. No. 2. Pp. 349–355. DOI: 10.1007/s10967-006-0356-6.
23. Belousov P., Semenkova A., Zakusin S. et al. Cesium sorption and desorption on glauconite, bentonite, zeolite and diatomite // Minerals. 2019. Vol. 9. No. 10. P. 625. DOI: 10.3390/min9100625.
24. Siroux B., Beaucaire C., Tabarant M. et al. Adsorption of strontium and caesium onto an Na-MX80 bentonite: Experiments and building of a coherent thermodynamic modelling // Appl. Geochem. 2017. Vol. 87. Pp. 167–175. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.10.022.
25. Durrant C. B., Begg J. D., Kersting A. B. et al. Cesium sorption reversibility and kinetics on illite, montmorillonite, and kaolinite // The Sci. Tot. Environ. 2018. Vol. 610–611. Pp. 511–520. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.122.
26. Mayordomo N., Alonso U., Missana T. Effects of γ -alumina nanoparticles on strontium sorption in smectite: Additive model approach // Applied Geochemistry. 2019. Vol. 100. Pp. 121–130. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.11.012.
27. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Tyupina E. A. et al. Transformation of Structure and Adsorption Properties of Montmorillonite under Thermochemical Treatment // Geochemistry International. 2019. Vol. 57. No. 3. Pp. 314–330. DOI: 10.1134/S0016702919030066.
28. Krupskaya V., Zakusin S., Tyupina E. et al. Experimental study of montmorillonite structure and transformation of its properties under treatment with inorganic acid solutions // Minerals. 2017. Vol. 7. No. 4. Pp. 49. DOI: 10.3390/min7040049.
29. Pentrák M., Hronský V., Pálková H. et al. Alteration of fine fraction of bentonite from Kopernica (Slovakia) under acid treatment: A combined XRD, FTIR, MAS NMR and AES study // Appl. Clay Sci. 2018. Vol. 163. Pp. 204–213. DOI: 10.1016/j.clay.2018.07.028.
30. Jozefaciuk G., Bowanko G. Effect of Acid and Alkali Treatments on Surface Areas and Adsorption Energies of Selected Minerals // Clays and Clay Minerals. 2002. Vol. 50. No. 6. Pp. 771–783. DOI: 10.1346/000986002762090308.
31. Morozov I., Zakusin S., Kozlov P. et al. Bentonite-Concrete Interactions in Engineered Barrier Systems during the Isolation of Radioactive Waste Based on the Results of Short-Term Laboratory Experiments // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 6. Pp. 3074. DOI: 10.3390/app12063074.
32. Bauer A., Lanson B., Ferrage E., Emmerich K. et al. The fate of smectite in KOH solutions // American Mineralogist. 2006. Vol. 91. Pp. 1313–1322. DOI: 10.2138/am.2006.2151.
33. Savage D., Noy D., Mihara M. Modelling the interaction of bentonite with hyperalkaline fluids // Applied Geochemistry. 2002. Vol. 17. No. 3. Pp. 207–223. DOI: 10.1016/S0883-2927(01)00078-6.
34. Белоусов П. Е., Крупская В. В. Бентонитовые глины России и стран ближнего зарубежья // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 3. С. 79–90. DOI: 10.18599/grs.2019.3.79-90.
35. Расчетное обоснование долговременной безопасности глубинного захоронения РАО 1-го и 2-го классов, подготовка исходных данных для развития подземной исследовательской лаборатории и технологий захоронения. ЭТАП 5 (задачи № 1–4) [Текст]: отчет (Итоговый) / ФГБУ ИБРАЭ РАН; рук. И. И. Линге; отв. исполн.: С. С. Уткин; исполнит. А. А. Аракелян [и др.]. — М., 2021. 2676 с. — Инв. № 0184-ДСП.
36. Физико-химические характеристики барьерных материалов в условиях эксплуатации ПГЗРО. Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив). Том 12.1.4. Арх. №А-744-13. — Москва, ОАО «ВНИИПТ», 2013.

