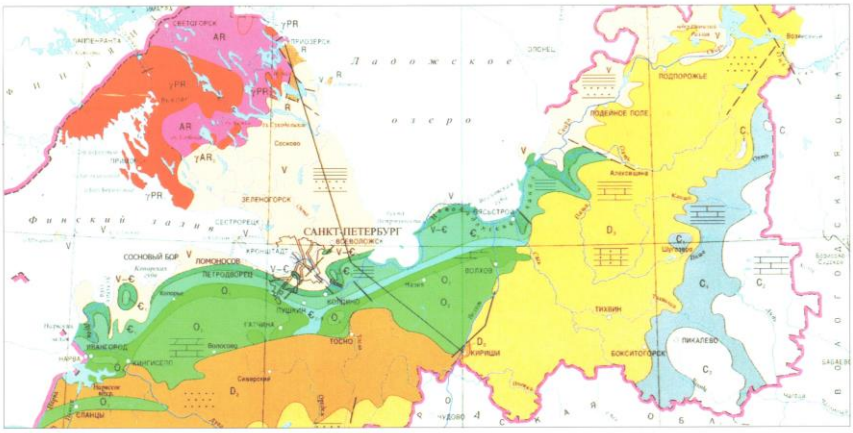
ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
«РОСАТОМ»
ФГУП НПО «РАДИЕВЫЙ ИНСТИТУТ им. В.Г. ХЛОПИНА»

# Глины как геологическая среда для изоляции радиоактивных отходов

В. Г. Савоненков, Е. Б. Андерсон, С. И. Шабалев




Санкт-Петербург
2012

УДК 621.039.7

Рассмотрены характерные свойства глинистых пород – перспективной геологической среды для подземной изоляции радиоактивных отходов, условия образования и основные свойства глинистых формаций, структурно-минералогическая классификация глин.

Представлен краткий обзор зарубежных исследований глинистых пород с целью подземного захоронения радиоактивных отходов, а также перспективы использования глинистых формаций в Российской Федерации. Наиболее детально охарактеризованы вендские и кембрийские глины Ленинградской области, которые по уровню исследований наиболее подготовлены для строительства пункта подземной изоляции отходов.

Рассмотрены фундаментальные вопросы удаления радиоактивных отходов в геологические формации – критериальный анализ для выбора площадок, оценки риска и проблемы долгосрочного прогнозирования условий безопасности геотехнологических систем. Проведен анализ геологических факторов, определяющих безопасность изоляции радиоактивных отходов в коренных отложениях глин Ленинградской области.

Представленные материалы предназначены для специалистов различных научных направлений, занимающихся изоляцией радиоактивных отходов в геологические формации.

Рецензент: к.х.н. Л.Г.Царицына

## Оглавление

**Введение** ..... **5**
Основные закономерности образования и развития геологических тел
Геологическая концепция изоляции радиоактивных отходов
Геологические критерии выбора площадок для подземной изоляции РАО

**1. Условия образования глинистых пород** ..... **14**
***1.1. Образование осадочного материала***
***1.2. Перенос или миграция вещества***
***1.3. Природные коллоидные системы***
***1.4. Наноминералогия***
***1.5. Накопление осадка (седиментация)***
***1.6. Преобразование осадка в осадочную породу (литогенез)***

**2. Основные свойства глинистых пород** ..... **22**
***2.1. Водонепроницаемость***
***2.2. Пластичность***
***2.3. Набухаемость***
***2.4. Поглощающие свойства***

**3. Классификация глин, минералогический состав** ..... **30**
***3.1. Группа каолинита***
***3.2. Группа монтмориллонита***
***3.3. Группа иллита (гидрослюд)***

**4. Зарубежные исследования глинистых пород для изоляции РАО** ..... **43**
***4.1. Бельгия***
***4.2. Франция***
***4.3. Великобритания***
***4.4. Швейцария***
***4.5. Италия***
***4.6. Германия***

**5. Перспективы использования глинистых формаций в Российской Федерации** ..... **75**
***5.1. Глинистые формации, перспективные для подземной изоляции РАО*** ..... **77**
5.1.1. Коренные отложения глин Ленинградской области
5.1.2. Верхневендские аргиллиты Архангельской области
5.1.3. Глины майкопской серии Южного федерального округа
5.1.4. Глинистые формации Западно-Сибирской плиты

*5.2. Использование глинистых формаций для строительства приповерхностных ПЗРО* ..... **132**

*5.3. Использование глин для инженерных барьеров* ..... **136**

**6. Критериальный анализ выбора перспективных площадок** ..... **137**

**7. Оценка риска для геотехнологической системы изоляции РАО** ..... **145**

**8. Проблемы долгосрочного прогнозирования условий подземной изоляции РАО** ..... **151**

*8.1. Глобальное прогнозирование*

*8.2. Региональное прогнозирование*

*8.3. Локальное прогнозирование*

**9. Геологические факторы, определяющие безопасность изоляции РАО в коренных отложениях глин Ленинградской области** ..... **176**

**Заключение** ..... **195**

**Литература** ..... **200**

## Введение

Выделение перспективных для безопасного захоронения радиоактивных отходов (РАО) геологических формаций и горных пород в первую очередь основывается на доказательстве их изолирующих и барьерных свойств. С этой целью разработаны различные критерии, определяющие необходимые условия для обоснования строительства подземного геотехнологического комплекса – пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО). Требования критериев выбора площадок конкретизированы законодательно-нормативными документами, руководствами и рекомендациями.

Для захоронения долгоживущих радионуклидов, требуемое время изоляции составляет сотни тысяч лет и сопоставимо с крупными циклами эволюции поверхности Земли и биосферы. Для прогнозирования условий подземной изоляции РАО в данном случае используются известные геологические закономерности. Необходимо отметить, что обоснование таких закономерностей или «законов-тенденций» в сфере геологических наук представляет задачу предельной сложности [1].

Геологические системы представляют собой упорядоченную совокупность взаимодействующих литосферных компонентов, связанных общей историей развития и физико-химическими процессами, происходящими с минеральными соединениями в природной среде.

Сложность геологических систем определяется:

- большим числом материальных компонентов, составляющих систему;
- обширным набором параметров, характеризующих её свойства;
- многообразием взаимосвязей между компонентами.

Любой геологический процесс сопровождается случайными флуктуациями, статистически распределенными во времени. Время – обязательный, а в ряде случаев и определяющий элемент природных систем. Увеличение интервалов времени, требуемых для изоляции РАО, увеличивает неопределенность оценки состояния и поведения геологической системы.

При современном, достаточно высоком уровне знаний о Земле количественные оценки обычно опираются на многие предпосылки [2, 3]. Вследствие этого получаемые оценки имеют некоторую неопределенность, которая сохраняется независимо от того, сколько дополнительной информации будет получено. При этом изменчивость многих параметров природных систем может определяться не только случайными отклонениями, но и самой структурой системы.

Требуются серьёзные обоснования для принятия количественных параметров, используемых при моделировании природных процессов. Пространственно-временны́е вариации свойств геологических систем ставят расчетные модели в рамки оценок, выполненных с той или иной точностью [4].

Решение кардинальных задач, связанных с определением свойств геологических формаций и прогнозированием безопасности изоляции РАО, использует методологический принцип, основу которого составляют фундаментальные природные закономерности (фундаментальные принципы) строения и развития литосферы. Их совокупность отражает уровень существующих научных знаний, степень вскрытия и понимания объективно существующих природных явлений и процессов. Геология включает различные научные направления наук о Земле, от практически «точных» до исторических, не имеющих строгих законов и теорий.

Необходимо признать, что «в собственно геологии не будут открыты законы такой же строгости, универсальности, общности и постоянства, какими вооружены точные науки» [1]. Учитывая неоднозначность принятия в геологических науках термина «закон», далее в тексте используется рекомендуемый термин «закономерность».

***Основные закономерности образования и развития геологических тел***

Для решения задач, связанных с проблемой удаления РАО в геологические формации, целесообразно использовать отдельные фундаментальные принципы и закономерности, выявленные по результатам теоретических и практических работ [5–8].

1) Закономерности иерархии геологических тел.

Каждое геологическое тело является частью более крупного геологического тела и участвует вместе с ним в геологических процессах высшего ранга.

Закон учитывается при выделении пространственных зон ПЗРО – ближней и дальней зоны (near-field and far-field region). Используется и более дробное выделение структурно-геохимических зон, включающее:

- приконтурную контактную зону, в пределах которой вмещающие породы испытывают наибольшее воздействие нескольких техногенных факторов: механических, физико-химических, радиационных, тепловых;
- буферную зону – блок горных пород, выделенных для размещения подземных сооружений ПЗРО, пределами которого ограничивается прогнозируемое распространение радиоактивного миграционного ореола изолируемых радионуклидов;
- дальняя региональная зона, в которую входит вся совокупность пород литосферного сегмента на участке строительства ПЗРО и горного отвода.

Например, положение и размеры пласта нижнекембрийских глин Ленинградской области позволяют использовать его для подземной изоляции РАО. С этой целью проведено комплексное изучение глин как природного геохимического барьера. Прогноз безопасности не ограничивается анализом условий развития и изменения нижнекембрийских глин, а рассматривает всю совокупность пород, входящих в крупную платформенную структуру, включая древние формации кристаллического фундамента.

2) Закономерности неоднородности геологических тел.

Геологические тела неоднородны по вещественному составу и строению.

Неоднородность – специфическое природное свойство геологических тел всех рангов, от кристаллов до геосфер. Чем выше ранг, тем выше степень неоднородности. Одновременно с усложнением геологических формаций в них усиливается гетерогенность. Максимально гетерогенна земная кора. Внутренняя неоднородность особенно характерна для осадочных пород, формирование которых происходит за длительные промежутки времени, например, глинисто-песчаных толщ крупных палеобассейнов.

Неоднородность является причиной многих геохимических процессов: различия концентраций приводят к диффузии вещества, химическая дифференциация обусловливает миграционные процессы, различия фазового состава приводят к ликвации в расплавах.

Практика освоения и использования подземных пространств убедительно показала, что с увеличением объема горных пород изменяются их свойства. Закон неоднородности учитывается при оценках адекватности свойств горных пород за пределами границ подземных лабораторий в зонах экстраполяции (extrapolation zone).

3) Закономерности множества связей.

Всякое геологическое тело имеет бесчисленное множество связей с другими геологическими телами и участвует во множестве геологических процессов различных рангов.

Множество природных процессов происходит одновременно. Одни связи сохраняются, другие разрушаются, третьи создаются заново. Современные компьютерные модели не могут охватить всё многообразие природных связей конкретного участка литосферы. При этом приходится учитывать факторы неопределенности и неполноту имеющихся исходных данных. Несмотря на существование обширных баз данных и сложных компьютерных моделей получение корректных количественных параметров для такого специфического и необычайно сложного объекта исследований, как геологическая среда, существенным образом затруднено [2, 9].

4) Закономерность цикличности геологических процессов.

Геологические процессы происходят циклично, ускоряясь, затухая и возрождаясь во времени.

Цикличность природных процессов, контролируемых космическими и планетарными процессами – одно из фундаментальных свойств окружающего нас мира. Амплитуда циклов разнообразна: от суточных (24 ч) до галактического года (около 215 млн лет). Циклические процессы могут развиваться быстро и энергично или медленно и вяло. Графически они подобны синусоидным процессам, но не тождественны, что, естественно, ограничивает возможность их математической обработки.

В развитии природных циклов могут участвовать последовательно несколько различных процессов – планетарных, тектонических, климатических и пр. К таким относятся материковые оледенения. Цикличность дает научное обоснование для прогнозирования целого ряда процессов и явлений, которые необходимо учитывать при оценках безопасности подземной изоляции РАО.

5) Закономерность постоянства тектонических процессов.

Движение блочных структур на разных иерархических уровнях является одним из фундаментальных свойств геологической среды.

Приповерхностная часть земной коры имеет систему разновеликих структурных нарушений, которые ограничивают сравнительно монолитные блоки горных пород. Сеть планетарной трещиноватости состоит из глобальных иерархически подчиненных систем разломов, закономерно ориентированных в регионах с однотипным геологическим строением [8]. Прочностные свойства пород в межблоковых промежутках значительно ниже прочности пород блока, и деформация горного массива происходит по зонам нарушений. Исключительно важно, «что именно дифференциальные движения в среде определяют долговременную механическую целостность массива, его несущие способности и, самое главное, изолирующие свойства» [10].

6) Закономерность дифференциации миграционных процессов.

Природные миграционные процессы (эндогенные, экзогенные, метаморфические и пр.) сопровождаются пространственной геохимической дифференциацией состава мигрирующих компонентов.

Миграционная дифференциация является постоянным и характерным геохимическим процессом и проявляется в зональности строения и распределения ком-

понентов – зональном строении магматических массивов, метаморфической зональности пород, зональности ореолов рассеяния рудных месторождений и пр.

Миграция является ключевой проблемой для оценки и прогноза безопасности изоляции РАО в геологических формациях. Детальный анализ природных систем перемещения вещества (каналов, среды, окружения) и закономерностей распределения (дифференциации) мигрантов в этих системах позволяет научно обосновать моделирование сложных миграционных процессов.

Подземная изоляция РАО предусматривает образование в пределах горного отвода ореольных структурно-геохимических зон, различающихся механизмами миграции и составом радионуклидов. Для оценки развития в пространстве и во времени ореолов рассеяния отдельных радионуклидов используются природные аналоги, в первую очередь месторождения радиоактивных элементов [11, 12].

***Геологическая концепция изоляции радиоактивных отходов***

Вскрытые закономерности развития литосферы и происходящих в ней процессов легли в основу базовой геологической концепции, которая содержит современное научное понимание и основные принципы, определяющие стратегию изоляции РАО в геологических формациях.

Базовая концепция устанавливает возможность безопасной изоляции радиоактивных отходов при соблюдении определенных правил и рекомендаций, обоснованных природными закономерностями и результатами натурных и технологических испытаний.

Концепция должна отражать уровень научно-технического и социально-экономического развития общества, соответствовать международным нормам и правилам, а также иметь возможности для своей реализации.

Необходимо отметить, что в отдельных нормативных документах геологические разделы представлены недостаточно четко и необоснованно кратко [13].

Приведенные ниже формулировки [14] следует рассматривать как предложения для включения в базовую геологическую концепцию.

- Размещение в геологических формациях с многобарьерной геотехнологической системой защиты – оптимальный по безопасности вариант научно обоснованного и технически доступного решения проблемы удаления РАО.
- В качестве литосферных вмещающих сред для изоляции отходов наиболее приемлемыми являются толщи осадочных глинистых пород, массивные слабопроницаемые блоки магматических и метаморфических пород, залежи каменной соли. Основное требование к вмещающим породам – удержать изолируемые радионуклиды в случае их миграции за пределы инженерных барьеров в прогнозируемом объеме рабочего блока (горного отвода).
- Пункт захоронения радиоактивных отходов является сложной многоуровневой геотехнологической системой, основное назначение которой – сохранить стабильность первоначальных условий изоляции радионуклидов в пространственно ограниченном объеме недр в течение заданного интервала времен.
- В природных условиях не существует строго закрытых геологических систем – есть системы более или менее открытые. Помещая радиоактивные отходы в литосферное пространство, мы их не полностью изолируем, а включаем в геохимический кругооборот, конфигурация которого и скорость перемещения радионуклидов определяют степень закрытости и стабильности геотехнологической системы изоляции в целом.

- Геологическая изолированность подземного могильника определяется параметрами трёх взаимосвязанных характеристик вмещающих горных пород:
  - каналов миграции различного структурно-масшабного уровня;
  - потоков подземных вод, флюидов, газов;
  - естественных и техногенных тепловых потоков.
- Основным механизмом миграции радионуклидов из подземного пункта изоляции является их движение в водной фазе.
- Оценка надежности геотехнологической системы изоляции включает:
  - прогноз скорости выделения радионуклидов из матриц и упаковок;
  - определение условий переноса (удержания) радионуклидов во вмещающих породах;
  - оценку поступления радионуклидов в доступную часть среды обитания человека;
  - оценку концентраций радионуклидов в водах, используемых населением.
- Подземная изоляция радиоактивных отходов обеспечивается системами искусственных и естественных барьеров, препятствующих их выходу за пределы рабочего блока (горного отвода). Большинство инженерных барьеров выполняет свои изолирующие свойства ограниченное время. В системе изоляции долгоживущих радионуклидов (срок потенциальной опасности более 500 лет) основную изолирующую функцию выполняют породы вмещающей геологической среды.
- Способность геологической среды обеспечить надёжную изоляцию РАО в условиях естественной деградации инженерных защитных систем является определяющей при выборе геологических условий создания объектов окончательной изоляции долгоживущих радионуклидов.
- Прогнозировать состояние участка литосферы на длительные периоды времени возможно только геологическими методами, поскольку требуемые для изоляции РАО периоды времени охватывают крупные циклы эволюции поверхности Земли и биосферы. Перспективы развития геологических формаций основываются на знаниях истории и закономерностей их развития в прошлом с использованием критериев долгосрочного прогнозирования, разработанных на современном научно-техническом уровне комплексного моделирования. Задача прогноза состоит не столько в предсказании эволюционных тенденций, сколько в определении сроков наступления и возможной интенсивности революционных фаз.
- Прогноз и оценка безопасности подземной изоляции долгоживущих радионуклидов базируется на геологическом обосновании проекта создания геотехнологического комплекса и существенно зависит от детальности и уровня достоверности данных, характеризующих геологическую среду.
- Развитие геологических процессов имеет вероятностный характер и все прогнозные результаты, полученные с применением расчетных моделей, следует рассматривать как оценки, сохраняющие неопределенность поведения объекта исследований.
- Наиболее убедительным методом для подтверждения долгосрочного прогнозирования является использование природных аналогов – проявлений и поведения в природе веществ и процессов, аналогичных тем, которые встречаются в могильниках РАО. Природные аналоги – одно из немногих, если не единственное средство, подтверждающее, что оценка безопасности подзем-

ной изоляции основывается на научном понимании того, что произойдет в литосферном блоке за время, значительно более длительное, чем существование современной цивилизации. Природные аналоги являются наиболее доступными и убедительными примерами для общественности, демонстрирующими безопасность пунктов подземной локализации РАО.

- Геотехнологическая система изоляции РАО обеспечивается комплексным контролем подземных сооружений и горного отвода на всех этапах подготовки, строительства, эксплуатации и постэксплуатационного мониторинга.

Для конкретных территорий и регионов разрабатываются региональные концепции, учитывающие сложившуюся ситуацию с РАО, природные возможности и ресурсы геологических формаций. Для крупных регионов, например, такого, как Северо-Западный, разработаны различные концептуальные предложения и программы создания объектов окончательной изоляции РАО с предложениями конкретных площадок для их сооружения [15–17].

Для разработки региональной концепции необходим значительный объем исходных данных, характеризующих природные условия (климатические, геологические, гидрогеологические и пр.); существующая ситуация размещения источников РАО и временных площадок их хранения; транспортные пути перемещения, состав и номенклатура отходов, перспективы их дальнейшей переработки; экономическая целесообразность достижения безопасности предлагаемых проектов и т.д.

***Геологические критерии выбора площадок для подземной изоляции РАО***

Выбор оптимальных условий безопасной изоляции РАО производится на основании критериального анализа – сравнения характеристик перспективных геологических формаций и площадок с требованиями комплексных критериев безопасности. В качестве базовых до настоящего времени используются критерии МАГАТЭ, в которых объединены необходимые условия безопасности для всей геотехнологической системы изоляции РАО [18]:

- для вмещающей геологической среды;
- для конструкций и сооружений хранилища;
- для радиоактивных отходов.

Геологические критерии определяют требования к вмещающей геологической формации и горным породам, в которых предполагается размещать РАО. Критерии включают:

- конфигурацию и размеры литосферного пространства отчуждаемой территории на поверхности;
- выбор рекомендованных геологических формаций и горных пород;
- ограничение потоков подземных вод на участке размещения хранилища;
- высокие удерживающие свойства вмещающих горных пород;
- выбор площадок с низкой тектонической и сейсмической активностью;
- отсутствие негативных техногенных и природных факторов, нарушающих стабильность изоляции РАО;
- отсутствие потенциальных ценных геологических ресурсов;
- необходимость учета развития геоморфологической обстановки, климатических условий и других поверхностных процессов, влияющих на безопасность изоляции РАО.

Критерии, которые должны соблюдаться при проектировании и строительстве хранилища, включают:

- возможность компенсации нарушения природной системы изоляции (наличие инженерных барьеров);
- надежность функционирования системы обеспечения безопасности на требуемые интервалы времени;
- обеспечение условий подкритичности РАО;
- сохранение безопасности в случае перемещения или изъятия отходов;
- обеспечение изоляции радионуклидов после закрытия хранилищ (могильников);
- проведение в течение требуемых сроков радиационного контроля и радиоэкологического мониторинга, с возможностью активного вмешательства в случае нарушения условий изоляции РАО.

Критерии приемлемости отходов определяют требования, предъявляемые к РАО, предназначенным для хранения или захоронения. В частности:

- в РАО с определенной точностью должны быть известны состав и содержания отдельных радионуклидов, поскольку они определяют параметры инженерных и природных изолирующих барьеров;
- химические формы РАО не должны способствовать развитию в хранилище негативных химических или микробиологических воздействий;
- РАО должны обладать устойчивой химической формой, ограничивающей возможную миграцию радионуклидов;
- формы РАО должны иметь термическую и радиационную устойчивость, не допускающую изменения их стабильности и повышения степени миграции радионуклидов;
- упаковки РАО должны иметь механическую стабильность при транспортировке, перемещении и хранении в штатных и расчетных аварийных условиях;
- материал упаковок не должен являться ценным стратегическим ресурсом.