37. Богатов С. А., Крючков Д. В., Павлов Д. И., Сыченко Д. В. Анализ различных концепций захоронения РАО класса 1 в кристаллических породах // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 66–77. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-66-77.
38. Богатов С. А. Захоронение остеклованных ВАО в вертикальных скважинах с цементной закладкой — плюсы и минусы с точки зрения обеспечения долговременной безопасности ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2018. № 1 (2). С. 21–33.
39. Мартынов К. В., Захарова Е. В. Анализ локализации и сценария эволюции ПГЗРО на участке Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 52–62.
40. Мартынов К. В., Захарова Е. В., Кулюхин С. А. Альтернативная концепция устройства защитных барьеров при глубинном захоронении РАО класса 1 на Енисейском участке Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (19). С. 68–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-68-84.
41. Богатов С. А., Дробышевский Н. И., Крупская В. В., Закусин С. В., Лехов В. А. Предварительные оценки параметров инженерных барьеров в концепции ПГЗРО с горизонтальным размещением упаковок РАО в контейнерах с медным покрытием // Радиоактивные отходы. 2023. (В печати).
42. Крупская В. В., Бирюков Д. В., Белоусов П. Е., Лехов В. А., Романчук А. Ю., Калмыков С. Н. Применение природных глинистых материалов для повышения уровня ядерной и радиационной безопасности объектов ядерного наследия // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 30–43.
43. Юшицин К. В. и др. Бесполостное заполнение пустот в реакторном пространстве при выводе из эксплуатации ПУТР // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2012. № 2. С. 100–105.
44. Ильина О. А., Крупская В. В., Винокуров С. Е., Калмыков С. Н. Современное состояние в разработках и использовании глинистых материалов в качестве инженерных барьеров безопасности на объектах консервации и захоронения РАО в России // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 71–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.
45. Калистратов А. А., Ильина О. А., Юданова А. О., Сёмин П. В., Муздыбаева Ш. А. Опытная демонстрация гидроизоляционных свойств барьерных глинистых материалов // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 82–89.
46. Tyurina E. A., Kozlov P. P., Krupskaya V. V. Application of Cement-Based Materials as a Component of an Engineered Barrier System at Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste — A Review // Energies. 2023. Vol. 16. No. 2. P. 605. DOI: 10.3390/en16020605.
47. Трофимов В. Т., Королев В. А., Вознесенский Е. А., Голодковская Г. А., Васильчук Ю. К., Зиангиров Р. С. Грунтоведение / Под ред. В. Т. Трофимова. 6-е изд. — М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
48. Свительман В. С., Савельева Е. А., Бутов Р. А., Линге Ин. И., Дорофеев А. Н., Тихоновский В. Л. Информационно-аналитическая платформа программы исследований по обоснованию долговременной безопасности российского ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 79–87.

Информация об авторах

Крупская Виктория Валерьевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Тюпина Екатерина Александровна, кандидат технических наук, доцент, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (125047, Москва, Миусская пл., д. 9), e-mail: tk1972@mail.ru.

Закусин Сергей Вячеславович, научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: zakusinsergey@gmail.com.

Ильина Ольга Александровна, руководитель проекта, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: ilina@ibrae.ac.ru.

Савельева Елена Александровна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: esav@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Крупская В. В., Тюпина Е. А., Закусин С. В., Ильина О. А., Савельева Е. А. Обоснование выбора глинистых материалов для разработки инженерных барьеров безопасности при изоляции РАО в ПГЗРО на участке недр «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 98–112. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-98-112.

ON THE FEASIBILITY ASSESSMENT OF CLAY MATERIAL APPLICATION IN THE DEVELOPMENT OF ENGINEERED SAFETY BARRIER DESIGNS FOR DEEP GEOLOGICAL RW DISPOSAL AT THE YENISEISKIY SITE

Krupskaya V. V.¹, Tyupina E. A.², Zakusin S. V.¹, Ilina O. A.³, Saveleva E. A.³

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

³Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on February 13, 2023

The paper considers the basic strategy for further R&D focused on the development of engineered safety barrier system (EBS). It places particular emphasis on materials and structure of the buffer layer with relevant research implemented under the Comprehensive R&D Program aimed at demonstrating the long-term safety of RW disposal in a deep disposal facility (DGR) and optimization of the repository performance indicators. The paper identifies the key areas for the required R&D. It notes that a comprehensive research program will result in some numerical characteristics necessary to provide a mathematical description of the processes occurring in the EBS at operational and post-closure stages. They may be also applied to adjust the developed models narrowing down the scope of work at subsequent stages and optimizing further research plan required for EBS design development.

Keywords: radioactive waste, engineered safety barriers, bentonite, deep RW disposal facilities.

Acknowledgments

The study was sponsored under a state contract performed by IGEM RAS. The research has been implemented under the Comprehensive Research Program Aimed at Demonstrating the Long-Term RW Disposal Safety and Optimizing the Operational Parameters (Strategic Master Plan for Research Aimed at Demonstrating the Safety of DGR Construction, Operation and Closure in the Nizhnekan-skiy Rock Mass (Krasnoyarsk Territory)) approved by the State Corporation Rosatom considering a planning horizon until 2030.

References

1. NP-055-14. Radioactive Waste Disposal. Principles, Criteria and Basic Safety Requirements.
2. NP-100-17. Requirements to the Contents and Structure of the Safety Analysis Reports on Radioactive Waste Disposal Facilities.
3. Dorofeev A. N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. Strategicheskii master-plan issledovaniy v obosnovanie bezopasnosti sooruzheniya, ehkspluatatsii i zakrytiya punkta glubinnogo zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov [Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction,

- Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 32–41.
4. Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management CO. Posiva SKB Report 01, 2017.
5. Design, production and initial state of the canister. Technical Report TR-10-14. Svensk Kärnbränslehantering AB. SKB, 2010.
6. Technical Report TR-20-10. Äspö Hard Rock Laboratory. Annual Report 2019. Svensk Kärnbränslehantering AB. SKB, 2020.
7. Technical Report TR-19-24. RD&D Programme 2019. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. Svensk Kärnbränslehantering AB. SKB, 2019.
8. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V., Medyantsev N. V., Shamina A. V. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhoroneniya OYAT i RAO* [Overview of International SNF and RW Disposal Practices]. Edt. by I. I. Linge and Yu. D. Polyakov. Moscow, Komtekhpri Publ., 2015. 208 p.
9. Pospikova I. et al. Czech national programme and disposal canister concept. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 2017, vol. 52, no. 1, pp. 6–10. DOI: 10.1080/1478422X.2016.1174326.
10. Technical Report TR-06-30. Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. Svensk Kärnbränslehantering AB. SKB, 2006.
11. Deep geological repository for radioactive waste and spent nuclear fuel. Czech Radioactive Waste Repository Authority, SURAO, 2019. 42 p.
12. FEBEX project. Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock. Final Report. Enresa, 2000.
13. Bukov Underground Research Facility. Czech Radioactive Waste Repository Authority, SURAO, 2020. 22 p.
14. Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management CO. Report 01. Posiva Oy SKB, 2017.
15. Geological Disposal: A review of the development of bentonite barriers in the KBS-3V disposal concept. NDA Technical Note 21665941, 2014. 84 p.
16. Ahonen L., Korkeakoski P., Tiljander M., Kivikoski H., Laaksonen R. Quality Assurance of the Bentonite Material. Posiva Working Report 2008-33. Finland, Eurajoki, 2008. 126 p.
17. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Linge I. I., Pron I. A. *Zarubezhnyye proyekty zakhoroneniya OYAT i RAO. Chast' I. Aktual'noye sostoyaniye projektov sozdaniya punktov glubinnogo geologicheskogo zakhoroneniya v yevropeyskikh stranakh* [International SNF and RW Disposal Projects. Part I. State-of-Art in the Development of Deep Geological Disposal Facilities in European Countries]. Moscow, IBRAE RAN Publ., 2017. 35 p.
18. Baborova L., Vopalka D. et al. Migration Behaviour of Strontium in Czech Bentonite Clay. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2016, vol. 4, no. 3, pp. 293–306. DOI: 10.13044/j.sdewes.2016.04.0023.
19. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A., Dorzhieva O. V., Belousov P. E., Tyupina E. A. Izoilyatsionnye svoistva bentonitovykh bar'ernykh sistem dlya zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov v Nizhněkanskom massive [Buffer Properties of Bentonite Barrier Systems for Radioactive Waste Isolation in Geological Repository in the Nizhněkanskiy Massif]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 35–55. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.
20. Sellin P., Leupin O. X. The use of clay as an engineered barrier in radioactive-waste management — a review. *Clays and Clay Minerals*, 2013, vol. 61, no. 6, pp. 477–498. DOI: 10.1346/CCMN.2013.0610601.
21. Kaufhold S., Dohrmann R., Ufer K. et al. Interactions of bentonite with metal and concrete from the FEBEX experiment: Mineralogical and geochemical investigations of selected sampling sites. *Clay Minerals*, 2018, vol. 53, no. 4, pp. 745–763. DOI: 10.1180/clm.2018.54.
22. Sabodina M. N., Kalmykov S. N., Sapozhnikov Yu. A. et al. Neptunium, plutonium and ¹³⁷Cs sorption by bentonite clays and their speciation in pore waters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2006, vol. 270, no. 2, pp. 349–355. DOI: 10.1007/s10967-006-0356-6.
23. Belousov P., Semenkov A., Zakusin S. et al. Cesium sorption and desorption on glauconite, bentonite, zeolite and diatomite. *Minerals*, 2019, vol. 9, no. 10, p. 625. DOI: 10.3390/min9100625.
24. Siroux B., Beaucaire C., Tabarant M. et al. Adsorption of strontium and caesium onto an Na-MX80 bentonite: Experiments and building of a coherent thermodynamic modelling. *Appl. Geochem.*, 2017, vol. 87, pp. 167–175. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.10.022.
25. Durrant C. B., Begg J. D., Kersting A. B. et al. Cesium sorption reversibility and kinetics on illite, montmorillonite, and kaolinite. *The Sci. Tot. Environ.*, 2018, vol. 610–611, pp. 511–520. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.122.