В общей системе изоляции приоритет и значение группы или отдельного критерия будут определены типом хранилища или могильника (наземный, подземный) и характером РАО (низкоактивные, высокоактивные, короткоживущие, долгоживущие). Одновременно необходимо сохранить комплексный подход к взаимосвязанным частям единой системы изоляции отходов, не преувеличивая значение одного компонента в ущерб или недооценку требований другого.

Одновременно с публикацией критериев МАГАТЭ Государственный комитет по атомной энергии СССР представил для обсуждения свою редакцию геологических критериев [19].

К геологическим участкам, пригодным для захоронения РАО предъявлялись следующие требования (критерии):

- надёжность изоляции отходов в течение всего времени опасности их воздействия на биосферу;
- нераспространение активности за пределы зоны санитарного отчуждения за весь период консервации, что достигается использованием массивов с проницаемостью менее $10^{-3}$ дарси;

- удаленность мест строительства на расстояние не менее трёх радиусов зоны санитарного отчуждения от объектов, не имеющих прямого отношения к могильникам и отходам;
- размещение могильника вне зоны активного водообмена с оставлением охранной толщи;
- изъятие из сферы жизнедеятельности человека горного массива с момента захоронения отходов на весь срок сохранения их вредности;
- размещение могильника на расстоянии не менее трёх радиусов зоны санитарного отчуждения от зон тектонических нарушений, вне районов сейсмической активности;
- расположение могильников за пределами месторождений полезных ископаемых (с оставлением охранного целика), имеющих значение в настоящее время и в перспективе;
- стабильность состояния захороненных отходов, исключающая их распространение по трещинам и порам, за пределы зоны локализации;
- обеспечение контроля в заданный период времени за температурой, давлением и уровнем активности в хранилище и в прилегающем к нему горном массиве.

Был принят постулат основной роли геологической формации в качестве природного барьера на пути проникновения радионуклидов во внешнюю среду. Дополнительную защиту хранилища обеспечивают инженерные барьеры, которые следует создавать в зависимости от его конструкционно-экономических характеристик.

Дальнейшие разработки расширили содержание геологических критериев, одновременно дифференцируя и выделяя требования для различных типов отходов и пород, для специфических условий различных геологических формаций [20–23]. Разработаны комплексные критерии, объединяющие геологические условия площадок с последующими этапами работ, транспортными схемами, социально-экономическим развитием территорий [24, 25].

В 1999 г. Агентством по ядерной энергии (NEA) при Организации экономического сотрудничества и развития (OECD) на основании данных экспертов 29 стран представлен доклад, содержащий международную оценку состояния и развития исследований в области геологического захоронения [26]. Краткие выводы доклада сводились к следующему:

- Геологическое захоронение является единственным предпочтительным способом долгосрочной изоляции облученного ядерного топлива (ОЯТ) и высокоактивных отходов (ВАО) от биосферы;
- Технология захоронения, строительства и эксплуатации могильников в различных горных породах (соль, глины, кристаллические породы, туфы) готова к внедрению;
- Результаты комплексных исследований, проводимых более чем в 10 подземных лабораториях, позволили собрать необходимые данные для проверки математических моделей, используемых для оценки безопасности захоронения;
- Убежденность технических экспертов – необходимое, но недостаточное условие для реализации геологического захоронения, поскольку проблема имеет не только техническую, но и этическую, социальную и политическую стороны, затрагивающие интересы существующих и будущих поколений.

Реализация концепции хранилищ глубокого заложения в ряде стран задерживалась в связи с неготовностью правительств и общественности к восприятию ранее неизвестной и потенциально опасной технологии.

Необходимо отметить, что до настоящего времени остается ряд нерешенных сугубо научных проблем, которые требуют разработки специальных критериев.

Основной проблемой является недостаточная обоснованность долгосрочных прогнозов. Сомнения в их надёжности требуют постоянных доказательств безопасности геотехнологических систем с многобарьерной защитой. Кроме того, выявляются новые аспекты оценки безопасности: возможность извлечения РАО; наличие природных индикаторов условий долгосрочной изоляции; правомочность принципа длительного хранения «без опоры на контроль», переоценки сейсмической и астероидной опасности и т.п.

Для разработки долгосрочного прогноза безопасности изоляции РАО в гранитоидах Нижнеканского массива предложено использовать палеореконструкции эволюционных, циклических и вероятностных процессов и событий [23]. Научно-методическую основу долгосрочного прогноза должны составлять:

- дифференциальный анализ объектов и процессов в соответствии с их пространственными и временными параметрами (прогноз – глобальный, региональный, локальный; зоны подземной изоляции – ближняя, дальняя и пр.);
- итеративный анализ прогнозируемых процессов всего иерархического ряда геологических объектов – от глобальных структур до отдельных минералов;
- использование в качестве базовой характеристики изучаемого района геоинформационной системы (ГИС) с оценками экстремальных ситуаций;
- использование палеореконструкций для прогностической экстраполяции развития геологических структур, рельефа и климата; хроностратиграфические, палеогидрогеологические, палеосейсмологические и прочие исследования;
- выделение двух основных факторов, изменяющихся во времени – тектонического и климатического, для прогнозирования миграционных процессов – ключевого вопроса безопасности;
- использование методов изотопной геохимии и геохронологии для количественных оценок;
- использование природных и техногенных аналогов для подтверждения научного обоснования долгосрочного прогноза

Надёжность долгосрочного прогноза повышается в случае выбора площадок не только по критерию стабильности, но и по критерию предсказуемости развития геологических формаций региона.

Разработка долгосрочного прогноза завершается моделированием миграционных процессов поступления радионуклидов из могильника в зону обитания человека [27]. Надёжность моделирования определяется уровнем научного обоснования геологического развития и изменений условий подземной изоляции РАО во времени.

Геологические аспекты проблемы подземной изоляции РАО на первых этапах работ обосновываются:

- установленными закономерностями природных процессов и явлений;
- базовой геологической концепцией изоляции РАО;
- базовыми геологическими критериями.

В дальнейшем по мере сбора информации разрабатываются региональная концепция и дополнительные критерии безопасной изоляции РАО.

# 1. Условия образования глинистых пород

Глинистые породы – группа осадочных пород, образованных мелкодисперсными минералами слоистых и слоисто-ленточных силикатов, определяющих характерные свойства пород этой группы [28].

Процесс формирования глин, как и других осадочных пород, состоит из нескольких последовательных стадий:

- образование осадочного материала;
- перенос, или миграция, вещества;
- накопление осадка (седиментация);
- преобразование осадка в осадочную горную породу (литогенез).

## *1.1.Образование осадочного материала*

Большинство глинистых пород и составляющих их минералов образуются в результате изменений магматических, вулканических и других горных пород, переноса новообразованных минералов водными потоками с последующим осаждением мелкодисперсных частиц в водоемах различного типа.

Начальные этапы объединяют многообразные экзогенные процессы выветривания – разрушения и изменения горных пород под воздействием физических, химических и органических факторов.

Выветривание – открытая динамическая система механических, физических, химических и биологических преобразований и новообразования горных пород и осадков в условиях поверхностной части литосферы.

Изверженные горные породы в условиях земной поверхности (наличия свободного кислорода, воды, углекислоты и других агентов выветривания) переходят в устойчивые минеральные формы.

При выветривании изверженных пород основные изменения происходят за счет полевых шпатов с образованием скрыто- или тонкокристаллических минералов: серицита, каолина, соссюрита, цеолитов и пр. Хорошо известно изменение альбита (а) и анортита (б), сопровождающееся появлением каолинита:

а) $2NaAlSi_3O_8 + 3H_2O + 2CO_2 \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2Na^+ + 2HCO_3^- + 4SiO_2$;

б) $CaAl_2Si_2O_8 + 3H_2O + 2CO_2 \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca(HCO_3)_2$.

При этом вместе с каолинитом образуются кремневые кислоты, переходящие в силикагели.

Длительное нахождение горных пород в экзогенных условиях приводит к образованию коры выветривания с последовательно сменяющимися зонами новообразованных мелкодисперсных минералов (табл. 1) [29].

Таблица 1

Модель вертикального разреза коры выветривания гранитоидов [29]

| Пористость,% | pH | Новообразованные минералы, их соотношение (мас %) |
|---|---|---|
| 98,5 | 5,6 | Гетит (100) |
| 68,0 | 5,7 | Гиббсит (91,5), гетит (8,5) |
| 51,9 | 5,9 | Каолинит (85,7), гиббсит (8,9), гетит (5,4) |
| 48,5 | 7,8 | Каолинит (95,0), гетит (5,0) |
| 22,5 | 8.1 | Монтмориллонит (99,9), хлорит (0,1) |
| 25,1 | 8,7 | Монтмориллонит (81,4), кремнезем (18,5), хлорит (0,1) |

Близкий минеральный состав установлен для глобального фациального профиля субаэральной коры выветривания по Северному полушарию (вниз по разрезу) [30]:

- основные фации почв;
- преимущественно железный (феррикрет), реже известковый (калькрет) и кремниевый (силькрет) панцырь;
- физический элювий – каменистые развалы ледового и аридного типов;
- латеритный горизонт двух фаций – железорудной и бокситовой;
- иллювиальные жилы и гнезда железных руд;
- каолиновый горизонт;
- смектитовый, в основном монтмориллонитовый горизонт;
- гидрослюдистый горизонт;
- невыветрелая порода.

Вода – основной агент выветривания – освобождает и переводит в растворимое состояние в первую очередь щелочные элементы K и Na, присутствием которых объясняется щелочной характер среды (pH > 7), что способствует выносу кремнезема. Этими условиями объясняется образование на первой стадии выветривания щелочных глинистых минералов – гидромусковита и монтмориллонита. По мере удаления щелочных элементов увеличивается количество растворенных Ca и Mg, при одновременном снижении pH. Это приводит к изменению состава глинистых минералов с постепенным их переходом в каолинит – минерал кислых сред. Щелочная стадия выветривания сменяется кислой.

В качестве примера следует привести химическое выветривание слоистых силикатов – слюд, которые по своей структуре наиболее легко превращаются в глинистые минералы:

Мусковит → гидромусковит → иллит → каолинит.
pH > 9,5 pH 9,5 – 7,8 pH 8,0 – 6,0 pH < 6,0

Биотит последовательно переходит в вермикулит, затем в монтмориллонит, галлуазит и в конечный продукт выветривания – каолинит.

Полевые шпаты имеют каркасные решетки, которые для перехода в слоистые структуры требуют более глубокой трансформации и образования микропле-

нок глинистых минералов по трещинам спайности. Например, превращения на поверхности кристаллов анортита:

$$CaAl_2Si_2O_8 + 2CO_2 + 3H_2O \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca(HCO_3)_2 .$$

Образование пленочных агрегатов глин на поверхности трещин породообразующих минералов приводит к появлению в полевошпатовых породах, например, в гранитоидах, геохимического барьера, останавливающего миграционные процессы. Кроме того, комплексными геохимическими барьерами являются зоны выветривания изверженных пород, насыщенные минералами – природными сорбентами (оксидами и гидроксидами железа, глинами и пр.). Эти явления имеют значение при оценках горных пород как среды для изоляции РАО [23].

Процессы выветривания при благоприятных условиях могут охватить литосферную зону глубиной в сотни метров. Современные коры выветривания значительно меньше. Например, на молодых лавах их мощность не превышает долей метра.

### *1.2. Перенос или миграция вещества*

В большинстве случае осадочный материал не остается на месте своего образования, а под воздействием различных факторов экзогенного процесса переносится в те участки земной поверхности, где существуют благоприятные условия для его накопления и захоронения. Основной перенос происходит с помощью воды и ветра. В перемещении осадков принимают участие ледники, прибрежные льды, айсберги.

Приемниками и накопителями осадочного материала являются водные бассейны – озера, моря, океаны и пр. Однако и в их пределах происходит перенос взвесей под влиянием волнения и течений.

Основной путь миграции вещества на континентах – перенос русловыми водными потоками, перемещающими почти 90 % осадочного материала. В зависимости от размеров частиц происходит механическая дифференциация. Сравнительно крупные частицы глин осаждаются вместе с песками или более грубыми обломками, образуя глиняные конглобрекчии. Кристаллы каолинита обычно превосходят по размерам другие минералы глин и осаждаются в ближней прибрежной полосе водоемов. В более глубокие части акваторий переносятся тонкие взвеси минералов группы монтмориллонита (смектиты).

Значительная часть осадочного материала переносится в форме растворов, коллоидных или истинных (ионных).

Исследования последних лет показали исключительно важную роль коллоидов в процессах миграции техногенных радионуклидов, в том числе и долгоживущих актинидов [31–33]. Процессы переноса и миграции различных природных коллоидных форм используются в качестве аналогов для прогнозирования и моделирования условий безопасности подземной изоляции РАО.

### *1.3. Природные коллоидные системы*

Присутствие коллоидов – фундаментальное свойство биосферы. Коллоиды широко распространены в структурах живого и минерального вещества поверхности Земли и играют большую роль в геологических процессах формирования и развития осадочных пород, процессах миграции, образования почв и т.д.

В виде коллоида может быть получено любое минеральное вещество. При этом образование коллоидов может происходить при различных температурах и давлениях и в самых разнообразных условиях. Наибольшее распространение в

земной коре имеют гидрозоли – водные коллоидные растворы, способные к миграции. Основную роль при их образовании играют химические реакции в водных средах в зонах выветривания. Сложные физико-химические взаимоотношения твердой, жидкой и газообразной фаз, связанные с изменением ведущих факторов миграции, создают в зоне гипергенеза наиболее благоприятные условия для образования высокодисперсных форм состояния вещества.

Коллоидные системы образуют частицы с размерами 0,1–0,001 мкм (или от 1 до 0,0001 мкм). Эти величины являются промежуточными между молекулярными дисперсиями (истинными растворами) и грубодисперсными системами. Между коллоидными и истинными растворами имеются постепенные переходы точно так же, как существуют постепенные переходы и к грубым дисперсиям.

В зоне гипергенеза наиболее распространены следующие коллоиды [34]:

| *С положительным зарядом* | *С отрицательным зарядом* |
|---|---|
| $Fe(OH)_3$; $Ti(OH)_4$; $Al(OH)_3$ ; | Глинистые коллоиды |
| $Zr(OH)_4$; $Cr(OH)_3$; $Ce(OH)_4$ ; | Гумусовые вещества |
| $Cd(OH)_2$ | $SiO_2$; $MnO_2$; $SnO_2$; $V_2O_5$; |
| | PbS; $Sb_2S_3$; $As_2S_3$ |
| | Сульфиды Au, Ag, Pt |

### *1.4.Наноминералогия*

Наноминералогия – самостоятельный раздел минералогии, изучающий ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества [35]. Наноиндивиды имеют размеры коллоидных частиц 0,1–0,001 мкм ($10^{-7}$-$10^{-9}$м) и фактически ими и являются. Современные методы определения структуры и состава микрообъектов позволяют идентифицировать минералы твердой фазы коллоидных систем.

Форма и физико-химические свойства наноиндивидов отличаются от макро- и микроиндивидов вследствие несравненно большей доли поверхностных атомов (соотношения поверхностных атомов к их общему числу в частице). При размерах частицы 0,001 мкм (1 нм) эта величина равна единице, т.е. все атомы являются поверхностными.

Фундаментальная особенность нанокристаллов, отличающая их от макрокристаллов, заключается в том, что их свойства существенным образом зависят от размеров (числа атомов). Поверхностная энергия во многих случаях выступает как фактор, определяющий размерные свойства нанокристаллов.

Для геохимических процессов исключительное значение имеют величина *удельной поверхности и наличие заряда* коллоидных частиц (микро- и наноминералов).

*Удельная поверхность* частиц $X$ и их размер $Y$ связаны обратно пропорциональной зависимостью $X = 6 : Y$. Достаточно показать, что если какой-либо минерал с объемом массы в 1 $см^3$ диспергировать на наночастицы с размером 0,001 мкм, то их общая поверхность составит 6000 $м^2$, а удельная – $6 \cdot 10^7$.

Процессы, зависящие от величины удельной поверхности, в коллоидных системах проявляются наиболее резко. В первую очередь – это явления сорбции. Коллоидные образования характерны для минералов – природных сорбентов. Это

оксиды и гидроксиды железа, марганца, алюминия, скрытокристаллические разновидности кварца, группа опала, а также группа слоистых алюмосиликатов, входящая в состав глинистых пород [36]. Коллоиды могут сорбировать ионы при их концентрациях, далеких от насыщения. Многие редкие элементы вообще не образуют в природе насыщенных растворов, и для них ионная сорбция – важнейший путь перехода в твердую фазу.

Сорбционные свойства особенно сильно выражены у коллоидов оксида марганца. Марганцовые руды, прошедшие коллоидную фазу, могут содержать до 40 примесных элементов: K, Ba, Ni, Co, Cu, Zn, Hg, Au, W и др.

Наличие заряда – не менее важное свойство коллоидных частиц. Заряд всех частиц одного и того же коллоида в данной среде один и тот же; поэтому частицы взаимно отталкиваются и поддерживаются во взвешенном состоянии.

Положительно заряженными коллоидами являются большинство гидроксидов металлов: $Fe(OH)_3$, $Ti(OH)_4$, $Al(OH)_3$, $Zr(OH)_4$, $Cr(OH)_3$, $Ce(OH)_4$ и др.

Отрицательно заряженные коллоиды: микро- и наночастицы (коллоиды) глинистых минералов, гумусовые вещества, $SiO_2$, MnO, SnO, $V_2O_5$, PbS, $Sb_2S_3$, $As_2S_3$ и др.; сульфиды Au, Hg, Pt.

В случае образования дисперсной фазы комплексным или высокомолекулярным, диссоциирующим в растворе веществом, заряд коллоидной частицы будет зарядом иона. Заряд может появляться в результате адсорбции ионов, присутствующих в растворах.

Пограничные ионы на поверхности минеральных микрочастиц могут иметь некомпенсированный заряд, что является причиной адсорбции из растворов дополнительного количества ионов. Например, микрочастица гематита $Fe_2O_3$ адсорбирует ион $Fe^{3+}$, в результате чего заряжается положительно.

Наличие у коллоидных частиц заряда придает им целый ряд характерных особенностей, которые определяют механизмы миграционных процессов, включая не только передвижение, но и удержание элементов на «коллоидных» барьерах.

В зоне гипергенеза наиболее распространены коллоиды с отрицательным зарядом [за исключением $Fe(OH)_3$ и $Al(OH)_3$], интенсивно сорбирующие из растворов катионы, в том числе редких и радиоактивных элементов. Может происходить геохимическое разделение первоначально ассоциированных элементов, например, разделение натрия и калия, поскольку крупный ион $K^+$ гораздо легче сорбируется на глинистых коллоидных частицах, чем ион $Na^+$. Первоначально связанные в силикатных минералах железо и кремний могут разделиться из-за различной формы миграции: железо транспортируется пресными водами в виде коллоида $Fe(OH)_3$, а кремний может находиться в истинно растворенном виде.

Хорошо известна коллоидная форма переноса сульфатов бария, стронция и радия в пластовых водах нефтяных месторождений. При избытке в этих водах катионов коллоидные частицы образующегося радиобарита приобретают положительный заряд. При контакте коллоидов радиобарита с отрицательно заряженными частицами цемента происходит образование техногенных радиоактивных нефтешламов, которые существенным образом осложняют добычу и переработку углеводородного сырья [37].

В случаях потери заряда нейтральные дисперсные частицы коагулируют. Происходит укрупнение частиц, оседание их под действием силы тяжести, удержание на природных фильтрах и пр.

Коагуляция коллоидов, прекращение миграции микро- и наночастиц могут осуществляться различными способами:

1) Коллоидный раствор смешивается с электролитами (ионными растворами), причем в зависимости от заряда дисперсной фазы нейтрализация будет производиться катионами или анионами электролита. Таким путем образуются многие илистые осадки в устьях крупных рек, впадающих в морские бассейны. При этом происходит накопление мигрирующих радионуклидов на природных геохимических барьерах. Например, в эстуарии р. Енисей в процессе «лавинной» седиментации средняя скорость поступления $^{137}Cs$ и $^{239,240}Pu$ в донные осадки составляет 44–163 Бк/(год м$^2$) и 0,4–4,9 Бк/(год м$^2$) соответственно [38].
2) Коагуляция при взаимной нейтрализации противоположно заряженных коллоидов с образованием смешанных гелей. Например, смешивание коллоидного кремнезема (отрицательный заряд) с коллоидными оксидами железа (положительный заряд) при образовании кремнистых бурых железняков.
3) Самопроизвольная коагуляция при потерях воды с увеличением концентрации электролитов, присутствующих в коллоидных растворах. Примером являются осадки и грязи высыхающих водоемов.
4) Выпадение (удержание) положительно заряженных коллоидных частиц происходит при циркуляции коллоидных растворов по капиллярам горных пород. Стенки капилляров и поровых пространств заряжены отрицательно, что и приводит к нейтрализации коллоидного заряда. Например, хорошо известно «ожелезнение» тонкопористых известняков хлопьевидными гидроксидами железа.

Последний пример наиболее важен при анализе миграционных процессов на участках подземной изоляции РАО. Весьма существенно, что для коллоидов миграция замедляется не только для зон плотных монолитных пород, но и для пород с капиллярно-поровой проницаемостью.

Коагуляция коллоидов приводит к образованию минералов и пород, сохраняющих характерные структуры тонкодисперсных масс. Это широкораспространенные натечные формы гематито-гидрогематитового состава, колломорфные и метаколлоидные массы гетита и лимонита, твердые гидрогели группы опала и пр.

В результате коагуляции коллоидных растворов образуется настуран (урановая смолка, урановая смоляная руда), представленный смесью оксидов урана: $UO_2$ и $UO_3$. В процессе дегидратации геля в почковидных и колломорфно-скорлуповатых выделениях настурана образуются характерные радиально-лучистые или параллельно-концентрические трещинки усыхания, подчеркивающие структуру колломорфных агрегатов.

В природных условиях могут существовать коллоиды гидратов Ti, Zr, Ge, Sn, Th и др. В скрытокристаллических и натечных выделениях существует диоксид циркония (минерал бадделеит или «циркон-фавас»). В нем в виде примесей присутству

ют до 15 % $SiO_2$, до 9 % $Fe_2O_3$, до 4 % $Al_2O_3$, до 1 % $TiO_2$, входящих в состав минералообразующих коллоидов.

Необходимо особо отметить, что многие природные коллоиды, в первую очередь кремния и железа, являются фиксаторами и «консервантами» содержащихся в

них примесных частиц и включений. Хорошо известны «окаменяющая» роль коллоидов кременезема при метасоматозе растительных остатков, образование коррозионных «футляров» из лимонита, гетита и лепидокрокита на железных археологических предметах [39].

### *1.5. Накопление осадка (седиментация)*

По месту и характеру накопления различаются остаточные и осадочные генетические типы глинистых материалов.

Остаточные глины – глины, остающиеся на местах своего образования при выветривании и изменении горных пород в континентальных и подводных условиях.

Осадочные глины образуются в результате размыва, переноса и отложения (седиментации) минералов коры выветривания и глинистых пород в водоемах со спокойным гидродинамическим режимом.

Седиментация – обязательная стадия образования осадочных пород, во время которой происходит накопление разобщенных компонентов, соединяющихся в осадок, из которого в дальнейшем образуется осадочная горная порода. Ведущим физическим фактором седиментации является сила тяжести, и осаждение можно рассматривать как падение свободного тела. Осаждение в неподвижной водной среде подчиняется формуле Стокса, однако реальные параметры отличаются от табличных, особенно для мелкодисперсных частиц. При этом частицы с размерами менее 0,001 мм осаждаются крайне медленно, поскольку броуновское движение уравновешивает силу тяжести. Выпадение коллоидов было рассмотрено ранее.

Скорость накопления осадков зависит от климата, тектонического режима, геоморфологии области сноса, биопродуктивности водной среды и целого ряда других факторов. В морских и океанических бассейнах скорость осадкообразования меняется от нулевых, когда на отдельных участках дна седиментация не происходит, до весьма высоких – 20 000 мм/год (шельф Мьянмы) [30]. Наиболее обычные скорости варьируют в пределах от 1 до 30 мм осадков за год.

По своему происхождению осадочные глины делятся на континентальные, морские и лагунные. Наиболее мощные и однородные пласты глин образуются в крупных морских бассейнах на глубинах не более 2 500 м.

Примерами осадочных глин являются глины и аргиллиты крупного морского бассейна, существовавшего на территории Восточно-Европейской платформы в вендское время (650–570 млн лет назад). Породы котлинского и редкинского горизонтов (верхний венд) в наше время выходят на поверхность по южному берегу Финского залива и на побережье Белого моря.

Морское происхождение имеют глины нижнекембрийского возраста, широко распространенные на территории Ленинградской области.

В пределах центральной и северной части Восточно-Европейской платформы находятся глинистые отложения морского бассейна триасового возраста – 245–208 млн лет (Печерская синеклиза).

В южной части платформы глинистые породы были накоплены в морском бассейне, существовавшем на территории Волгоградской области, Ставропольского края и республики Калмыкия в палеогене и неогене – майкопские олигоцен-миоценовые глины (30–20 млн. лет).

Мощные толщи осадочных отложений накоплены на территории Западно-Европейской платформы, для которой характерна смена континентальных и морских условий.

В олигоценовых глинах формации Boom (30 млн лет) в Бельгии создана подземная лаборатория для изучения возможности захоронения ВАО и ОЯТ.

Во Франции проводятся исследования глин верхнеюрского возраста (~160 млн. лет) на территории Парижского бассейна (департаменты Мез и Верхняя Марна).

Следует ожидать, что накопление осадков, особенно в крупных водных бассейнах, должно происходить равномерно и постепенно. В действительности эти процессы почти всегда неравномерны и прерывисты с чередованием фаз накопления с более длительными перерывами, а часто и размывами [30]. В результате образуются поверхности напластования, являющиеся естественными генетическими единицами седиментационного процесса. В случае изменения условий осадконакопления или режима сноса образуется неоднородная осадочная порода, отражающая последовательную историю своего образования. На неоднородность осадков влияет тектонический режим бассейна накопления, дно которого в течение геологического времени испытывает либо прогибание, либо подъем. При этом может происходить смена состава осадков, например, образование осадочных толщ с чередующимися песчано-глинистыми прослоями.

Различный гидродинамический режим – мобильный в верхнем венде и относительно спокойный в нижнем кембрии – нашел свое отражение в структурно-текстурных особенностях вендских (котлинских) и нижнекембрийских глинах Ленинградской области [40]. Как одни, так и другие являются перспективными геологическими средами для подземной изоляции РАО. Преимущество при выборе площадок будут иметь однородные глинистые толщи, образованные в стабильных режимах седиментации.

### *1.6. Преобразование осадка в осадочную породу (литогенез)*

Термин литогенез объединяет все процессы, непосредственно связанные с образованием и последующим превращением осадков в горные породы. Литогенез включает несколько последовательных стадий, различающихся ростом преобразования исходного осадка: диагенез, катагенез и метагенез.

*Диагенез*

Накопившиеся в водных бассейнах осадки изначально представляют многофазную неравновесную систему. На начальных фазах диагенеза происходит уплотнение осадков удаление из них воды, частичная перекристаллизация минералов. Глинистые осадки характеризуются высокой проницаемостью влажностью (80–90 %), обилием органики, изменчивыми значениями Eh и pH, что обеспечивает интенсивный обмен ионами и газами [30]. Завершение стадии диагенеза наступает через несколько десятков и даже сотен лет. Мощности зон диагенеза составляют обычно 10–50 м.

*Катагенез*

На этой стадии основными факторами преобразования являются температура, давление, водно-газовые флюиды, изменения химических условий среды. Происходят наиболее существенные изменения химико-минералогического состава, строения и

физических свойств образующихся пород. Растворяются неустойчивые и образуются стабильные минеральные формы.

*Метагенез*

Преобразование осадков происходит под влиянием тех же факторов, что и при катагенезе, но значительно увеличивается температура – до 200–300°С. В этих условиях глины превращаются в камнеподобную, не размокающую в воде породу – аргиллит. Они характерны для древних платформенных отложений, например, вендские аргиллиты Восточно-Европейской платформы (Русской плиты).

## 2. Основные свойства глинистых пород

Глинистые породы составляют ~ 50 % массы всех осадочных пород и встречаются в отложениях различного возраста – от кембрия до голоцена.

В большинстве существующих в литологии и инженерной геологии определений глинами называют тонкодисперсные осадочные породы, в которых содержится не менее 30 % частиц диаметром <0,002 мм. По мнению других авторов, эта гранулометрическая граница выделения глин может варьировать от 0,005 до 0,01 мм.

В современных систематиках в качестве классификационных рассматриваются два признака: количество в породе частиц с определенными размерами, а также количество и состав глинистых ( в измененных породах – слюдистых) минералов. К глинистым относятся породы, в которых суммарное содержание частиц мельче 0,005 мм и слюдистых минералов или других слоистых силикатов составляет 50 % и более [28].

Глины – связанные несцементированные породы, монолитность которым придают силы сцепления между собой микрочастицами породообразующих минералов и межмолекулярные силы.

Глинистые породы представляют собой смесь различных по составу мелкодисперсных минералов, что объясняет вариации их химического состава (таблица 2 [41]) и разброс параметров, характеризующих свойства породы. Например, плотность глин варьирует от 1,3 до 3,45 г/см$^3$. Для глин некорректно использовать параметр «температура плавления», так как эти породы плавятся в некотором интервале температур [42]. На практике используется величина огнеупорности – способность породы, не расплавляясь, противостоять воздействию высоких температур. Высокую огнеупорность имеют каолиновые глины (до 1750°С), а монтмориллонитовые, гидрослюдистые глины, глины смешанного состава входят в группу легкоплавких (ниже 1350°С). Повышает огнеупорность присутствие глинозема, понижают – примеси окислов железа, сульфидов, гипса.

При этом глинистые породы объединяют присущие им свойства, по которым они рассматриваются экспертами МАГАТЭ как наиболее перспективные, начиная со времени создания в 1978 году Технического комитета по подземному захоронению радиоактивных отходов [43]. Немаловажное значение для такого выбора имел существующий опыт использования глин для подземного захоронения токсичных промышленных отходов.

Основными свойствами, по которым глинистые породы отнесены к перспективным геологическим средам являются:

- низкая водопроницаемость;
- пластичность;

- набухаемость;
- высокая поглощающая способность.

Глины являются не только изолирующей, но и барьерной природной средой, ограничивающей миграционные процессы и способной удержать радионуклиды, вышедшие за пределы инженерных барьеров ПЗРО.

Таблица 2

Химический состав фракций <0,001 мм различных глин [41].

| Содержание, % | Местонахождение, возраст и минеральная группа глин | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |
| $SiO_2$ | 43,93 | 59,34 | 62,91 | 65,04 | 51,21 | 51,40 | 49,78 |
| $TiO_2$ | 1,96 | 0,30 | следы | 0,21 | 0,33 | 1,42 | 1,16 |
| $Al_2O_3$ | 38,29 | 24,80 | 17,16 | 17,07 | 21,23 | 22,61 | 21,63 |
| $Fe_2O_3$ | 1,05 | 2,26 | 2,88 | 3,39 | 4,90 | 7,91 | 6,53 |
| FeO | нет | 0,33 | 0,22 | 0,21 | 2,94 | 0,76 | 1,89 |
| MnO | нет | – | следы | – | – | – | 0,05 |
| CaO | 0,28 | 2,14 | 0,74 | 0,83 | 1,29 | 0,48 | 1,53 |
| MgO | 0,15 | 3,85 | 5,41 | 3,53 | 4,24 | 3,07 | 4,15 |
| $K_2O$ | 0,16 | 0,20 | 1,54 | 0,15 | 6,23 | 5,78 | 6,15 |
| $Na_2O$ | 0,38 | 0.19 | 1,53 | 2,37 | 0,33 | 0,64 | 0,24 |
| $\pm H_2O$ | – | – | – | 5,17 | 4,36 | 5,74 | 5,90 |
| п.п.п. | 13,53 | 6,64 | 7,36 | 6,11 | 7,23 | 5,96 | 6,89 |

Примечание: $\pm H_2O$ – потери воды до температуры 350°С, п.п.п. – потери при прокаливании.

**1** – Новгородская область, нижний карбон, сухарная глина (каолинитовый аргиллит);
**2** – Северный Урал, мезозой, монтмориллонитовая глина;
**3** – Узбекистан, алайский ярус (эоцен), монтмориллонитовая глина;
**4** – Азербайджан, палеоген, монтмориллонитовая глина (бентонит);
**5** – Ленинградская область, нижний кембрий, гидрослюдистая глина;
**6** – Ленинградская область, средний кембрий, гидрослюдистая глина;
**7** – Ленинградская область, верхний девон, гидрослюдистая глина.

### *2.1. Водонепроницаемость*

По общепринятой терминологии водонепроницаемость (водоупорность) – свойство горных пород не пропускать через себя свободную воду при напорных градиентах, существующих в природе. Глины являются практически водонепроницаемыми породами. Скорость движения вод в глинах крайне мала из-за внутреннего сопротивления, создающегося малыми размерами пор, и заполненностью последних водно-коллоидными пленками. Для преодоления фильтрующейся водой

внутреннего сопротивления необходим высокий градиент напора подземных вод, который может быть создан лишь при определенных гидрогеологических или геоморфологических (рельефных) условиях.

Водопроницаемость определяется по скорости фильтрации, равной количеству воды, протекающей через единицу площади поперечного сечения фильтрующей породы. Эта зависимость выражается формулой Дарси: $v = kI$, где $v$ – скорость фильтрации, $k$ – коэффициент фильтрации, $I$ – напорный градиент, равный отношению падения напора к длине пути фильтрации. Коэффициент фильтрации имеет размерность скорости (см/с, м/сут). При напорном градиенте равном единице скорость фильтрации тождественна коэффициенту фильтрации.

Величина водопроницаемости (коэффициента фильтрации) для глин составляет $10^{-3} – 10^{-5}$ м/сут и менее. Они вместе с монолитными изверженными породами относятся к практически водонепроницаемым. Коэффициент фильтрации проницаемых пород (глинистых песков, суглинков, слабо трещиноватых изверженных пород) варьирует от 1 до $10^{-3}$ м/сут.

При достаточно широком площадном распространении глинистые породы являются локальными и региональными водоупорами, ограничивающими и разделяющими подвижные литосферные компоненты: подземные воды, залежи нефти и газа. По экранирующей способности глинистые породы разделены на несколько классов (табл. 3 [44]).

Таблица 3

Схема группировки глинистых пород по их экранирующей способности
( выборка данных из работы [44])

| Класс | Тип глины | Диаметр пор, см | Коэффициент диффузии, $см^2/с$ |
|---|---|---|---|
| I | Высокодисперсная | $6\cdot10^{-8} – 6\cdot10^{-7}$ | $10^{-10} – 10^{-9}$ |
| II | Тонкодисперсная | $6\cdot10^{-7} – 10^{-8}$ | $10^{-9} – 10^{-8}$ |
| III | Крупнодисперсная, алевритистая | $2\cdot10^{-6} – 5\cdot10^{-6}$ | $10^{-8} – 10^{-7}$ |
| IV | Алевритовая | $10^{-5} – 3\cdot10^{-5}$ | $10^{-7} – 10^{-6}$ |
| V | Песчано-алевролитовая (алевролит глинистый) | $4\cdot10^{-5} – 2\cdot10^{-4}$ | $10^{-6} – 10^{-5}$ |
| VI | Песчанистая (алевролит глинистый) | $3\cdot10^{-4} – 10^{-3}$ | $>10^{-5}$ |
| VII | Песчаная (алевролит) | $10^{-3}$ | $>10^{-5}$ |

В северо-западной части Восточно-Европейской платформы расположен один из крупнейших артезианских бассейнов Европы – Прибалтийский. Нижний ярус подземных вод, включающий кембрийско-вендский водоносный горизонт, отделяется от верхнего кембрийско-ордовикского и вышележащих водоносных горизонтов региональным водоупором – мощной и выдержанной толщей кембрийских глин [45].

На фильтрационные свойства глинистых водоупоров оказывают влияние изменения напряженно-деформированного состояния горных пород, приводящие к возникновению спорадически действующих зон вертикального водообмена [46].

### *2.2. Пластичность*

Пластичность – способность горных пород изменять свою форму (деформироваться) под действием внешних сил (природных или техногенных) без разрыва сплошности и сохранять полученную при деформации новую форму после прекращения действия внешних сил. В пластичных горных породах под влиянием природных (сейсмо-тектонических, геоморфологических и пр.) или техногенных сил происходят в основном складчатые деформации без разрывных нарушений.

Количественным показателем пластичности в инженерной геологии является число пластичности. Эта величина представляет собой разность верхнего предела пластичности (влажность, при которой начинается текучее состояние породы) и нижнего предела (влажность, при которой порода переходит в твердое состояние). Согласно Строительным нормам и правилам у высокопластичных глинистых пород число пластичности превышает 17 (табл. 4 [47]).

Таблица 4

Число пластичности различных пород [47]

| Группа пород | Число пластичности |
|---|---|
| Глины | > 17 |
| Суглинки | 17–7 |
| Супеси | 7–0 |
| Пески | 0 |

Для высокопластичных глин существует термин «жирные», а для глин с низкой пластичностью – «тощие».

Пластичность глин связана с их генезисом и минералогическим составом. Наиболее пластичными являются натриевые монтмориллонитовые глины с высокой дисперсностью, тонкодисперсные каолиниты и каолинит-гидрослюдистые глины. Наименее пластичны первичные каолиниты и кальциевые монтмориллонитовые глины.

Присутствие гуминовых соединений повышает пластичность. Уменьшает пластичность присутствие примесей песчаных частиц.

### *2.3. Набухаемость*

Набухаемость – увеличение объема горной породы при впитывании ею воды является характерной особенностью глин, особенно монтмориллонитовых, имеющих гидротермальное происхождение. Процесс набухания сопровождается увеличением влажности, объема породы и возникновением давления набухания [48].

Набухание пород происходит в две стадии. На первой глины впитывают влагу за счет адсорбции молекул воды поверхностью мелкодисперсных частиц и межслоевыми промежутками кристаллической решетки минералов. Изменение объема пород при этом не происходит. В дальнейшем поглощение влаги происходит за счет осмотического давления. Оно возникает вблизи поверхности глинистых частиц за счет избыточной концентрации обменных катионов, перешедших с поверхности твердой фазы в раствор. На этой стадии происходит увеличение объема набухающей глины. Величина и характер набухания зависят от целого ряда факторов, ос-

новными из которых являются минеральный состав, дисперсность и структура. Наибольшей величиной набухания обладают породы, в состав которых входят минералы с подвижной кристаллической структурой (например, группа монтмориллонита), наименьшей – минералы с более жесткой кристаллической структурой (например, каолинит).

На величину набухаемости влияет также происхождение глинистых пород. Гидротермальные монтмориллонитовые глины (бентониты) увеличивают первоначальный объем более, чем в 10 раз, осадочные и элювиальные – в 3 раза и менее [49].

Отрицательное влияние на набухаемость оказывает присутствие в глинах солевых растворов, особенно щелочноземельных элементов.

Пластичность и набухаемость влияют на прочностные свойства глинистых пород, в которых проведение горно-проходческих работ требует крепление горных выработок [50]. Хорошо известна потеря прочности при увлажнении глин, когда они из плотных и высокопрочных пород превращаются в пластичные или текучие тела.

Для крепления тоннельных выработок в плотных глинах естественной влажности (верхнепротерозойские глины Ленинградской области) применяют набрызг-бетон, анкерные крепления и пр.

В то же время пластичность и набухаемость глин имеют существенное положительное качество, поскольку при увеличении объема происходит залечивание разрывных нарушений – потенциальных миграционных каналов. Происходит естественное восстановление изолирующих свойств пласта глинистых пород.

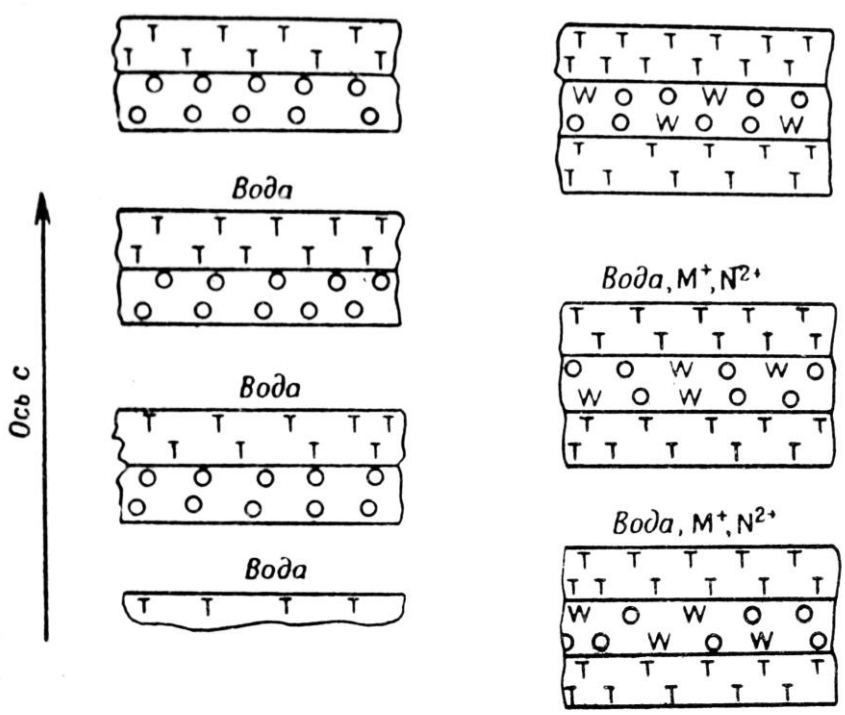
### *2.4. Поглощающие свойства*

Способность поглощать и удерживать в своем объеме различные вещества и отдельные элементы является важнейшим свойством глинистых пород, используемых для подземной изоляции РАО. Это природное свойство глин широко используется для различных производств: нефтеперерабатывающей, лесохимической, текстильной, масложировой, винодельческой промышленности, в медицине и парфюмерии.

Поглощающие свойства глин обусловлены особенностями кристаллического строения составляющих эти породы минералов.

Как полиминеральные природные образования, глины являются смешанно-пористыми адсорбентами, имеющими все разновидности пор, диаметр которых (2000 –15 Å) соизмерим с размерами адсорбируемых молекул.

Алюмосиликатный каркас глинистых минералов состоит из чередующихся параллельных слоев, образованных силикатными тетраэдрами и алюминатными октаэдрами – алюминатно-кремнекислородными пакетами.




*Каолинит* *Монтмориллонит*

T – тетраэдрические силикатные слои; O – октаэдрические алюминатные слои; W – слои, изоморфно замещенные в октаэдрическом положении; $M^+$, $N^{2+}$ - катионы, уравнивающие заряд

**Рис. 1.** Схематическое изображение расположения тетраэдрических и октаэдрических слоев в каолините и монтмориллоните (по данным работы [51]).