26. Mayordomo N., Alonso U., Missana T. Effects of γ -alumina nanoparticles on strontium sorption in smectite: Additive model approach. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 100, pp. 121–130. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.11.012.
27. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Tyupina E. A. et al. Transformation of Structure and Adsorption Properties of Montmorillonite under Thermochemical Treatment. *Geochemistry International*, 2019, vol. 57, no. 3, pp. 314–330. DOI: 10.1134/S0016702919030066.
28. Krupskaya V., Zakusin S., Tyupina E. et al. Experimental study of montmorillonite structure and transformation of its properties under treatment with inorganic acid solutions. *Minerals*, 2017, vol. 7, no. 4, pp. 49. DOI: 10.3390/min7040049.
29. Pentrák M., Hronský V., Pálková H. et al. Alteration of fine fraction of bentonite from Kopernica (Slovakia) under acid treatment: A combined XRD, FTIR, MAS NMR and AES study. *Appl. Clay Sci.*, 2018, vol. 163, pp. 204–213. DOI: 10.1016/j.clay.2018.07.028.
30. Jozefaciuk G., Bowanko G. Effect of Acid and Alkali Treatments on Surface Areas and Adsorption Energies of Selected Minerals. *Clays and Clay Minerals*, 2002, vol. 50, no. 6, pp. 771–783. DOI: 10.1346/000986002762090308.
31. Morozov I., Zakusin S., Kozlov P. et al. Bentonite-Concrete Interactions in Engineered Barrier Systems during the Isolation of Radioactive Waste Based on the Results of Short-Term Laboratory Experiments. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 6, p. 3074. DOI: 10.3390/app12063074.
32. Bauer A., Lanson B., Ferrage E., Emmerich K. et al. The fate of smectite in KOH solutions. *American Mineralogist*, 2006, vol. 91, pp. 1313–1322. DOI: 10.2138/am.2006.2151.
33. Savage D., Noy D., Mihara M. Modelling the interaction of bentonite with hyperalkaline fluids. *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17, no. 3, pp. 207–223. DOI: 10.1016/S0883-2927(01)00078-6.
34. Belousov P. Ye., Krupskaya V. V. Bentonitovyie gliny Rossii i stran blizhnego zarubezh'ya [Bentonite Clays in Russia and in the Neighbouring Countries]. *Georesursy — Geological Resources*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 79–90. DOI: 10.18599/grs.2019.3.79-90.
35. *Raschetnoye obosnovaniye dolgovremennoy bezopasnosti glubinogo zakhroneniya RAO 1-go i 2-go klassov, podgotovka iskhodnykh dannykh dlya razvitiya podzemnoy issledovatel'skoy laboratorii i tekhnologii zakhroneniya. ETAP 5 (zadachi № 1-4)* [Numerical Study Aiming to Demonstrate the Long-term Safety for RW Class 1 and 2 Deep Disposal, Collection of Initial Data for the Development of an Underground Research Laboratory and Disposal Methods. STAGE 5 (tasks No. 1-4)] : Final Report / Nuclear Safety Institute of RAS; Research Supervisor I. I. Linge; responsible officer: S. S. Utkin; executed by A. A. Arakelyan [et al.]. — Moscow, 2021. — 2676 p. Inv. No. 0184-DSP.
36. *Fiziko-khimicheskiye kharakteristiki bar'yernykh materialov v usloviyakh ekspluatatsii PGZRO. Podgotovka proyektnoy dokumentatsii po stroitel'stvu ob'yektov okonchatel'noy izolyatsii radioaktivnykh otkhodov (Krasnoyarskiy kray, Nizhne-Kanskiy massiv)* [Physical and Chemical Characteristics of Barrier Materials under DGR Operation. Development of Design Documentation for the Deep RW Disposal Facility (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekansky rock mass)]. Volume 12.1.4. Arch. No. A-744-13. JSC VNIPIPT. Moscow, 2013.
37. Bogatov S. A., Kryuchkov D. V., Pavlov D. I., Sychenko D. V. Analiz razlichnykh kontseptsii zakhroneniya RAO klassa 1 v kristallicheskiykh porodakh [Analysis of Various Concepts for RW Class 1 Disposal in Crystalline Rocks]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 66–77. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-66-77.
38. Bogatov S. A. Zakhronenie osteklovannykh VAO v vertikal'nykh skvazhinakh s tsementnoi zakladkoi — plyusy i minusy s tochki zreniya obespecheniya dolgovremennoi bezopasnosti PGZRO [HLW Disposal of in Verticale Deposition Holes with Cement Backfill — Pro and Contra with Regard to Long Term Safety of Geological Disposal Facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 1 (2), pp. 21–33.
39. Martynov K. V., Zakharova E. V. Analiz lokalizatsii i stseneriya evolyutsii PGZRO na uchastke Yeniseyskiy (Krasnoyarskiy kray) [Assessment of RW Containment and DGR Evolution Scenario for the Yeniseiskiy Site (Krasnoyarsk Region)]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 52–62.
40. Martynov K. V., Zakharova E. V., Kulyukhin S. A. Al'ternativnaya kontseptsiya ustroystva zashchitnykh bar'erov pri glubinnom zakhronenii RAO klassa 1 na Eniseiskom uchastke Nizhnekanskogo massiva [Alternative Conceptual Designs of Safety Barriers Proposed for Deep RW Class 1 Disposal at the Yeniseiskiy Site in the Nizhnekanskiy Rock Mass]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2022, no. 2 (19), pp. 68–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-68-84.
41. Bogatov S. A., Drobyshevskiy N. I., Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A. Predvaritel'nyye otsenki parametrov inzhenernykh bar'yerov v kontseptsii PGZRO s gorizontalmym razmeshcheniyem upakovok RAO v konteynerakh s mednym pokrytiyem [Preliminary Assessments of EBS Parameters under the DGR Concept Providing for Horizontal Orientation of RW Packages in Copper-Coated Containers]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2023. (In print).