В каолините базовый пакет состоит из двух слоев: одного, состоящего из тетраэдров кремнезема, а другого – из октаэдров гидроксида алюминия (рис.1). Базовые пакеты связаны между собой водородными связями. При этом образуется жесткая многослойная решетка, в пространство между пакетами которой вхождение воды и ионов затруднено. Для взаимодействия у каолинита открыты только наружные грани и ребра слоев.

У монтмориллонита базовый пакет состоит из трёх слоев: внутреннего октаэдрического и двух наружных тетраэдрических. Разграничение пакетов происходит по гидроксильным ионам, несущим одинаковые заряды. Молекулы $H_2O$ и ионы втягиваются в пространства между пакетами, происходит увеличение кристаллической решетки по оси C (разбухание глин).

Изоморфные замещения происходят как в тетраэдрическом, так и в октаэдрическом слоях. В случае, например, замещения алюминия на ионы с меньшим положительным зарядом (магний, железо и др.) структурный каркас приобретает отрицательный заряд. Для сохранения электронейтральности между слоями внедряются катионы. В водной среде катионы минералов типа монтмориллонита могут свободно перемещаться между отдельными слоями структуры и активно обмениваться с катионами, присутствующими в водных растворах.

Различие кристаллической структуры определяет различие катионной емкости минералов (табл. 5 [51,52]).

Таблица 5

Катионообменная емкость глинистых минералов [51, 52]

| Минерал | Катионообменная емкость, мг-экв/г | |
|---|---|---|
| | [51] | [52] |
| Каолинит | 0,02–0,10 | 0,02–0,16 |
| Иллит | 0,13–0,42 | 0,2 –0,40 |
| Атапульгит | 0,18–0,22 | |
| Хлорит | | 0,20–0,40 |
| Нонтронит | 0,57–0,64 | |
| Сапонит | 0,69–0,81 | |
| Монтмориллонит | 0,8–1,5 | 0,60–1,00 |
| Аллофан | | 1,00–1,50 |
| Вермикулит | | 1,00– 1,50 |

Наименьшей катионообменной емкостью обладает каолинит, наиболее высокой – монтмориллонит. Максимальные значения этого параметра установлены для аллофана – продукта аморфной стадии изменения каолинита и вермикулита. Последний относится к группе гидрослюд и имеет структуру, состоящую из электрически нейтральных слоев слюдистого компонента $(Mg,Fe)_3(Al,Si)_4O_{10}[OH]_2$, перемежающихся со слоями воды. При прокаливании происходит расслаивание минерала и увеличение объема в 18–25 раз [51].

Для характеристики поглощающей способности горных пород в отношении радионуклидов используются, в частности, коэффициент распределения $K_d$ (distribution coefficient) и коэффициент задержки $R$ (retardation coefficient).

Коэффициент распределения $K_d$ рассчитывается по формуле:

$$K_d = \frac{C_{тв}}{C_{ж}} = \frac{I_0 - I_p}{I_p} \cdot \frac{V}{m},$$

где:

$C_{тв}$ – концентрация радионуклида, поглощенного твердой фазой (т.е. на барьере);

$C_{ж}$ – концентрация радионуклида в растворе после установления равновесия;

$I_0$ – концентрация радионуклида в растворе до контакта с твердой фазой;

$Ip$ – концентрация радионуклида в растворе после установления равновесия с твердой фазой;

- $V$ – объем раствора, мл;
- $m$ – масса твердой фазы (породы, минерала и пр.), г.

Необходимо отметить отсутствие унификации обозначений для одного и того же явления. Коэффициент распределения $K_d$ называют коэффициентом сорбции, константой распределения. Размерность принимается либо $см^3/г$, либо $м^3/кг$. От-

сутствие единства объясняется, по-видимому, еще недостаточностью изученности количественно фиксируемого явления [4] .

Необходимо отметить, что коэффициент распределения $K_d$ по своему содержанию аналогичен одной из количественных характеристик геохимических барьеров, определяющих их контрастность:

$$K = \frac{C_a}{C_ф},$$

где:

$C_a$ – среднее содержание рассматриваемого компонента в аномалии (на барьере);

$C_ф$ – фоновое содержание компонента в окружающей среде (миграционном потоке).

Существует дополнительная характеристика проницаемости барьера - величина отношения скоростей движения частиц растворенного вещества и растворителя, т.е. жидкой фазы в системе миграции [34].

С коэффициентом распределения $K_d$ связан коэффициент задержки $R$, определяющий величину отставания распространения вещества от распространения жидкой фазы :

$$R = 1 + K_d \frac{\text{плотность породы}}{\text{пористость породы}} = \frac{\text{скорость движения подземных вод}}{\text{скорость движения радионуклидов}}.$$

Коэффициент задержки – величина безразмерная. Иногда его называют фактором задержки.

Коэффициент распределения и коэффициент задержки являются основными параметрами, которые экспериментально определяют задерживающие (барьерные) свойства горных пород и широко используются в расчетных формулах и моделях миграции радионуклидов [4, 27, 51, 52].

## 3. Классификация глин, минералогический состав

В систематике осадочных пород, в которой за элементарную единицу принят минерально-петрографический вид, глины выделены в самостоятельное семейство пелитолитов – пелитовых пород [28].

Группы мономинеральных пород выделяются в соответствии с существующими группами глинистых минералов:

- каолинитовые глины;
- монтмориллонитовые;
- гидрослюдистые (иллитовые);
- хлоритовые;
- сепиолитовые;
- палыгорскитовые;
- вермикулитовые;
- аллофановые.

В природе мономинеральные глины практически отсутствуют, и глинистые породы представлены смесями минералов. К условно мономинеральному типу могут быть отнесены глины, представленные несколькими минералами одной группы.

Например, в группу монтмориллонита входят нонтронит и менее распространенные минералы – сапонит, бейделлит и соконит. В странах Европы для этой группы минералов используется термин – «смектиты». В российской классификации осадочных пород по вещественному составу термины «смектитовые» и «монтмориллонитовые» являются синонимами [28].

Широкое распространение получил термин «бентонит», объединяющий монтмориллонитовые глины, образующиеся в результате диагенеза вулканического стекла и пепла в морских бассейнах. Такой генезис имеют крупные месторождения в США (Блек-Хилс, Сандерс-Дефайнс), в Грузии (Гумбрийское), Казахстане (Келесское).

Термин бентонит происходит по названию месторождения Бентон в США. В литературе глины, близкие по свойствам к бентонитам, часто называют аналогично по названию месторождений: в Грузии – асканит и гумбрин; в Азербайджане – гуляби; на Крымском полуострове Украины – кил, в России (Кабардино-Балкария) – нальчикит [53].

При определении глинистых пород рекомендуется использовать два взаимосвязанных признака: количество частиц той или иной размерности и количественный состав глинистых (в сильноизмененных породах - слюдистых) минералов [28].

Целесообразно термины «бентониты», «смектиты» заменить минералого-петрографическим определением – монтмориллонитовые глины с выделением бентонитов как глин определенного генезиса.

По структурно-минералогическим признакам среди глинистых минералов выделяют следующие наиболее распространенные группы [30]:

- группу каолинита;
- группу монтмориллонита;
- смешанную группу иллита и гидрослюд.

### *3.1. Группа каолинита*

В эту группу (подгруппу) отнесены три полиморфные модификации – каолинит, диккит и накрит [54]. С химической точки зрения они рассматриваются как одно и то же вещество - основной силикат алюминия.

Общепринятая формула каолинита – $Al_4[(OH)_8\ Si_4O_{10}]$ [54, 55].

Алюмосиликатный каркас каолинита можно рассматривать как простейший тип структуры глинистых минералов. Основной единицей кристаллической структуры является двойной слой, состоящий из одного силикатного и одного алюминатного слоев с незначительными внутренними изоморфными замещениями. На краях и углах структуры находятся свободные гидроксильные группы, которые могут обмениваться в минерализованной водной среде с анионами и катионами.

Кристаллическая ячейка каолинита представляет собой двухслоевой пакет, тетраэдрические позиций в котором заняты ионами $Si^{4+}$ , а две трети имеющихся октаэдрических позиций – ионами $Al^{3+}$. Из шести ионов $O^{2-}$ , окружающих каждый ион $Al^{3+}$, два связаны с кремниевыми тетраэдрами, а четыре входят в состав группы $(OH)^-$. Каждый пакет электрически нейтрален. В двухслоевых пакетах общий отрицательный заряд комплексного аниона и гидроксильных анионов почти полностью компенсируется положительным зарядом катионов $Al^{3+}$. Кристаллическая

структура удерживается за счет сравнительно слабых ван-дер-ваальсовых сил. Подобное строение объясняет совершенную базальную спайность и лёгкую расщепляемость минералов на тонкие пластинки.

Химический состав чистого каолинита близок к теоретическому: $SiO_2$ – 46,5; $Al_2O_3$ – 39,5; $H_2O$ – 14 %. Примесными компонентами являются $Fe_2O_3$, Mg, Ca, $Na_2O$, $K_2O$. Плотность каолинита 2,61–2,68 г/см$^3$. Твердость 2–2,5 (мягкий). Потеря воды происходит при температуре 400–450°С. При температуре 1200–1300°С образуется новое соединение – муллит $3Al_2O_3\ 2SiO_2$.

По сравнению с другими минералами глинистых пород каолинит имеет небольшую величину набухаемости и сравнительно небольшую обменную емкость (0,02–0,10 мг-экв/г), примерно одинаковую для катионов и анионов [28].

Первичные каолины - продукты разложения алюмосиликатов в зонах выветривания, в которых формируются площадные или гнездовые формы промышленных месторождений. Мощность залежей варьирует от 1–1,5 м до более, чем 100 метров, составляя в среднем 10–40 м [56].

Вторичные каолины образуются за счет размыва, переноса и последующего отложения первичных каолиновых пород. Мономинеральный каолинитовый состав часто имеют глины озерного происхождения. Средняя мощность промышленных залежей обычно составляет десятки метров.

Обладающие высокой огнеупорностью (не ниже 1600–1670°С) каолиновые глины – основное сырье для различных производств. Важнейшими из них являются производство огнеупорных материалов, изготовление электрокерамики, использование в бумажной, пластмассовой, пищевой, фармацевтической и других отраслях хозяйства.

### *3.2.Группа монтмориллонита.*

В эту группу входят существенно магнезиальные, алюминиевые и промежуточные между ними виды: монтмориллонит, сапонит, бейделлит, нонтронит.

Формула монтмориллонита [55] - $Al_{1,67}Mg_{0,33}\cdot[(OH)_2Si_4O_{10}]^{0,33-}\cdot Na_{0,33}\cdot(H_2O)_4$;

сапонита - $Mg_3\cdot[(OH)_2\,Al_{0,33}Si_{3,67}O_{10}]^{0,33-}\cdot Na_{0,33}\cdot(H_2O)_4$;

бейделлита – $(Na,Ca_{0,5})_{0,33}Al_2(Si,Al)_4\cdot 0_{10}(OH)_2\cdot n\,H_2O$;

нонтронита - $Fe_2^{3+}\cdot[(OH)_2\,Al_{0,33}Si_{3,67}O_{10}]^{0,33-}\cdot Na_{0,33}\cdot(H_2O)_4$.

В отличие от двухслоевого каолинита в кристаллической структуре монтмориллонита алюминат-октаэдрические слои расположены между двумя слоями кремнекислородных тетраэдров. Идеальная формула структурной ячейки $Si_8Al_4O_{20}(OH)_4\cdot nH_2O$, (рис.2) [52].

Алюминатно-кремнекислородные пакеты монтмориллонита окружены гидроксильными ионами, способными удерживать молекулы воды. Разграничение пакетов происходит по гидроксильным ионам, несущим одинаковые заряды, и поэтому пакеты легко раздвигаются при проникновении воды. Молекулы $H_2O$ внедряются в межпакетное пространство и размещаются слоями с внутренней упорядоченной ориентировкой. В зависимости от количества поглощенной воды длина ребра $c_o$ элементарной ячейки может увеличиваться от 9,6 до 28,4Å (эффект набухания) [54].

Изоморфные замещения могут происходить как в тетраэдрическом, так и в октаэдрическом слоях. В случае, например, замещения алюминия на ионы с меньшим положительным зарядом (магний, железо и др.), структурный каркас приобретает отрицательный заряд. Для сохранения электронейтральности в межплоскост-

ные пространства между каждой парой трёхслойных ячеек происходит внедрение катионов. Реализация такого внедрения будет зависеть от ионного радиуса катиона, проникающего в слоистую структуру, и от степени его гидратации [51].

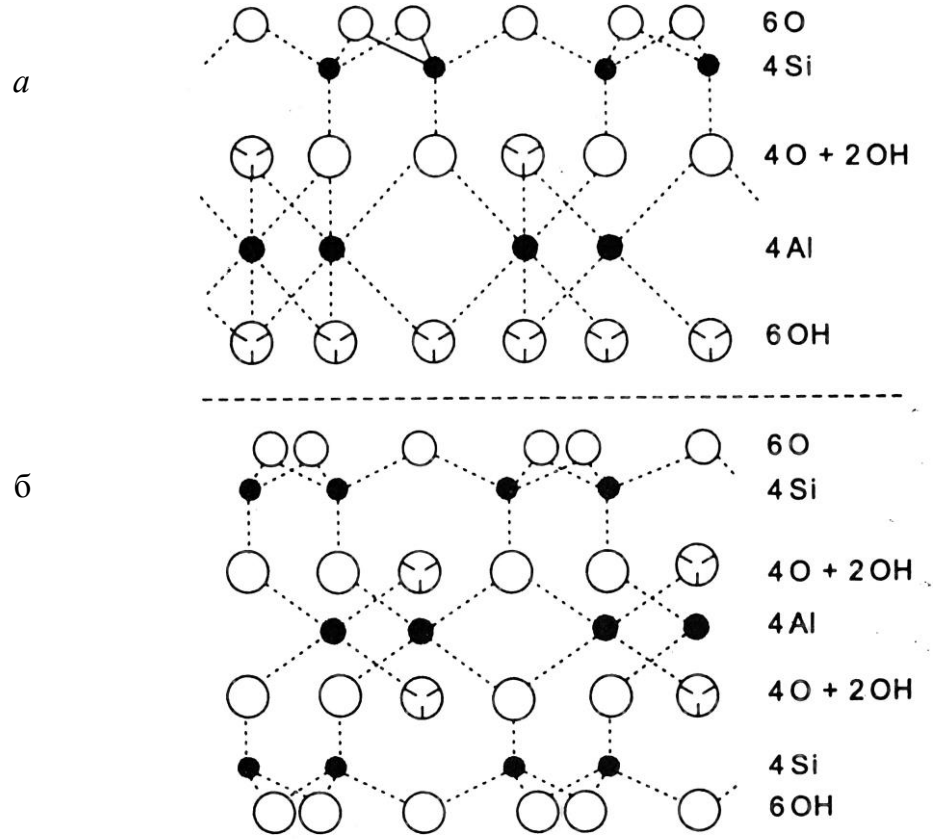



**Рис.2.** Схематическое представление послойной структуры: *а* – каолинита, *б*– монтмориллонита [52].

Таблица 6

Ионные радиусы некоторых элементов [57]

| Элемент | $Na^{+}$ | $Mg^{2+}$ | $K^{+}$ | $Ca^{2+}$ | $Sr^{2+}$ | $Cs^{+}$ | $Pu^{4+}$ | $Am^{3+}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ионный радиус, нм | 0,098 | 0,078 | 0,133 | 0,106 | 0,127 | 0,165 | 0,093 | 0,107 |

В водных суспензиях монтмориллонита его катионы свободно обмениваются с катионами раствора не только на краях и углах граней, как в каолините, но и внутри межплоскостных пространств. Благодаря этому минералы со структурой монтмориллонита имеют наибольшую катионную емкость по сравнению с другими глинистыми минералами (таблица 5).

По данным анализа чистых монтмориллонитов установлены следующие вариации содержаний отдельных компонентов (в %) [53]: $Al_2O_3$ 11–22, $Fe_2O_3$ 0–5 и

больше (ферримонтмориллонит), MgO 4–9, CaO 0,8–3,5 и выше (кальциомонтмориллонит), $SiO_2$ 48–56, $H_2O$ 12–24. Главными обменными катионами (от 60 до 100 мг-экв. на 100 г минерала) являются Mg, Ca, K, Na.

Химический состав монтмориллонитовых (бентонитовых) глин отдельных месторождений приведен в табл. 7.

Таблица 7

Химический состав монтмориллонитовых (бентонитовых) глин [58–61]

| Компоненты | Месторождения | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** |
| $SiO_2$ | 50,08 | 56–60 | 60,9–64,6 | 55,0–64,0 | 59,07 | 53–55,3 | 50,1–61,5 | 62,60 |
| $TiO_2$ | - | 0,3–0,4 | 0,5–0,7 | | 0,81 | 0,03–0,33 | 0,14–0,57 | 1,10 |
| $Al_2O_3$ | 5,80 | 13–14 | 16,0–17,8 | 15,0–22,1 | 16,34 | 19,0–21,0 | 14,8–17,9 | 14,00 |
| $Fe_2O_3$ | 17,47 | 2,2–2,4 | 3,4–3,8 | 2,3–7,6 | 5,20 | 4,1–6,0 | 4,56–8,37 | 5,30 |
| FeO | 0,23 | 0,2 | | | 0,26 | 0,0–0,6 | 0,0–0,7 | |
| MnO | 0,03 | 0,05 | | | | 0,02–0,06 | 0,0–0,4 | |
| MgO | 4,81 | 2,5–3,5 | 2,4–3,0 | 1,8–2,8 | 1,63 | 1,9–2,5 | 2,07–3,29 | 1,60 |
| CaO | 0,17 | 1,8–2,5 | 0,7–3,0 | 0,8–3,7 | 0,79 | 1,34–2,13 | 0,93–2,48 | 2,80 |
| $Na_2O$ | | 0,2 | | | 1,82 | 0,11–0,18 | 1,22–4,16 | 0,20 |
| $K_2O$ | | 1,2–2,0 | | | 0,94 | 0,14–0,31 | 0,10–0,78 | 3,00 |
| $H_2O^-$ | | 9,0–12,0 | | | | 6,89–8,94 | 6,46–9,63 | |
| $H_2O^+$ | | 15–16 | | | | 7,30–9,17 | 2,99–6,47 | |
| п.п.п. | 14,91 | 5–7 | 7,6–9,6 | 5,2–8,5 | 14,95 | | | 9,10 |

Примечания: $H_2O^-$ - потери воды до температуры 105°С; $H_2O^+$ - потери воды до температуры 350°С; п.п.п. – потери при прокаливании.

1 – Южно-Уральский район, Сахаринское месторождение нонтронитовых глин;

2 – Южно-Енисейский кряж, Камалинское месторождение, присутствует $P_2O_5$ – 0,1–0,5 %;

3 – Хакасия, Минусинская котловина, месторождение «Десятый хутор», присутствует $SO_3$ – 0,03–0,62 %;

4 – Хакасия, Минусинская котловина, Черногорское месторождение;

5 – Хакасия, Минусинская котловина, Подсиньское месторождение;

6 – Восточное Забайкалье, Приаргунье, Шивертуйское месторождение, присутствует $SO_3$ – 0,06 %;

7 – Восточное Забайкалье, Тулукуевская депрессия;

8 – Ленинградская область, Пикалевское месторождение, присутствует $SO_3$ – 0,06 %.

Плотность монтмориллонита варьирует от 1,7 до 2,7 г/см$^3$ [54]. Твердость 1–2 (мягкий).

Содержание воды в монтмориллоните зависит от влажности окружающего воздуха. В насыщенной водяными парами среде он поглощает воду, в сухом воздухе - отда-

ет. При нагреве до температуры 200°С минерал теряет почти всю молекулярную воду (рис. 3). Отщепление гидроксила с разрушением кристаллической решетки наступает при температурах 43–450°С. В каолините и галлуазите (минерал, близкий по составу к каолиниту) потери воды начинаются при более высоких температурах 380–400°С [54].

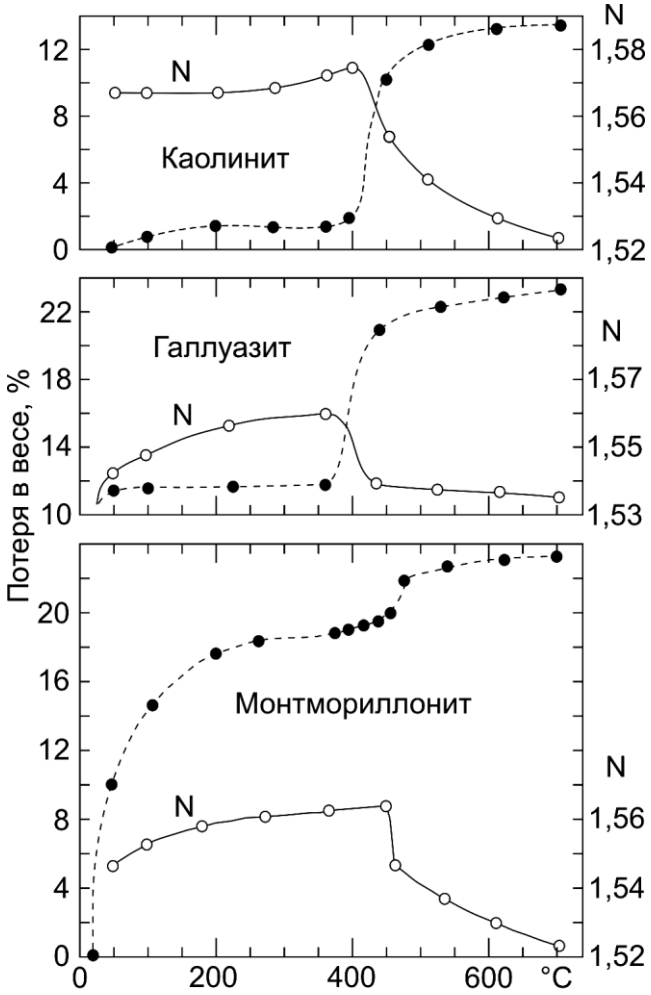



**Рис. 3.** Кривые обезвоживания (пунктир) и изменения показателя преломления *N* каолинита, галлуазита и монтмориллонита [54].

По сравнению с другими породами глины имеют низкую теплопроводность (табл. 8).

Таблица 8

Теплопроводность горных пород [62]

| Порода | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С) |
|---|---|
| Каменная соль | 5,3–6,1 |
| Граниты | 2,0–4,0 |
| Гнейсы | 2,2–3,1 |
| Порфириты | 2,0–2,5 |
| Глины | 1,5–1,7 |

При нагреве до 100–300°С теплопроводность глин снижается в 3–4 раза. При нагреве монтмориллонита в нём происходят необратимые структурно-минералогические изменения, ухудшающие его первичные сорбционно-изолирующие свойства. В частности, наблюдается переход монтмориллонита в иллит [60].

В монтмориллонитовых глинах проводился эксперимент по изучению миграции элементов в искусственном термоградиентном поле [63]. Электронагревателем (W 10 квт) с температурой нагрева до 1000–1200°С. Установлено, что уменьшение влажности восстановилось после охлаждения (12–14%). Перераспределение элементов происходит как при нагревании, так и после прекращения прогрева глин. В зону бывшего прогрева мигрируют (стягиваются): Hg, Ag, Zn, Cr, Co, V, Ga, B. На периферии прогрева концентрируются Sn, Cu, Ni. От зоны прогрева к периферии уменьшается количество Fe(II) и увеличивается количество Fe(III).

Свойства монтмориллонита в значительной степени зависят от происхождения и условий дальнейшего существования глинистых пород.

Ранее отмечалось различие набухаемости монтмориллонитовых глин гидротермального и осадочного происхождения (12,8 и 3 раза соответственно). При этом в водной среде максимальной набухаемостью обладают щелочные разновидности минерала и значительно меньшей – щелочноземельные. Это явление связано с различием степени диссоциации этих двух групп элементов. Отрицательно влияют на набухаемость солевая жидкая среда и присутствие щелочноземельных элементов.

По сравнению с другими глинистыми минералами монтмориллонит характеризуется высокой влагоемкостью. Вода в нем находится в нескольких формах: свободной, легко отделяемой и связанной, удерживаемой обменными катионами. В щелочных монтмориллонитах примерно в 5 раз больше связанной воды, чем в щелочноземельных [52].

Количество удерживаемой минералом воды, в свою очередь, сказывается на пластичности и водопроницаемости глин. Для монтмориллонитовых глин средняя величина пластичности составляет 42 %, максимальная - для гидротермального происхождения бентонитов – 104,7 %, минимальная – для элювиальных –24 %[49].

В монтмориллонитовых глинах содержится наибольшее количество связанной воды, меньшее – в гидрослюдах, еще меньшее – в каолинах. Связанная вода придает монтмориллонитам высокую водонепроницаемость. Наиболее активно связывают воду катионы натрия, что объясняет самые низкие фильтрационные свойства натриевых разновидностей этого минерала.

Группа монтмориллонита обладает характерной способностью образовывать устойчивые коллоиды – двухфазные системы с высокой степенью дисперсности глинистых частиц ($10^{-5}$–$10^{-7}$ см). Коллоидность зависит от степени диссоциации в структуре минерала. Молекулы воды своими отрицательно заряженными полюсами притягиваются к обменным катионам, стремясь оторвать их от находящихся на поверхности коллоидных частиц анионов. Чем выше диссоциация, тем интенсивнее образование коллоидов. Монтмориллониты с высокой набухаемостью имеют коллоидность (отношение хлопьевидной коллоидной массы к объему всего смешиваемого раствора) в среднем более 85 %, монтмориллонит гидротермального происхождения – 86,2 %, вулканогенно-осадочного – 98 %. Ненабухающие монтмо-

риллониты (бентониты) того же генезиса – всего 40 %. У щелочноземельных разновидностей осадочного и элювиального генезиса коллоидальность не превышает 25 % [49].

Образование коллоидов необходимо учитывать при анализе и моделировании миграционных систем на участках подземной изоляции РАО в глинах. Для псевдоколлоидных форм радионуклидов, в том числе актинидов, размеры ореольной зоны вокруг ПЗРО могут оказаться максимальными [32].

Катионнообменная емкость монтмориллонита выше, чем для других глинистых минералов (таблица 5). Например, в отличие от каолинита, катионный обмен в монтмориллоните происходит не только на углах и краях кристаллических ячеек, но и в большей степени вследствие замещения катионов, находящихся в межплоскостных пространствах [51]. Введение катионов в межплоскостные пространства монтмориллонита приводит к усилению связи, действующей вдоль оси С благодаря электростатическим силам. При этом степень расширения слоев зависит от размера катиона, проникающего в слоистую структуру. Процесс набухания обычно обратим, но для крупных катионов, силы притяжения преодолеваются, и увеличение объема становится необратимым.

Монтмориллонит образуется преимущественно при выветривании основных изверженных пород в условиях щелочной среды. Многие монтмориллонитовые (бентонитовые) глины являются продуктом разложения вулканических пеплов, оседавших в морских бассейнах. По составу продукты вулканической деятельности соответствуют среднекислым изверженным горным породам: трахитам, андезитам и др. (65-52 % $SiO_2$). Недостающий для монтмориллонита магний извлекается из морской воды.

На территории Российской Федерации выделены несколько провинций развития монтмориллонитовых глин «бентонитового» генезиса, разработаны комплексные геолого-тектонические критерии поиска [58, 59]. В качестве перспективных районов выделялись:

- области развития глинистых отложений морских и пресноводных бассейнов;
- территории древних морских бассейнов с близкорасположенными вулканическими аппаратами и с вулканогенным материалом в донных отложениях;
- равнины и водные бассейны, в которые сносится монтмориллонитовый материал;
- области развития монтмориллонитовых кор выветривания:
  - на ультраосновных породах;
  - на эффузивных породах;
  - на карбонатно-глинистых осадочных породах.

Монтмориллонитовые (бентонитовые) глины являются основным природным компонентом защитных барьеров, создающих безопасные условия изоляции радиоактивных отходов. Их наличие и эффективность использования определяют реализацию проектов создания различных типов ПЗРО. В связи с этим ниже приведена информация о наиболее крупных месторождениях этого типа глин.

На территории СССР в 1981 году было выделено одиннадцать провинций с прогнозируемыми запасами сырья около 26 млрд.т (второе место в мире после США) [58]. Еще во время существования Советского Союза возникла проблема территориального разрыва основных сырьевых источников, сосредоточенных в Закавказье и Средней Азии, от крупных потребителей бентонитовой продукции в

центральных районах страны. После распада СССР минерально-сырьевой комплекс испытал глубокий и затяжной кризис [64]. Кризисные явления в полной мере затронули и сырьевую базу бентонитовых глин.

Ниже приведены краткие данные о месторождениях монтмориллонитовых (бентонитовых) глин, эксплуатирующихся в наше время или имеющих наибольшие перспективы развития.

*Месторождения Алтае-Саянской провинции [53, 58, 59] .*

Провинция включает 7 месторожденний на территории юга Красноярского края, республики Хакасия и Кемеровской области – Камалинское. Пешенское, Мало-Сырское, Балахтинское, «Десятый Хутор», Черногорское и Подсиньское. . Этот регион развития монтмориллонитовых (бентонитовых) глин представляет особый интерес, поскольку расположен вблизи Нижнеканского массива – места предполагаемого сооружения подземного хранилища ВАО. Кроме того, в 1994 г. на базе месторождений «Десятый Хутор» и Черногорское образовался крупный поставщик глинопорошков ОАО «Хакасский бентонит».

Камалинское месторождение расположено в Рыбицком районе Красноярского края в 18 км к северу от станции Новокамала. Оно связано пространственно и генетически с вулканогенно-осадочными образованиями нижнего карбона Рыбинской впадины. Месторождение образовалось за счет изменения туфов и туффитов в морской щелочной среде. Продуктивная толща имеет мощность 11,5–19,4 м. и состоит на 60-90 % из монтмориллонита. В глинах сохранились реликтовые структуры - пепловые, кристаллокластические, литокластические и другие [53].

Три месторождения расположены юго-западнее г. Красноярск на левом берегу р. Енисей.

Пашинское месторождение представляет пласт монтмориллонитовых глин мощностью от 8 до 33 м, залегающий на глубине 17-36 м среди туфо-песчаников и туфоалевролитов Минусинского прогиба.

Мало-Сырское месторождение по своему генезису связано с отложениями вулканогенно-осадочных пород в опресненных морских лагунах неогенового времени. Мощность пласта нонтронитовых глин составляет 18 м, глубина залегания – 17,6 м.

Балахтинское месторождение представлено пластом с мощностью 2,2 м, залегающим на глубине от 3 до 30 м среди туфопесчаников и туфов нижнего карбона. Основной минерал месторождения – гекторит – магний–литиевая разновидность монтмориллонита.

В пределах южной части Минусинской котловины вблизи г. Абакан располагается следующая группа, состоящая также из трёх месторождений.

«Десятый Хутор» – пласт аргиллитоподобных монтмориллонитовых глин с примесью гидрослюд залегает среди песчано-глинистых отложений карбона. Месторождение разрабатывается карьерами с общей площадью около 220 га.

Черногорское месторождение терригенное, переотложенное. Представлено пластом монтмориллонитовых глин (мощность 0,9–6,9 м), залегающим среди четвертичных отложений.

Подсиньское месторождение образовалось вследствие размыва и переотложения поверхностными водотоками глин нижнего карбона с их последующим отложением в донных углублениях опресненных лагун. Продуктивный пласт имеет

мощность 0,3–0,4 м (до 2 м). Глины полиминеральные с преобладанием кальциевого монтмориллонита.

*Месторождения Уральской провинции*

Монтмориллонит широко развит в коре выветривания основных изверженных пород: диабазов, базальтов, габбро, перидотитов и др.(52–45% $SiO_2$ ). В Северо-Уральском районе элювиальные залежи монтмориллонитовых глин образовались в палеозойских базальтах и андезитовых порфиритах в контактово-карстовых корах выветривания. В Южно-Уральском районе (Челябинская, Оренбургская области) элювиальные монтмориллониты связаны с обширными корами выветривания ультраосновных пород.

Сахаринское месторождение расположено в Челябинской области в 50 км на юго-восток от г. Магнитогорск. Геоморфологически это Зауральский пенеплен, образовавшийся на ультраосновных, основных и щелочных породах Магнитогорского мегасинклинория. Продуктивная толща представлена зоной развития нонтронитовых глин мощностью от 1 до 50 м [58].

Зырянское месторождение находится на территории Курганской области в 30 км к западу от г. Курган. Содержание монтмориллонита в продуктивной толще от 60 до 80 %. Её мощность колеблется от 4,3 до 11,2 м. Разработка месторождения ведется открытым способом с 1992 г.

*Месторождение Северо-запада России*

Первое месторождение монтмориллонитовых (бентонитовых) глин на территории Северо-Западного региона обнаружено в Ленинградской области в 1996-1997 гг. [61]. Продуктивный пласт мощностью 0,5–4,0 м залегает среди песчано-глинистых пород нижнего карбона. По минеральному составу преобладает смесь монтмориллонита и гидрослюд – более 70 %. Присутствуют также иллит, каолинит, кварц и кальцит. Примесные минералы: анкерит, анатаз, гематит, сфен и хлорит. Химический состав приведен в таблице 7.

Прогнозные ресурсы Пикалевского месторождения в пределах разведанных участков составляют около 400 млн т.

По наличию перспективных районов и месторождений на териитории РФ выделены также Центральная, Поволжская. Западно-Сибирская, Приморская, Северо-Восточная провинции [59].

В настоящее время крупной компанией по добыче и переработке бентонитовых глин является ООО «Компания Бентонит». Сырьевой базой являются месторождения «Десятый Хутор» в Хакасии (объединенное с «Черногорским»), Зырянское в Курганской области и Даш-Салахлинское в Азербайджане. Среди разнообразного ассортимента необходимо отметить использование продукции в технологии очистки вод, гидроизоляции водоемов, захоронении промышленных и бытовых отходов и гидроизоляции подземных сооружений. Химический состав готовой продукции различных месторождений приведен в табл. 9 [65].

Таблица 9

Химический состав бентонитовых глин ООО «Компания Бентонит»[65].

| Химическое соединение, % | Месторождения | | |
|---|---|---|---|
| | «Десятый Хутор» | Зырянское | Даш-Салахлинское |
| $SiO_2$ | 59,77 | 57,37 | 58,60 |
| $Al_2O_3$ | 19,80 | 19,40 | 13,40 |
| $Fe_2O_3$ | 4,22 | 5,97 | 4,70 |
| FeO | 0,56 | 0,94 | 0,18 |
| $TiO_2$ | 0,55 | 0,15 | 0,39 |
| CaO | 1,06 | 1,81 | 2,05 |
| MgO | 2,95 | 3,01 | 2,30 |
| $P_2O_5$ | 0,19 | 0,04 | 0,11 |
| $SO_3$ | 0,08 | 0,10 | 0,25 |
| $K_2O$ | 1,94 | 1,03 | 0,39 |
| $Na_2O$ | 0,90 | 0,78 | 2,30 |
| п.п.п. | 7,98 | 9,4 | 15,33 |
| Итого | 100 | 100 | 100 |

Накоплен большой опыт практического использования монтмориллонитовых глин для выполнения различных по своим механизмам защитных функций – механических, гидравлических, химических. Щелочные бентониты Цехис-Убанского месторождения в Грузии были использованы для предотвращения фильтрации семи километрового основания Асуанской плотины на Ниле. В практике строительства крупных горнотехнических сооружений разработаны конструкции опускных колодцев – железобетонных цилиндров с толщиной стенок до 2 м и диаметром до 30 м. Бентонитовые суспензии используются для спуска крупногабаритных конструкций и для защиты колодцев от проникновения грунтовых вод [66]. Пластичные глины используются для защиты жестких подземных конструкций от разрывных деформаций, вызванных сейсмическими воздействиями.

Монтмориллонитовые (бентонитовые, смектитовые) глины успешно используются для создания сорбционно-гидроизолирующих барьеров изоляции радиоактивных отходов. Многолетние исследования, проведенные в различных странах, показали, что этот генетический тип глин наиболее эффективен для использования в качестве буферного материала, окружающего упаковки отходов в глубоких хранилищах. Технологические смеси на основе монтмориллонита входят в состав заполняющих и герметизирующих материалов различных типов хранилищ РАО, в том числе для ВАО и ОЯТ [67, 68].

Однако мощность продуктивных пластов известных месторождений, как правило, недостаточна для строительства подземного хранилища РАО в монтмориллонитовых глинах «бентонитового» генезиса.

### *3.3. Группа иллита (гидрослюд)*

К иллитам относят глинистые минералы со структурой слюды, но с дефицитом калия [69] или слюды, в которых щелочи частично замещаются водой [70]. В справочной литературе иллит может рассматриваться как синоним гидромусковита [54] или как маложелезистый гидробиотит [70], что в какой-то степени обосновывает применение термина «гидрослюдистые» для иллитовых глин.

В современных публикациях и справочниках используется термин «иллит» [17, 28, 51, 55, 71], который будет также использован далее по тексту.

Формула иллита: $(K,H_2O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,H_2O]$ [55]. Содержание $SiO_2$ в иллите достигает 50-55 %, что выше, чем в нормальном мусковите, $Al_2O_3$ – ниже (25–33 %). Содержание $K_2O$ по сравнению с мусковитом уменьшается до 2–3 %, а $H_2O$ – возрастает до 8–9 %. Плотность 2,64–2,69 г/см$^3$.

Кристаллический каркас иллита состоит из трехслойных алюминатно-кремнекислородных пакетов. В отличие от монтмориллонита, в котором замещение происходят как в тетраэдрическом, так и в октаэдрическом слоях, в иллите основные замещения происходят в тетраэдрических слоях. При этом изоморфное замещение ионов $Si^{4+}$ на ионы $Al^{3+}$ в тетраэдрических слоях до величины примерно 15 % приводит к относительно высокой плотности отрицательных зарядов. Эти заряды притягивают ионы калия и прочно фиксируют их между соседними пакетами (рис. 4) [51].

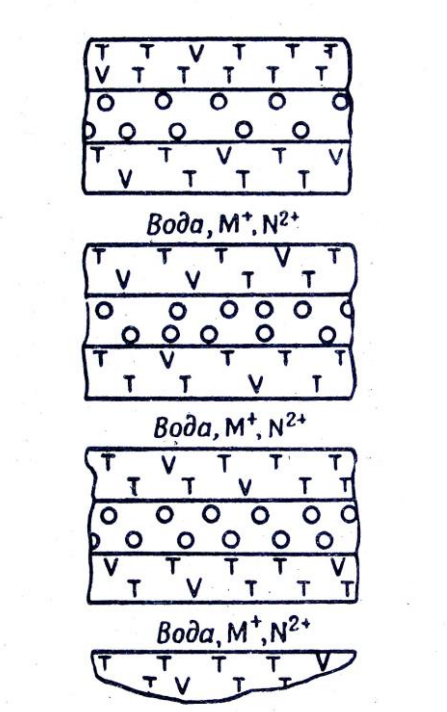



**Рис.4**. Схема кристаллической структуры иллита (по данным работы [51]).
T – тетраэдрические силикатные слои; O – октаэдрические алюминатные слои; V – слои изоморфно замещенные в тетраэдрическом положении; $\mathbf{M^+}$, $\mathbf{N^{2+}}$ - катионы, уравнивающие заряд

Электростатические силы между отрицательно заряженным каркасом и компенсирующими катионами значительно сильнее, чем у минералов группы монтмориллонита. Возникает сопротивление расширению решетки по оси С**.** Отсутствие набухания приводит к низкой скорости обмена, а катионы больших размеров могут вообще не проникнуть в межслоевые пространства [51].

В результате минерал имеет низкую набухаемость и незначительную катионообменную емкость (табл. 5).

Иллит образуется в морских условиях из породообразующих алюмосиликатов при диагенезе, в зонах гидротермальных изменений пород. Во всех случаях необходимым условием образования иллита и подобных ему минералов является наличие водной среды.

Глинистые породы, как правило, имеют полиминеральный состав, и в них присутствуют несколько минералов, таких как каолин, монтмориллонит, иллит и другие [28]. Для накопления мощных осадочных толщ необходимы длительные промежутки времени, в течение которого могут измениться условия накопления и режим осадкообразования. Вследствие этого возникает не только полиминеральность глин, но и появление различных по гранулометрическому составу осадков, например, песчанистых прослоев среди пелитовых глинистых пород.

Значительно реже встречаются мономинеральные разновидности, имеющие, как правило, небольшие мощности. Это хорошо подтверждают приведенные выше примеры месторождений монтмориллонитовых (бентонитовых) глин.

Иллит является постоянным компонентом полиминеральных осадков крупных палеобассейнов, сформировавших впоследствии мощные залежи глинистых пород в различных регионах (табл. 10).

Таблица 10

Состав глинистых минералов в глинистых сланцах Северной Америки, % (по данным работы [71]).

| Эра, период, эпоха | Гр.монтмориллонита | Иллит | Каолинит | Хлорит |
|---|---|---|---|---|
| Плиоцен | 50 | **25** | 13 | 12 |
| Миоцен | 50 | **25** | 13 | 12 |
| Олигоцен | 44 | **26** | 17 | 13 |
| Эоцен | 40 | **27** | 22 | 11 |
| Средний мел | 40 | **27** | 24 | 9 |
| Нижний мел | 18 | **42** | 28 | 12 |
| Юра | 18 | **48** | 23 | 11 |
| Триас | 18 | **50** | 20 | 12 |
| Пермь | 40 | **35** | 14 | 11 |
| Верхний карбон | 30 | **43** | 14 | 13 |
| Средний карбон | 40 | **40** | 8 | 12 |
| Нижний карбон | 10 | **72** | 6 | 12 |
| Девон | 10 | **72** | 6 | 12 |
| Силур | 10 | **75** | 5 | 10 |
| Ордовик | 18 | **66** | 5 | 11 |
| Кембрий | 6 | **77** | 5 | 12 |
| Протерозой | 4 | **77** | 4 | 15 |

Приведенные в табл. 9 четыре главных породообразующих глинистых минерала, включая иллит, используются при классифицировании пелитолитов по химическому составу [28].

Полиминеральные глины, наиболее распространенные среди осадочных пород, относятся чаще всего к сравнительно малоценным сортам и применяются в основном как сырье для кирпично-черепичного производства.

Широкое распространение и большие мощности пластов полиминеральных глин определили перспективу их использования для подземного захоронения твердых промышленных отходов [72]. В пределах Европейской части СССР выделены районы, в которых залегают мощные толщи водоупорных глин. На территории Российской Федерации такими районам являются:

- Ленинградская, Новгородская, Архангельская области, где развита мощная толща так называемых «синих глин» нижнего кембрия;
- Смоленская, Тверская, северные части Калужской и Вологодской областей, где широкое распространение имеют карбонатно-глинистые отложения верхнего девона;
- Московская область, в пределах которой могут быть использованы только участки юрских глин с мощностью не менее 20–30 м, залегающих на глубине 50–100 м.;
- Ярославская, частично Нижегородская, Костромская, Волгоградская, Кировская области и Республика Коми могут использовать глинистые породы триаса, мощность которых от нескольких десятков метров до 600 м (Печерская синеклиза) и глубиной залегания от 100–150 м и глубже;
- в Саратовском Поволжье широко распространены неогеновые глины и т.н. «сыртовые глины», залегающие под маломощными четвертичными осадками;
- в Калмыкии, на юге Волгоградской области и в Ставропольском крае распространены мощные палеогеновые (майкопские) и неогеновые глины.