42. Krupskaya V. V., Biryukov D. V., Belousov P. E., Lekhov V. A., Romanchuk A. Yu., Kalmykov S. N. Primenenie prirodnykh glinistykh materialov dlya povysheniya urovnya yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti ob"ektov yadernogo naslediya [The use of natural clay materials to increase the nuclear and radiation safety level of nuclear legacy facilities]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 30–43.
43. Yushitsin K. V. et al. Bepolostnoye zapolneniye pustot v reaktornom prostranstve pri vyvode iz ekspluatatsii PUGR [Cavity-free Filling of Voids in the Reactor Space During PUGR Decommissioning]. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologiy i okruzhayushchey sredy — Safety of Nuclear Technologies and the Environment*, 2012, no. 2, pp. 100–105.
44. Ilina O. A., Krupskaya V. V., Vinokurov S. E., Kalmykov S. N. Sovremennoe sostoyanie v razrabotkakh i ispol'zovanii glinistykh materialov v kachestve inzhenernykh bar'erov bezopasnosti na ob"ektakh konservatsii i zakhoroneniya RAO v Rossii [State-of-Art in the Development and Use of Clay Materials as Engineered Safety Barriers at Radioactive Waste Conservation and Disposal Facilities in Russia]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 71–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.
45. Kalistratov A. A., Ilina O. A., Yudanova A. O., Somin P. V., Muzdybayeva Sh. A. Opytnaya demonstratsiya gidroizolyatsionnykh svoystv bar'yernykh glinistykh materialov [Waterproofing Properties of Barrier Clay Materials: Experimental Demonstration]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2023, no. 2 (23), pp. 82–89.
46. Tyupina E. A., Kozlov P. P., Krupskaya V. V. Application of Cement-Based Materials as a Component of an Engineered Barrier System at Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste — A Review. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 2, p. 605. DOI: 10.3390/en16020605.
47. Trofimov V. T., Korolev V. A., Voznesenskiy E. A. et al. *Gruntovedeniye* [Soil Science]. Edt. by Trofimov V. T. Moscow, MGU Publishing House Publ., 2005. 1024 p.
48. Svitelman V. S., Saveleva E. A., Butov R. A., Linge In. I., Dorofeev A. N., Tikhonovsky V. L. Informatsionno-analiticheskaya platforma programmy issledovaniy po obosnovaniyu dolgovremennoi bezopasnosti rossiiskogo PGZRO [Informational and Software Environment of the Russian Deep Geological Repository Research Program]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 79–87.

Information about the authors

Krupskaya Victoria Valerievna, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russia), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Tyupina Ekaterina Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia), e-mail: tk1972@mail.ru.

Zakusin Sergej Vyacheslavovich, Researcher, Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyy per., Moscow, 119017, Russia), e-mail: zakusinsergey@gmail.com.

Ilina Olga Alexandrovna, Project Manager, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsckaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: ilina@ibrae.ac.ru.

Saveleva Elena Aleksandrovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsckaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: esav@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Krupskaya V. V., Tyupina E. A., Zakusin S. V., Ilina O. A., Saveleva E. A. On the feasibility assessment of clay material application in the development of engineered safety barrier designs for deep geological RW disposal at the Yeniseiskiy site. *Radioactive Waste*, 2023, no. 2 (23), pp. 98–112. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-98-112. (In Russian).