Геологическая среда вносит существенный вклад в решение многих хозяйственных и социально-экономических проблем территорий. На примере Ленинградской области и Санкт-Петербурга показано, что комплексное использование полиминеральных глинистых пород затрагивает вопросы минерально-сырьевой базы [73], захоронения промышленных токсичных отходов [74], водоснабжения города и области [75]. Есть все основания считать, что глинистые формации решат проблему изоляции радиоактивных отходов в регионе [15–17, 22, 76].

## 4. Зарубежные исследования глинистых пород для изоляции РАО

Проблема окончательного захоронения радиоактивных отходов во всем мире остается самой сложной проблемой атомной энергетики. Не решен и вопрос об «оптимальной» геологической формации, гарантирующей безопасность изоляции РАО на длительные промежутки времени.

Глинистые породы, обладающие исключительно высокими барьерными свойствами, были и остаются во многих странах перспективной средой для сооружения подземных хранилищ (табл. 11 [77]).

Таблица 11

Страны, проводящие исследования глинистых пород для сооружения хранилищ РАО [77]

| Страна | Перспективные формации, местоположение |
|---|---|
| Аргентина | Глинистые породы южных провинций (Патагонская платформа) |
| Армения | Карбонатно-глинистые формации неогена в южных районах страны |
| Белоруссия | Палыгорскитовые глины верхнего девона (Припятский грабен) |
| Бельгия | Глины формации Boom, нижний олигоцен (Кампинская низменность), подземная лаборатория HADES-URF, PRACLAY |
| Болгария | Глины нижнего неогена в районе г. Козлодуй (северо-западный район страны) |
| Хорватия | Глинистые сланцы палеозоя в 90 км южнее Загреба |
| Франция | Глинистые породы верхней юры (восточная часть Парижского осадочного бассейна) |
| Венгрия | Неогеновые глины и пермские аргиллиты |
| Литва | Нижнекембрийские глины |
| Нидерланды | Глинистые породы олигоцена (Среднеевропейская равнина) |
| Польша | Глинистые сланцы триаса (Предсудетская моноклиналь, в районе г. Яроцин) |
| Словакия | Палеогеновые глинистые породы (южная часть страны в районе г. Лученец) |
| Словения | Аргиллиты, глинистые сланцы, мергели миоцена, пермо-карбона и карбона (южные, центральные и северные районы страны) |
| Испания | Проект хранилища в глинах на глубине 260 м |
| Швейцария | Глины среднего отдела юрской системы (Opalinus clay), подземная лаборатория Mont Terry, кантон Юра |

### *4.1. Бельгия*

Бельгия является страной, в которой глины как среда для изоляции РАО изучаются в течение многих лет. Результаты проведенных комплексных исследований имеют большое значение при использовании глинистых пород для строительства ПЗРО в других странах [78-82].

В 1974 г. ядерным научным центром SCN/CEN (Studiecentrum voor Kerntnergie /Centre d'Endude de l'Energie Nucleaire) была начата исследовательская программа по окончательному удалению долгоживущих и высокоактивных отходов, в которой основной задачей являлся выбор в пределах страны перспективной геологической формации. Из представленных для рассмотрения глинистых пород были выбраны палеогеновые породы формации Boom Clay на участке Mole-Dessel вблизи г. Мол (Mol).

Программа научных исследований включала основные компоненты геотехнологической системы могильника: упаковки с отходами, ближнюю зону могильника, вмещающие горные породы, геологическое окружение. Предусматривается также разработка концептуального проекта и технических средств для создания могильника и проведение оценок безопасности системы захоронения [83-85].

**Исследования компонентов упаковки** включают:

- определение или проверку свойств материалов упаковки,
- исследование взаимодействия (совместимости) компонентов упаковки с окружающими материалами.

Программа предусматривает работы с разными матрицами (стекло, битум, цемент) и разными материалами контейнеров и канистр (высококачественная сталь, углеродистая сталь, никелевые сплавы Hastelloy C-4 и C-22 и титановый сплав Ti 99,8 % - Pd 0,2 %). Исследования по совместимости упаковок отходов с окружающими материалами должны прояснить процессы взаимодействия матрицы или материала контейнера с буферным материалом и вмещающей породой Boom Clay. В экспериментах рассматривались такие параметры, как состав отходов, температура, присутствие γ-излучения, характеристика химических форм актиноидов в растворе, коррозионное поведение стекла и др. Требуются систематические и многосторонние исследования возможных процессов и взаимодействий, которые будут происходить между матрицами РАО и глинами, в первую очередь тех, которые смогут снизить изолирующие свойства геологического окружения. По имеющимся экспериментальным и расчетным данным определенные проблемы могут возникнуть при захоронении битумированных среднеактивных отходов.

**В исследованиях ближней зоны** рассматривались последствия экскавации и сооружения подземных конструкций и последствия размещения в могильнике отходов. Изучено образование продуктов коррозии конструкционных материалов, радиолиза воды и органических веществ и их влияние на свойства глинистых материалов. Рассмотрена проницаемость породы для газообразных продуктов, например водорода, образующегося при коррозии матрицы и материалов упаковки или при радиолизе воды.

В качестве материалов засыпки и запечатывания полостей могильника исследовали цементные и глинистые материалы, а также их смеси. Особый интерес представляло использование в качестве буферного материала породы Boom Clay. Смеси глины с другими промышленными материалами, обработанные специальным методом, позволяют получать блоки с физическими свойствами, близкими к свойствам Boom Clay.

**Исследования свойств вмещающей породы** были сосредоточены в основном на изучении миграции радионуклидов и были посвящены:

- физическим и химическим свойствам Boom Clay (химический состав главных компонентов, гранулометрия, гомогенность и т. д.);
- способам отбора проб и определению их свойств (криогенные методы, лиофилизация и т. д.);
- химическим формам различных продуктов коррозии и продуктов выщелачивания в глинистых материалах;
- моделированию миграции;
- определению параметров, характеризующих глину, и химических соединений, используемых при моделировании процессов миграции радионуклидов (параметры диффузии, гидравлические параметры и т. д.).

**Региональные исследования** геологического окружения были сосредоточены, в основном, на гидрологических условиях площадки с целью получения данных для оценки долговременной безопасности могильника.

Гидрологические наблюдения проводились с 1980 г. на площади более 2000 км$^2$ с 132 наблюдательными скважинами. Полевые исследования с целью создания гидрологической картины региона, окружающего площадку для могильника, сводились к отбору проб, мониторингу уровня воды, гидрологическим испытаниям для определения гидрологических параметров.

**Для разработки концептуального проекта** проведены работы по созданию технических средств сооружения могильника, определены новые технологии засыпки и запечатывания полостей материалами на основе глины, представлены усовершенствованные системы мониторинга с новыми типами сенсорных устройств, таких как оптические сенсоры, которые будут удовлетворять требованиям безопасности.

Начиная с 1980 г., в Бельгии функционирует подземная исследовательская лаборатория (ПИЛ), в которой проводятся натурные испытания в рамках национальных и международных научно-исследовательских программ [82].

Первая шахта ПИЛ диаметром 2,65 м была заложена на абсолютной отметке +26,48 м. Шахтный ствол прошел по пласту глин в интервале глубин 188,00–227,50 м. Проходку ствола и туннеля для ПИЛ осуществляли в замороженной глине, однако впоследствии от замораживания отказались. На глубине 223,90 м от шахтного ствола пройдены две горизонтальные выработки. Одна из них длиной 38,90 м имеет дополнительный вертикальный ствол (диаметр 1,40 м) до глубины 246,20 м. Галереи облицованы бетоном со стальными вставками, дающими возможность доступа к вмещающим глинам. В 1982–1983 гг. здесь проводились первые лабораторные исследования.

Вторая горизонтальная выработка диаметром 3,50 м и длиной 67,00 м – испытательный туннель проекта HADES-URF (High Activity Disposal Experimental Site – Underground Research Facility) – предназначается для проведения комплексных натурных экспериментов [79]. Сооружение соединительной галереи длиной 90 м, между двумя шахтными стволами, выполненное с помощью промышленной техники в период 2001–2002 гг., явилось важным этапом демонстрационной программы по геологическому захоронению РАО. Действительно, сооружение галереи с помощью туннельной техники требует надежных знаний о поведении породы. При неоптимальном подходе машина может быть зажата породой из-за конвергенции.

Перед проходкой связывающей галереи требовалось создать большую камеру, в которой можно было разместить проходческую машину и подсобное оборудование. Машина (рис. 5) [86] включает устройство для проходки породы, щит длиной 2,3 м для защиты рабочих и контроля конвергенции и устройство для установки облицовочных колец, состоящих из десяти бетонных сегментов толщиной 40 см и двух трапецевидных вставок для регулирования прилегания кольца к стенкам туннеля. Внешний диаметр облицовочных колец составляет 4,8 м.

**Рис. 5**. Фото машины для сооружения соединительной галереи [86]

Сопровождавшие проходку галереи научные исследования показали, что нарушения в породе вокруг галереи можно удерживать на приемлемом уровне. Доказано, что максимальное увеличение гидравлической проводимости в зоне нарушения глины в результате проходки галереи не превышает порядок величины по сравнению с нетронутой глиной.

Средняя скорость проходки составляла 3 м/сут, а максимальная достигала 4 м/сут. Таким образом, сооружение связывающей галереи прошло успешно и явилось важным шагом на пути к разработке и проектированию подземного могильника.

Для выполнения исследований по проекту PRACLAY (Preliminary Demonstration Test for Clay Disposal) в 1995-1999 гг. был сооружен второй шахтный ствол диаметром 6 м и горизонтальная испытательная галерея длиной 80 м, соединяющаяся с испытательным туннелем лаборатории HADES-URF (рис. 6) [82].

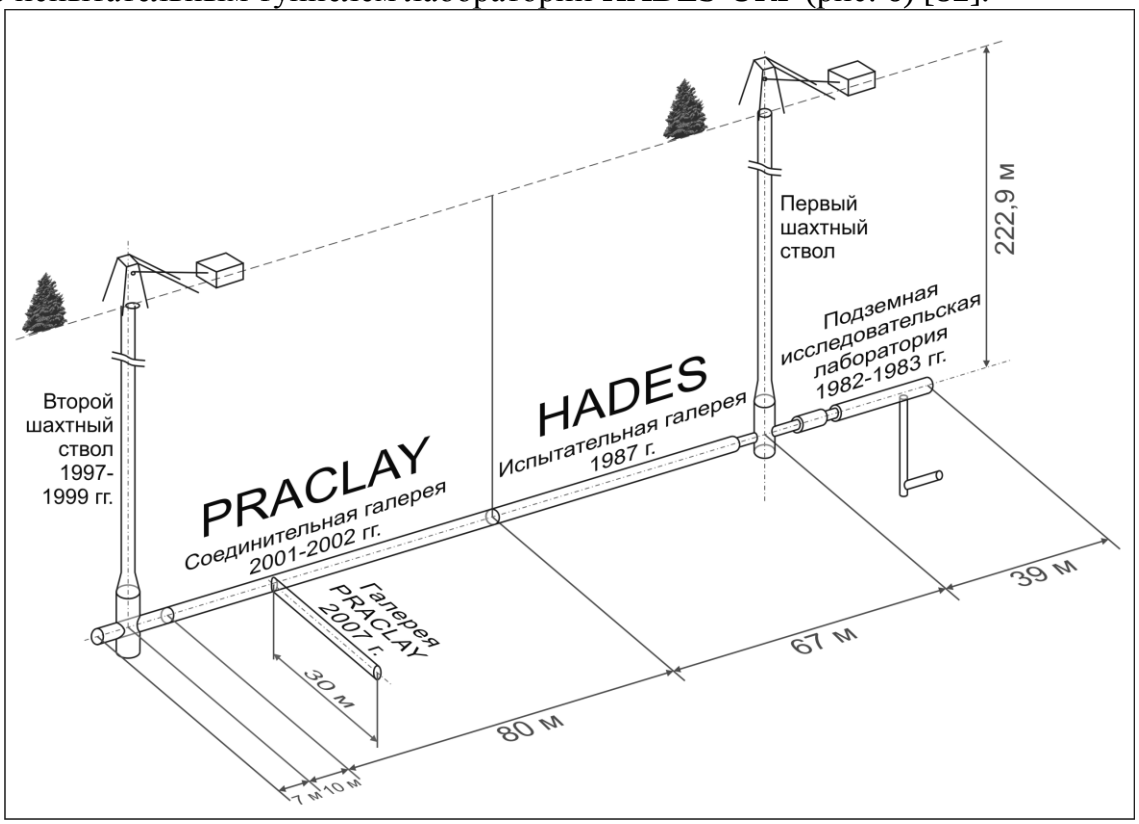



**Рис. 6** Подземная исследовательская лаборатория в глинистых формациях Boom Clay (установка HADES – URF) [82].

На установках лаборатории HADES-URF проводятся следующие эксперименты:

- исследования характеристик пласта Boom Clay;
- мониторинг термогидромеханического поведения глин;
- исследования миграции радионуклидов;
- изучение особенностей перемещения газов внутри пласта глин;
- оценки поведения различных форм иммобилизации РАО – цементы, битумы, стекла;
- сравнение свойств засыпок различного состава;
- сравнительные оценки вертикального и горизонтального вариантов размещения захораниваемых РАО.

Все программы исследований ПИЛ направлены на определение возможности подземного захоронения высоко- и среднеактивных отходов в глинистых породах Boom Clay. С этой целью последовательно проводились работы, характерные для аналогичных проектов – фундаментальные, методологические и прикладные:

- определение свойств вмещающей геологической среды, её соответствие с требованиями базовых геологических критериев;
- реализация методов проходки подземных выработок с минимальными механическими повреждениями глинистого пласта;
- изучение взаимодействия между техногенными компонентами системы подземной изоляции и вмещающими породами;

- разработка методологии оценки безопасности долговременной изоляции отходов;
- создание предварительного проекта хранилища.

В 2004 г. были подведены итоги результатов проведенных комплексных геологических, гидрогеологических, геохимических и геомеханических исследований позволяющих детально характеризовать формацию Boom Clay как геологическую среду для подземной изоляции РАО [84].

Глины формации Boom расположены в северо-восточной части Бельгии. По своему происхождению это морские отложения, образовавшиеся в среднем олигоцене 30–35 млн. лет назад. На участке ПИЛ глины залегают на глубине 160 м, мощность пласта около 100 м. (рис. 7) [77, 78]. Открытые выходы коренных отложений формации расположены в понижениях рельефа в 25–30 км к югу и юго-западу. Пласт глин, как и все осадочные породы палеогена и неогена, полого (1–2%) наклонен к северо-востоку. Минералогический, гранулометрический состав и другие характеристики глин приведены в табл. 12.

Таблица 12

Основные характеристики глин (Boom Clay) [27, 78, 84].

| Характеристики, свойства | Количественные оценки |
|---|---|
| *Минералогический состав,%* | |
| Глинистые минералы, Σ: | **30-60** |
| Иллит | 20-30 |
| Смектит | 20 |
| Иллит + смектит | 10 |
| Хлорит | 5-10 |
| Хлорит + смектит | 10 |
| Каолинит | 20 |
| Кварц | **20-60** |
| Полевые шпаты | **5-10** |
| Карбонаты | **1-5** |
| Пирит | **1-5** |
| Органика | **1-5** |
| *Гранулометрический состав, %* | |
| <2 мкм | **49** |
| 2–60 мкм | **47** |
| 60–200 мкм | **3,5** |
| > 200 мкм | **0,5** |
| Плотность естественно влажных проб, г/см$^3$ | **1,9–2,1** |
| Плотность сухих проб, г/см$^3$ | **1,68–1,80** |
| Влажность, % | **15–22** |
| Пористость, % | **34,6–44** |
| Индекс (число) пластичности | **32 – 51** |
| Модуль Юнга (продольной упругости), МПа | **200 - 400** |

Геологическая зона ПИЛ характеризуется крайне низкой тектонической и сейсмической активностью. Современное региональное поднятие составляет 0,5 мм/год. Складчатые и разрывные структуры ориентированы на северо-северо-запад и северо-восток. После окончания оледенения какая-либо активность этих структур не наблюдалась [78].

В качестве потенциальной среды для подземной изоляции РАО пласт глин формации Boom характеризуется как непрерывный и однородный. Для оценки неоднородности проведены специальные геохимические исследования [84].

Изучалось распределение природных элементов и радионуклидов, присутствующих в пласте глины в следовых количествах, таких как РЗЭ, U и Th. Их поведение можно рассматривать в качестве аналога поведения радионуклидов, которые будут присутствовать в отходах, размещенных в могильнике. Показано, что в Boom Clay наблюдается единообразное распределение большинства следовых элементов, а небольшие вариации в пределах одного порядка величины, могут быть связаны с литологией. Большинство РЗЭ обнаружено в глинистых минералах. Th, присутствующий в глине со средней концентрацией 4,6 мкг/г, проявляет такое же поведение, как и РЗЭ.

В отличие от большинства следовых элементов U, присутствующий в глине со средней концентрацией 4,6 мкг/г, имеет более высокое содержание в слоях, обогащенных органикой и/или карбонатом.

Изучение радиоактивного равновесия изотопов семейства U и Th в Boom Clay показало, что эта формация находится в состоянии векового радиоактивного равновесия. На этом основании было сделано заключение о том, что она не подвергалась каким-либо нарушениям по меньшей мере в течение 1 млн лет [87].

Формация Boom Clay характеризуется очень низкой вертикальной гидравлической проводимостью ~ $10^{-6}$ м/сут и очень низким гидравлическим градиентом (0,02). Поэтому миграция радионуклидов в поровой воде протекает путем диффузии. Этот механизм был подтвержден в подземной лаборатории в опытах с $^{3}H_2O$ и $^{134}Cs$. Опыт по просачиванию $^{134}Cs$ в течение 7 лет при очень высоком искусственно созданном гидравлическом градиенте (600–1700) показал незначительное просачивание, указывая на то, что даже при очень высоком гидравлическом градиенте миграция Cs определяется в основном диффузией.

В то же время установлена анизотропия стратифицированных глинистых пород формации Boom, выраженная различием структурно-минералогических свойств и таких параметров, как гидравлическая проницаемость. Диапазон этой величины варьирует в пределах $10^{-5}$–$10^{-7}$ м/сут. Для оценки анизотропии пласта глинистых пород (разницы гидропроводимости по напластованию и перпендикулярно ему) проведено несколько сотен измерений. Среднее значение анизотропии равно 2 [84].

Иллит-монтмориллонитовые глины формации Boom являются региональным водоупором, разделяющим водоносные песчаные породы вышележащего неогенового (водопроницаемость 0,15–40 м/сут) и нижележащего олигоцен-эоценового

возраста (водопроницаемость 1,5-1,5·$10^{-3}$ м/сут). Направление движения подземных вод в этих горизонтах с востока на запад в зону разгрузки в долине р. Шельда [80] ( рис. 7 [27, 78]).

Химический состав Boom Clay (табл. 12 [27]) отвечает составу монтмориллонит-иллитовых глинистых пород.

Таблица 13

Химический состав сухих проб Boom Clay [27]

| Элементы | Примерное содержание, % |
|---|---|
| $SiO_2$ | 64 |
| $TiO_2$ | 0,5 |
| $Al_2O_3$ | 14 |
| $Fe_2O_3$ | 5,9 |
| CaO | 0,6 |
| MgO | 0,7 |
| $Na_2O$ | 1,4 |
| $K_2O$ | 2,2 |
| П.п.п. | 10 |

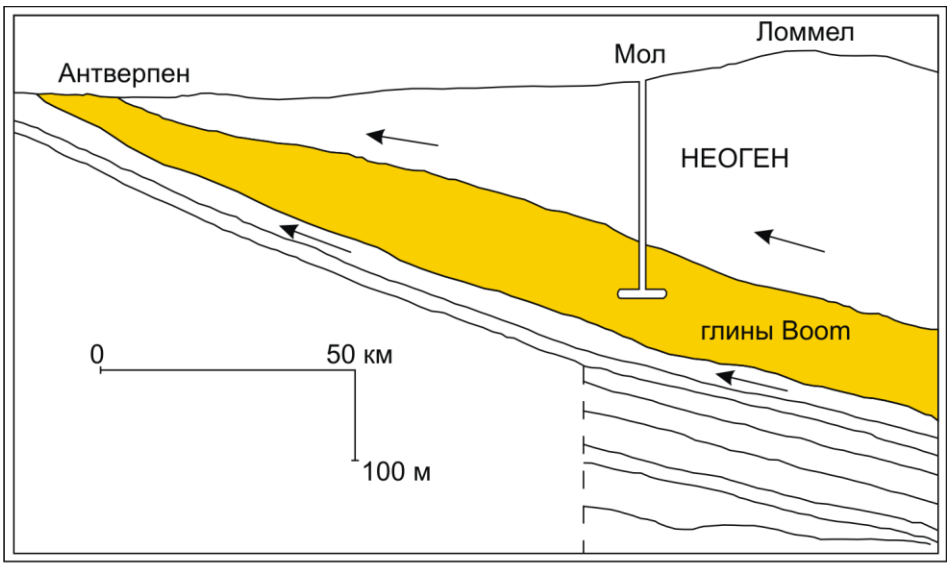
Естественная радиоактивность (Бк/кг сухого образца): – $^{40}$K ~7,4·$10^2$, $^{226}$Ra ~ 7,4·$10^1$, $^{232}$Th ~4,4·$10^1$ [27].

В таблице 14 приведено распределение примесных элементов среди породообразующих и второстепенных минералов. Здесь обращает на себя внимание группа органического вещества, пирита, карбонатов и апатита, которая концентрирует наиболее разнообразный состав элементов-примесей.

Таблица 14

Распределение примесных элементов в Boom Clay [86]

| Примесные (tracer) элементы | Минералы Boom Clay |
|---|---|
| Th, РЗЭ, V, Cu, Ni, Cr, Zn | Иллит<br>Смектит<br>Иллит-смектит |
| U, РЗЭ, Rb, Cs, Nb, Ta, Tl, Pb, Mn, Mg | Органика<br>Пирит<br>Карбонаты<br>Апатит |
| Hf, Zr, Ba | Кварц<br>Полевые шпаты<br>Мусковит<br>Тяжелые минералы |



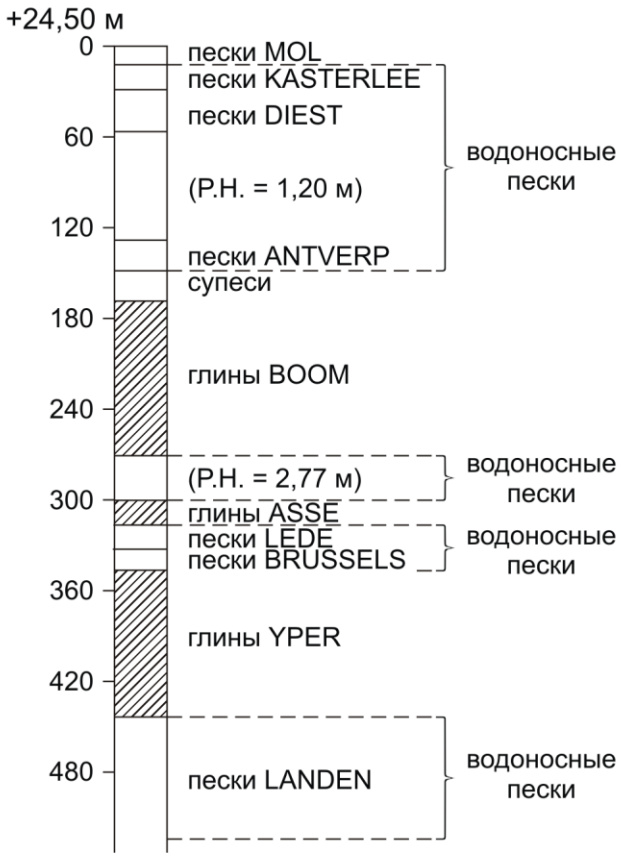




**Рис.7.** Геологическое строение участка Mol [77, 78]
Стрелками показано направление движения вод водоносных горизонтов;
P.H. – пьезометрический уровень напорных водоносных горизонтов.

Несмотря на то, что глины имеют морское происхождение, их поровые воды по химическому составу натриевые бикарбонатные [81]. Смешанный бикарбонатно-натриевый и хлоридно-натриевый состав поровых вод наблюдается в западном направлении от площадки Mol. Измеренные значения pH in situ – 8,2–8,6. Величина окислительно-восстановительного потенциала Eh – от –270 до –400 mV. По имеющимся фактическим данным разработана геохимическая модель формирования поровых вод с участием таких минералов, как пирит, карбонаты, халцедон [84]. Геохимическое моделирование показало, что состав поровых вод является равновесным с минеральным составом глин.

Формация Boom Clay является восстановительной и слабощелочной средой. В этих условиях некоторые радионуклиды находятся в низкорастворимой химической форме. Присутствующие вторичные минералы, такие как кальцит, сидерит и пирит в количестве 1–5 мас % обеспечивают глины буферными свойствами в отношении pH и Eh. Минералы в составе глины имеют отрицательный электрический заряд, который благоприятен для сорбции катионов на поверхности твердой фазы. Поэтому глина характеризуется высокой ионообменной способностью.

Boom Clay содержит около 1–3 мас %. органических веществ, малая доля которых находится в поровой воде (<0,05 %) и является мобильной. Около половины органических веществ, растворенных в поровой воде представляют собой гуминовые высокомолекулярные кислоты (~70 %), фульвиновые кислоты (~30 %) и в небольшом количестве другие низкомолекулярные органические вещества. Они имеют молекулярную массу менее 1000. Boom Clay со средним диаметром пор около 5 нм действует как ультрафильтр для коллоидных частиц, в особенности для органических коллоидных частиц. Для оценки влияния органических веществ на перенос радионуклидов были проведены исследования с меченными $^{14}C$ органическими веществами, контактирующими с радионуклидами. Полученные данные показали, что органика, если и влияет на миграцию некоторых радионуклидов, то в незначительной мере.

Для оценки барьерных свойств глинистых пород формации Boom Clay выполнены комплексные исследования, включенные в программы PAGIS (Performance Assessment of Geological Isolation System for Radioactive Waste), GEOTRAP (Radionuclide Migration in Geological, Heterogeneous Media), MIRAGE (Migration of Radionuclides in the Geosphere), CERBERUS (Control Experiment with Radiation for the Belgian Repository) и др.

Исследования включали [81]:

- выделение и обоснование основных процессов, управляющих миграционной подвижностью радионуклидов;
- определение параметров системы миграции;
- разработку прогнозной модели формирования в пространстве и во времени ореолов рассеяния радионуклидов;
- обоснование и демонстрацию разработанного прогноза миграции в Boom Clay;
- разработку мероприятий по увеличению общественного доверия.

В программах рассмотрены данные, полученные в лабораторных «локальных» экспериментах по определению миграции радионуклидов, а также по результатам трассерных испытаний в ПИЛ HADES. Натурные опыты подтвердили низкую гид-

равлическую проницаемость глин и отсутствие на исследуемом участке водопроводящих разрывных нарушений.

Было показано, что миграционные процессы контролируются главным образом молекулярной диффузией, а структурно-минералогическая анизотропия среды играет второстепенную роль [81, с. 97].

Лабораторные эксперименты и натурные испытания в качестве ключевых параметров оценки барьерных свойств глинистых пород выделили:
- характеристику открытой пористости;
- величину коэффициента задержки радионуклидов R;
- константы диффузии.

Значения коэффициента задержки для Boom Clay на участке Mol приведены в таблице 15 [78].

Таблица 15

Оценки значений коэффициента задержки R для Boom Clay [78]

| Элемент | R | Элемент | R |
|---|---|---|---|
| Se | 320 | Sm | 320 |
| Sr | 64 | Th | 10 700 |
| Zr | 10 700 | U | 3 200 |
| Tc | 107 | Np | 1 070 |
| Pd | 320 | Pu | 10 700 |
| Sn | 400 | Am | 3 200 |
| Cs | 320 | Cm | 3 200 |

Экспериментально установлено [84]:
- в глинах не происходит задержки: HTO, $I^-$, $H^{14}CO_3^-$;
- задерживаются при ионном обмене: Na, Ca, Sr, Ra;
- на характер миграции Se, Tc, U, Np, Pu влияют окислительно-восстановительные условия среды;
- Eu, Am образуют способные мигрировать органические комплексы.

При изучении миграции рассмотрены процессы растворения матрицы ВАО – боросиликатных стекол, которые в значительной степени зависят от свойств подземных (поровых) вод [87]. В частности, растворение стекла существенно снижается при увеличении в водной фазе концентрации кремния. В меньшей степени растворение боросиликатной матрицы зависит от окислительно-восстановительных условий, поскольку главные компоненты подземных или поровых вод (Si, Al) не подвержены изменению валентного состояния при ожидаемых значениях Eh.

Присутствующий в Boom Clay органический материал способствует удержанию актинидов и некоторых продуктов деления [80]. В то же время, актиниды могут образовывать хорошо мигрирующие органические комплексы.

Прогноз условий подземной изоляции ВАО по программе PAGIS составлялся исходя из базового проекта могильника на площадке Mol [78]:
- общий объем остеклованных ВАО 900 $м^3$;
- число захораниваемых канистр с ВАО 6 000;
- магистральная галерея:
  - диаметр 4,5 м;
  - длина 550 м;

-вспомогательные (эксплуатационные) галереи:

- количество 3;
- диаметр 3,5 м;
- длина 2 500 м;

- наклонные скважины для загрузки канистр:
  - количество 750;
  - диаметр 0,5 м;
  - длина 22 м;
  - расстояние между скважинами 10 м;
  - количество канистр в скважине 8;
- глубина могильника 270 м;
- площадь могильника ВАО 1 км$^2$.

В начале 2000–х гг. были разработаны несколько вариантов для различного количества ВАО и ОЯТ. По одному из проектов могильник состоит из 10 эксплуатационных галерей длиной 1000 м, расположенных на расстоянии 40 м друг от друга, окруженных кольцевой объединяющей галереей [84]. Один из последних вариантов предполагает размещение ВАО и долгоживущих НАО и САО в горизонтальных галереях (в 4–х секциях по 200 м). Галереи укрепляются бетонной облицовкой для предотвращения конвергенции подземных выработок. По центру устанавливаются трубы для размещения упаковок с отходами. Пространство между трубой и бетонной облицовкой заполняется уплотненной глиной.

Существуют различные предложения по конфигурации и составу мультибарьерной системы, в которой основное значение придается буферным засыпкам глинистыми материалами [77, 78, 84].

Для разработки долгосрочного прогноза условий подземной изоляции радионуклидов используются различные методы экстраполяции природных событий [88]. В качестве фундаментального принимается принцип «настоящее является ключом к прошлому», который позволяет обосновать развитие в будущем эволюционных, циклических и вероятностных природных процессов.

Установленные закономерности эволюционного развития тектонических, климатических, геоморфологических, гидрогеологических и прочих процессов позволяют научно обосновать прогнозируемые события, которые могут проявляться на детерминистическом или вероятностном уровнях.

Разработаны различные методы и модели, в которых выделяются превалирующие факторы прогнозируемых изменений – климат, выветривание, эрозия, оледенение и пр. Эти факторы, особенно их сочетание, будут оказывать существенное воздействие на режим миграции радионуклидов, который определяет безопасность подземной изоляции РАО

На основе знаний природных закономерностей развития окружающей среды и по результатам лабораторных, натурных исследований разработаны компьютерные модели миграционных процессов на конкретном геологическом участке Mol и в прилегающем регионе [88].

Расчетные модели показали, что при естественном развитии и деградации могильника миграция радионуклидов с подземными водами может создать в речных водах крайне низкие индивидуальные мощности доз - около $10^{-11}$ Зв/год [80].

Рассмотрены различные варианты нарушения подземной изоляции вследствие влияния техногенных или природных (климатических) факторов, при которых мощность дозы также не превысит рекомендации МКРЗ [78]. Во всех рассматриваемых вариантах большинство мигрирующих радионуклидов удерживается в пределах объема пласта глин или в значительной степени распадается за время прохождения природного барьера [80].

За пределы пласта глин за один миллион лет могут мигрировать два наиболее долгоживущих радионуклида - $^{129}I$ ($T_{1/2}$ = 1,67·$10^7$ лет) и $^{237}Np$ ($T_{1/2}$ = 2,14·$10^6$ лет). Расчеты показали, что вклад этих радионуклидов в общую мощность дозы от природных источников незначителен [78, 80, 88].

### *4.2. Франция*

Преобладающая часть территории Франции представляет собой континентальную кору, консолидированную в конце палеозоя, с последующим развитием платформенного режима. Формирование осадочного чехла началось с нижней перми (~ 280 млн. лет). С этого времени осадками заполнялись две крупные синеклизы - Аквитанский и Парижский бассейны (Гароннская и Северофранцузская низменности). Юрские, меловые, нижнепалеогеновые отложения представлены в основном отложениями мелководных морей – песчаниками, глинами, известняками. В аквитанском бассейне морской режим сохранялся до миоцена (~ 20 млн лет) включительно. В Парижском – начиная с олигоцена (36,6 млн лет) морские осадки сменились континентальными. Два бассейна разделяет Центральный Французский горный массив.

В качестве основного решения по обращению с высокоактивными и среднеактивными долгоживущими РАО во Франции принято их хранение в глубоких геологических формациях с возможностью извлечения. Ответственность за выбор площадки и проектирование хранилища лежит на Национальном агентстве Франции по обращению с радиоактивными отходами (ANDRA). Поставленные перед Агентством задачи планируется выполнить в 2015 г., а в дальнейшем, при условии получения лицензии, в 2025 г. может начаться эксплуатация хранилища.

Обоснование возможности строительства хранилища представлены в документе ANDRA «Досье 2005 Аргиль» (интернет-сайт www.andra.fr).

В 1993 г. из 30 потенциальных площадок для могильника были выбраны четыре: граниты Центрального Французского массива в департаменте Вьенна, известковые глины в департаменте Гар (регион Лангедок-Руссильон на юге Франции); в департаментах Мез и Верхняя Марна (Парижский бассейн).

Две последние площадки объединены в единую – Мез – Верхняя Марна, на которой в конце 1999 г. после общественного обсуждения началось строительство подземной лаборатории (ПИЛ). Геологическое строение района хорошо изучено в связи с поисковыми работами (водоснабжение, нефть, геотермальные источники и др.). На участке строительства ПИЛ осадочные карбонатные и глинистые формации залегают моноклинально под углом 2° на северо-запад. Предлагаемые для строительства могильника верхнеюрские (келловей–оксфорд) аргиллиты залегают на глубинах от 400 до 500 м, мощность пласта 130–135 м. Их основные свойства приведены в таблице 16. Стратиграфический разрез келловей-оксфордской фомации приведен на рис. 8.

Таблица 16

Основные характеристики келловейско-оксфордских аргиллитов на участке строительства ПИЛ Мез–Верхняя Марна [77]

| Характеристики, свойства | Определения, количественные оценки |
|---|---|
| Минералогический состав | иллит, слюды, кварц, кальцит |
| Гидравлическая проницаемость | менее $8 \cdot 10^{-7}$ м/сут |
| Содержание воды | 2,8–8,7 % |
| Плотность | 2,32–2,61 г/см$^3$ |
| Пористость | 9–18 % |
| Коэффициент теплопроводности | 1,47/1,9 Вт/(м·°С) |
| Модуль Юнга (продольной упругости) | 230–1100 МПа |

Гидравлическая проницаемость карбонатных пород, окружающих аргиллиты ниже $8 \cdot 10^{-2}$ м/сут.

Строительство ПИЛ началось в 2000 г. Одновременно с проходкой двух шахт проводились геологические и гидрогеологические исследования, мониторинг гидравлических и механических изменений, вызванных выемкой породы. В аргиллитах проведены детальные исследования и наблюдения за изменением механических и прочностных характеристик пласта после проходки шахтных стволов. На глубине 445 м одновременно с изучением влияния горнопроходческих работ проведены натурные исследования диффузии, которые подтвердили результаты лабораторных опытов, проведенных ранее. Для сравнения лабораторных и натурных испытаний осуществлены эксперименты на глубине 490 м. Наиболее сложным оказался пробоотбор воды при крайне низком её содержании в аргиллитах (несколько процентов) и низкой водопроницаемостью пород.

Во время строительства ПИЛ из ниш на глубине 40 м пробурено 27 глубоких скважин, на глубине 490 м создана сеть горизонтальных выработок длиной 484 м.

В состав ПИЛ входят: наземные сооружения, шахты и подземные галереи.

Наземные сооружения общей площадью 17 га включают:

- зону общественной информации;
- техническую зону, в которой располагаются выходы на поверхность шахт, зону для подготовки экспериментов и другие технические здания,
- зону для складирования извлеченной породы.

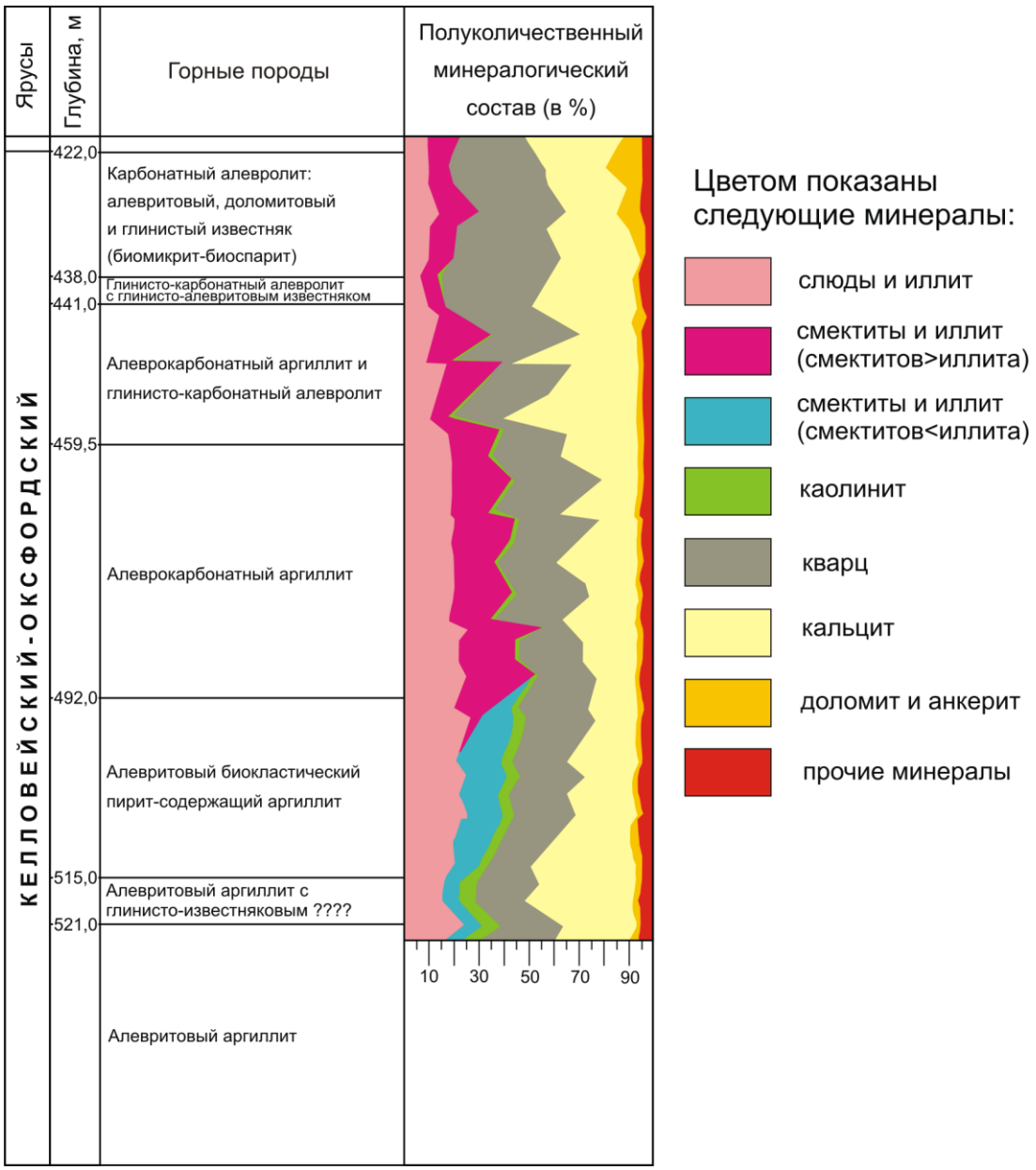



**Рис. 8.** Стратиграфический разрез келловей-оксфордской формации [77].

Из соображений безопасности ПИЛ имеет две шахты: для доступа в подземную часть (диаметром 5 м) и вентиляционную шахту (диаметром 4 м) (рис. 9). Шахты располагаются на расстоянии 100 м друг от друга. Глубина шахт 500 м. Через шахту доступа доставляются люди, производится подъем грунта и подача воздуха. Выход воздуха и транспортирование людей в непредвиденных случаях производится через вентиляционную шахту. Шахты облицованы бетоном и снабжены дренажной системой.

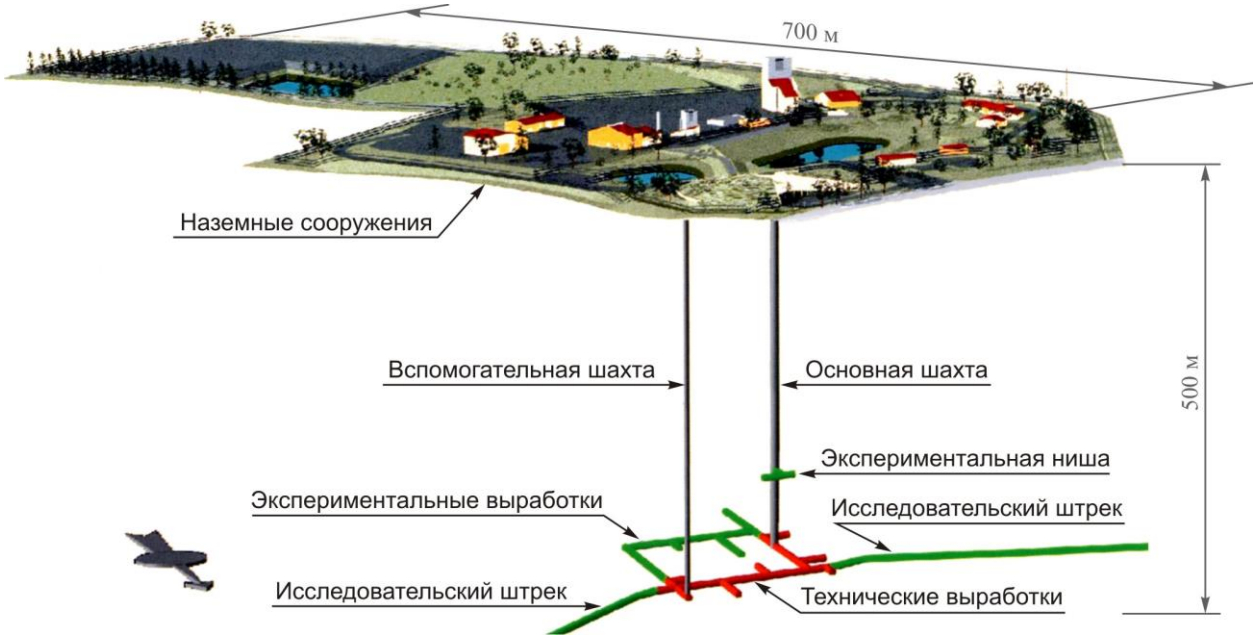



**Рис. 9.** Схематическое изображение ПИЛ в Бюре [77]

Галереи, построенные на глубине 490 м, имеют общую длину 1 км. Они подразделяются на 3 категории:

- для технических установок,
- для экспериментов,
- два вертикальных штрека для геологических исследований: один направлен вверх, другой – вниз.

В ПИЛ были выполнены следующие обследования, измерения и эксперименты [89]:

- научные обследования штреков и потревоженной зоны, измерения давления, водопроницаемости и газопроницаемости породы,
- измерение деформации породы вокруг сооруженных шахт доступа в ПИЛ,
- измерения давления поровых вод,
- отбор проб воды и газа и их химический анализ,
- эксперименты по диффузии и удерживанию радионуклидов,
- эксперименты с целью подготовки процесса экскавации и удаления породы,
- эксперименты по изучению теплопроводности породы,
- измерения ползучести аргиллита в течение нескольких лет.

Результаты исследовательской программы в ПИЛ наряду с результатами других исследований и разработок в рамках программы по геологическому захоро-

нению, выполненных в период с 1992 по 2005 гг., включены в отчет агентства Andra “Dossier 2005 Argile”, который, как предписано Законом 1991 г., был подан правительству в июне 2005 г.

В течение 1992–2005 гг.выполнялась исследовательская программа по геологическому захоронению, исследования по которой включали [90]:

- сбор данных об упаковках с отходами и их поведении в могильнике;
- характеристику площадки: проводились лабораторные и in situ эксперименты, эксперименты в ПИЛ, исследования гидрологических, сейсмических и климатических процессов и их эволюции;
- разработку концептуального проекта могильника и его интеграции в геологическую среду;
- изучение вопросов безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия могильника;
- исследования поведения и эволюции могильника, включающие получение данных, характеризующих тепловые, механические, химические и гидравлические процессы и их моделирование на длительный срок;
- оценку долговременной безопасности могильника.

При обосновании безопасности захоронения изначально учитываются количество, типы и характеристики упаковок с отходами и их поведение в условиях могильника, в том числе, возможный выход из них радионуклидов. С этой целью была составлена модель учета РАО, в которую входили не только хранящиеся на производственных площадках кондиционированные и некондиционированные отходы, но и те, которые будут получены при дальнейшей эксплуатации АЭС.

Установлено, что упаковки среднеактивных отходов (САО, категория В) разнообразны по способу кондиционирования, форме и по радиоактивному и химическому содержанию. Для стандартизации обращения с упаковками при захоронении их будут помещать по 4 единицы в бетонный контейнер. Масса такой упаковки составляет от 6 до 25 т. Радиационная защита контейнера не предусмотрена [91]

Канистру с остеклованными ВАО (категория С) будут помещать в водонепроницаемый контейнер из стали со стенками толщиной 55 мм для того, чтобы исключить проникание воды к отходам во время тепловой фазы, когда температура отходов может превышать 50ºС. [90].

В одном из главных сценариев предполагается, что все 45000 т ОЯТ, выгруженных до конца срока эксплуатации существующих АЭС, будут переработаны, и общий объем остеклованных ВАО составит примерно 6300 $м^3$, а объем среднеактивных отходов – 80000 $м^3$ [89].

Детально исследовано долговременное поведение упаковок в условиях могильника для оценки возможного выхода из них радионуклидов. Были выявлены основные процессы, которые могут повлиять на матрицу и отходы в присутствии воды и приведут к выходу радионуклидов в поровую воду. Моделирование долгосрочного поведения упаковок с отходами показало, что время жизни стеклоподобной матрицы в условиях келловейско-оксфордской глинистой формации составляет, по меньшей мере, $n\cdot 10^4$ лет. В случае упаковок с битумированными отходами постепенный выход радионуклидов будет происходить в период от $10^4$ до $n\cdot 10^4$ лет. Выход радионуклидов из твердых отходов (оболочек твэлов и конструкционных материалов) определяется скоростью их коррозии.

В конце 2007 г. началась новая программа исследований, ставящая своей целью изучение «зоны экстраполяции» – прилегающей к ПИЛ территории площадью 250 км$^2$, в пределах которой можно применить результаты проведенных натурных испытаний [92].

В результате выполнения программы ANDRA в пределах зоны экстраполяции должен быть выбран участок площадью около 15 км$^2$ для размещения подземных сооружений хранилища высоко- и среднеактивных долгоживущих отходов в середине пласта аргиллитов на глубине около 500 м. Расположение и конструкция подземных выработок (шахт, горизонтальных выработок, ячеек для хранения РАО и пр.) будут определены в соответствии с требованиями критериев безопасности. Предполагается, что контейнеры с отходами будут располагаться в горизонтальных ячейках с возможностью их изъятия. Необходимость извлечения РАО и доработки конструкции хранилища могут возникнуть в случае обнаружения аномалий или существенном отклонении состояния подземного комплекса от составленного прогноза.

Для воздухообмена, транспортных операций и передвижения персонала необходимо создать несколько путей сообщения между подземными и наземными сооружениями – вертикальных шахт, спиральных или прямых съездов. Подземные сооружения хранилища будут представлены двумя отдельными участками для разделения и изоляции различных видов РАО. Один из участков включает около 40 ячеек для хранения САО, второй – 5 000 ячеек для хранения ВАО. Общая длина подземных сооружений составляет около 300 км, из которых 200 км приходится на участки хранения РАО и около 100 км – на соединительные выработки [92].

Сбор и анализ информации проводится на различных этапах эксплуатации по методу «феноменологический анализ состояния хранилища». В качестве примера рассматривается изучение тепловых нагрузок на вмещающие породы. Эти исследования были начаты непосредственно после размещения контейнеров с РАО на хранение, но до закрытия транспортно-технологической галереи. Предлагается следующая последовательность учета и моделирования выявленных и проанализированных процессов и явлений:

- гидравлический напор на стенки и кровлю выработок в пласте аргиллитов;
- капиллярное давление, обусловленное вентиляцией в процессе эксплуатации хранилища;
- снижение влажности стенок подземных выработок;
- суммарный эффект замедления конвергенции в сочетании с тепловым расширением аргиллитов;
- вариации нагрузок на несущие конструкции и их механическая устойчивость;
- влияние вскрытия и закрытия хранилища на взаимодействие инженерных конструкций и вмещающей геологической среды;
- возможные зоны трещинообразования.

Результаты «феноменологического анализа» используются при выборе средств наблюдения и контроля.

Особо отмечается, что проектирование хранилища и сбор информации – итеративная процедура, которая способствует обоснованию безопасности и является важнейшим условием доверия населения к новому радиационно опасному объекту.

Площадь наземных сооружений хранилища составит около 200 га. В их составе:

- цеха приема упаковок с РАО, их кондиционирования и размещения в контейнерах хранения;
- транспортная система передачи контейнеров в подземные сооружения через специальные шахтные стволы.

Площадь для размещения отвалов горных пород составит около 120 га, приблизительно 40 % объема которых будет использовано для засыпки подземных выработок при консервации хранилища.

Одновременно с научно-исследовательскими и техническими работами по обоснованию безопасности хранилища агентство выполняет программу демонстрации принципов и технологий, которые будут использоваться для подземной изоляции РАО. Смонтированы демонстрационные установки, созданы опытные образцы контейнеров для хранения САО, устройства для загрузки контейнеров в ячейки и пр. В подземных выработках будут созданы опытно-промышленные ячейки хранения для комплексных испытаний оборудования, технологии обращения с контейнерами, операций аварийного извлечения контейнеров. Опытные образцы и демонстрационные установки размещаются в специальном здании, расположенном на наземной площадке хранилища.

Возможность извлечения отходов в течение по меньшей мере 100 лет, можно гарантировать, если имеются сведения об эволюции состояния структур могильника и о технических средствах извлечения. Для этого используются результаты анализа долговременного поведения могильника и ведутся исследования, касающиеся организации работ в могильнике, особенно по обращению с упаковками, и разработки средств наблюдения и контроля состояния могильника [89].

Могильник глубокого заложения после закрытия будет существовать без вмешательства человека, сохраняя при этом полную безопасность. Для подтверждения долговременной безопасности необходимы серьезные научные обоснования.

Такие обоснования могут быть получены при проведении анализа состояний могильника, при которых рассматриваются процессы (тепловые, механические, гидравлические, химические, радиационные), их взаимодействия при эволюции могильника с момента его создания до срока в 1 млн лет [89].

Оценки долговременной безопасности могильника были произведены для сценария естественной эволюции системы захоронения и сценариев с разрушительными событиями, которые могли бы повлиять на безопасность могильника: полное разрушение запечатывающей системы, дефекты всех упаковок, вторжение человека, значительное нарушение всех функций безопасности.

Результаты расчетов показали, что даже при наихудшем сценарии возможные дозы от могильника не превысят 0,25 мЗв/год, что является допустимым значением, установленным регулирующим органом [91].

Исследования, проведенные агентством Andra за 14 лет, существенно повысили уровень понимания возможности аргиллитовой формации в обеспечении безопасности захоронения ВАО и долгоживущих САО на площадке Мез–Верхняя Марна. Главные результаты этих исследований сводятся к следующему:

- установлено, что площадка Мез–Верхняя Марна обладает благоприятными геологическими условиями для создания могильника;
- выбранное расположение могильника внутри формации использует преимущества благоприятных геологических условий;

- показана реальность возможного извлечения упаковок с отходами без ущерба для безопасности могильника;
- анализ безопасности продемонстрировал отсутствие значительного вредного воздействия могильника на окружающую среду;
- продемонстрирована осуществимость геологического захоронения во Франции.

Кроме того, было показано, что полученные результаты можно распространить на область в 200 км$^2$ вокруг площадки в Бюре.

Данные, собранные в "Dossier 2005", оказали существенное влияние на результаты национальных обсуждений по обращению с радиоактивными отходами, проходившие в 2005–2006 гг. На основании вывода о возможности безопасного захоронения ВАО и долгоживущих САО в глинистой формации на площадке Мез–Верхняя Марна и с учетом результатов общественных слушаний в июне 2006 г. французский Парламент опубликовал новый закон – Закон о планировании (Planning Act), обязывающий агентство ANDRA продолжить исследования и в 2015 г. подать лицензионную заявку на строительство могильника с тем, чтобы в 2025 г. приступить к приему отходов на захоронение.

Для выполнения задач, поставленных Законом о планировании, агентство ANDRA учредило HAVL-проект (проект по высокоактивным отходам) и разработало план развития (PDD), который определяет основные этапы осуществления проекта на период до конца 2014 г. На период с 2015 г. PDD дает предварительный график работ по сооружению могильника с тем, чтобы в 2025 г. осуществить прием первой партии отходов [92–93].

Отдельные программы исследований ANDRA посвящены захоронению радийсодержащих отходов и реакторного графита. Эти две категории относятся к низкоактивным долгоживущим РАО, и для их изоляции предлагается использовать глинистые формации.

Отходы, содержащие радий, образуются в основном при переработке и обогащении урановых руд. Основную проблему для изоляции представляет изотоп $^{226}$Ra с периодом полураспада 1 600 лет. В урановой руде на 1 т урана приходится ~ 0,34 г $^{226}$Ra. Дополнительные осложнения связаны с образованием из радия дочернего газообразного элемента – $^{222}$Rn с периодом полураспада 3,82 сут – времени, достаточного при соответствующих условиях для миграции инертного газа. Объем упаковок с радийсодержащими отходами оценивается величиной 70 000 м$^3$ [94].

Графитовые отходы образовались в результате эксплуатации в 1960-1990 гг. газографитовых реакторов, а также экспериментальных реакторов Комиссариата по атомной энергии (КАЭ) Франции. В графитовых отходах наибольший вклад по активности вносят:

- долгоживущие радионуклиды: $^{14}$C ($T_{1/2}$ = 5730 лет), $^{63}$Ni ($T_{1/2}$ = 100 лет);
- короткоживущие радионуклиды: $^{3}$H ($T_{1/2}$ = 12,26 года), $^{137}$Cs ($T_{1/2}$ = 30,17 лет), $^{60}$Co ($T_{1/2}$ = 5,272 года), $^{55}$Fe ($T_{1/2}$ = 2,7 года).

Присутствует хорошо мигрирующий долгоживущий изотоп хлора – $^{36}$Cl с периодом полураспада $3{,}1 \cdot 10^5$ лет.

Общий объем графитовых отходов, подготовленных для размещения в хранилище, составит около 100 000 м$^3$. Их суммарная активность к 2013 г. составит $2{,}12 \cdot 10^{16}$ Бк.

На этапах выбора площадок необходимо провести детальное исследование глинистых пород, определить геометрические параметры пластов, гомогенность и проницаемость глин, разработать модели миграции газообразных и растворимых радионуклидов, дать прогноз развития геотехнологического комплекса с оценками влияния внешних факторов (эрозия, оледенение).

Рассматриваются несколько вариантов строительства подземных (приповерхностных) объектов окончательной изоляции (ООИ) РАО (рис. 10):

- создается выемка глубиной ~ 30 м, на дне которой сооружается хранилище, которое после заполнения отходами засыпается ранее извлеченной породой (глинами);
- ООИ сооружается в пласте коренного залегания глин с доступом в него, зависящим от положения пласта глин и форм рельефа: уклонами с поверхности земли или штреками в уступах выхода пласта.

Показано, что технико-экономические преимущества имеет вариант создания ООИ тоннельным способом в достаточно мощном (~100 м) пласте глин.

В соответствии с особенностями состава РАО разработаны главные требования к геотехнологическому комплексу ООИ, в основу которых положены базовые критерии МАГАТЭ [18].

Для замедления разрушения упаковок РАО и ограничения миграции радионуклидов во вмещающих породах должна быть ограничена циркуляция подземных вод (гидрогеологический критерий). Очевидно, что наиболее предпочтительным является размещение ООИ в низкопроницаемых глинистых породах с невысокими гидравлическими градиентами равнинного рельефа. Для графитовых РАО было показано, что уменьшение водопроницаемости на два порядка практически исключает конвективный механизм миграции и замедляет скорость выхода $^{36}Cl$ за пределы хранилища почти на порядок. Во вмещающей породе этот радионуклид будет распространяться путем диффузии. Расчеты показали, что 50-метровый слой коренных отложений глин в полной мере обеспечивает соответствие прогнозируемых доз установленной норме для населения [94].

Ограничение выхода радионуклидов из матриц и уменьшение их миграционной подвижности может быть достигнуто при восстановительных условиях среды ООИ (геохимический критерий). Восстановительная среда способствует осаждению актинидов, ограничивает подвижность в растворах $^{99}Tc$, стабилизирует присутствие в неорганической химической форме $^{14}C$. Щелочная среда создается в основном цементами бетонных конструкций и контейнеров ООИ.

Для Ra-образующих отходов основным требованием является ограничение или предотвращение выхода за пределы хранилища газообразного $^{222}Rn$. Для выполнения этого требования достаточно 30-сантиметрового слоя коренных залежей глин или 15-метрового слоя глин из отвалов. По сравнению с начальной активностью графитовых отходов активность Ra-содержащих РАО значительно ниже. Кроме того, в них присутствуют природные радионуклиды, геохимия которых и условия миграции детально изучены. Для ограничения миграции необходимы определенные условия среды: окислительно-восстановительный потенциал, присутствие комплексообразователей и пр.

Препятствуют миграции радионуклидов и высокие сорбционные свойства глин – основного природного барьеры подземной системы изоляции. Для всех типов РАО существенное сокращение поступления радионуклидов в окружающую

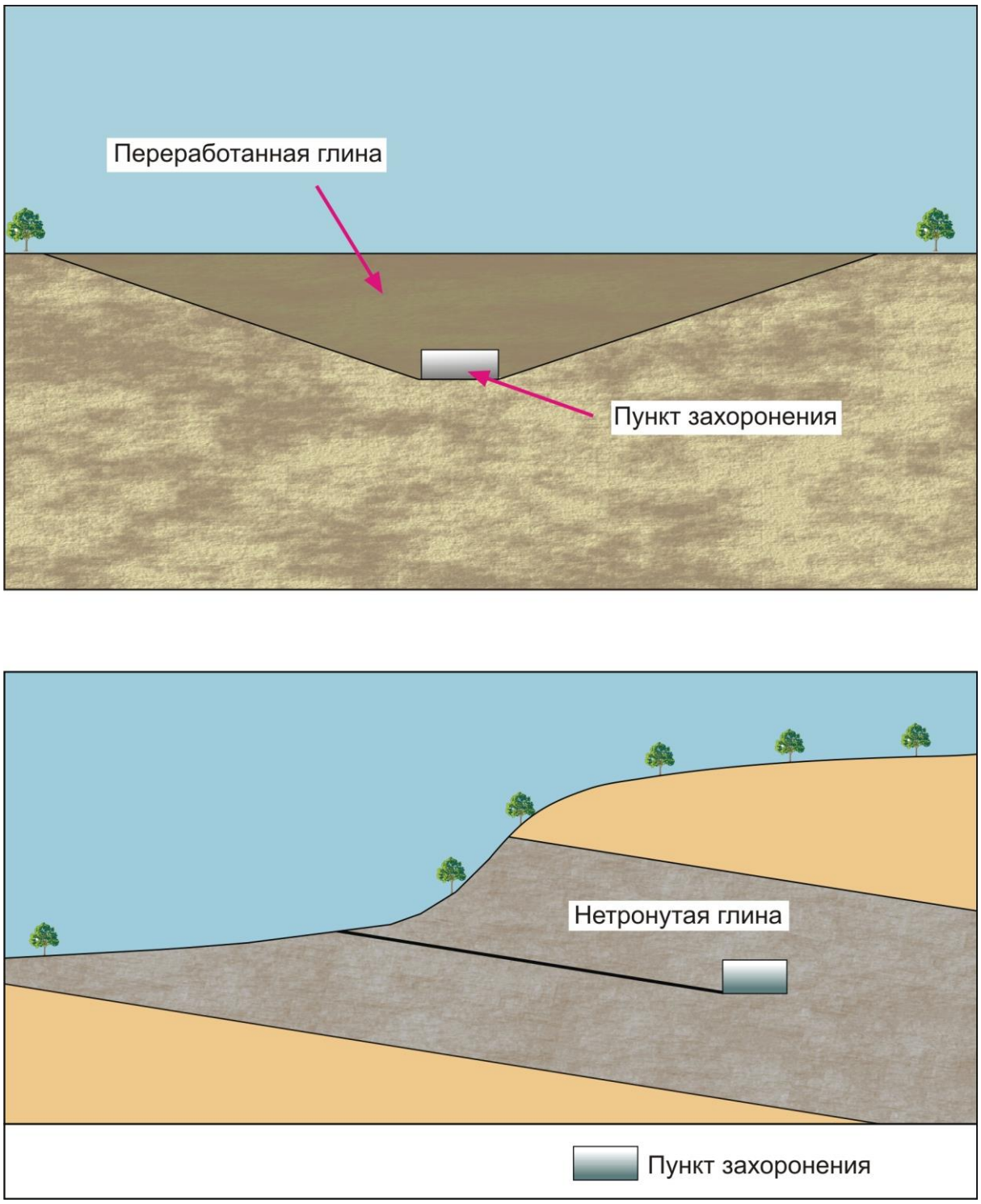



**Рис. 10.** Варианты строительства ООИ в выемке, перекрытой глинами из отвалов, и в коренных отложениях глин [94].

среду может быть достигнуто при условии близости величин времени задержки и периода полураспада радионуклида.

Отчет для окончательного выбора площадки предоставлен после согласия на сооружение ООИ местных властей. В содержание отчета входят:

- заключение по результатам проведенных геологических исследований;
- проекты общего экономического развития территории размещения ООИ;
- результаты общественного обсуждения проектов.

Предполагается на строительство хранилища затратить 200–300 млн евро. Эксплуатационные расходы составят 10–30 млн. евро в год в течение по крайней мере 20 лет [94].

### *4.3. Великобритания*

В 1988 г. после анализа районов с хорошо изученным геологическим строением английскими специалистами в качестве наиболее перспективной территории была предложена центральная часть Южной Англии между городами Оксфорд и Ньюбери. Здесь наиболее перспективными для строительства могильника являются глины и аргиллиты верхней юры на площадке Харуэлл [78].

Породы имеют морское происхождение. В юрское время произошла одна из крупнейших трансгрессий в Западной Европе. Обширное эпиконтинентальное море распространилось на большую часть Англии, Франции, Германии. Отложения этого времени представлены разнообразными толщами известняков, глин, глинистых сланцев и песчаников.

На площадке Харуэлл юрские отложения представлены мелкозернистыми глинистыми породами и расслоенными аргиллитами формации Oxford, залегающими на глубине 220–330 м. (рис. 11 [78]).

Минералогический состав глин – каолинит 30–70 %, слюды 70–30 %. Содержание воды 15,7 %, плотность в естественном состоянии 1,9–2,1 г/см$^3$, пористость 0,30, индекс пластичности 29 %.

Ниже формации Oxford по геологическому разрезу располагается водоносная толща среднеюрского возраста, выше – более молодые водоносные известняки Corallian.

Для условий предполагаемого хранилища проведены расчеты различных вариантов миграции радионуклидов в ближней и дальней зонах, показавшие приемлемость использования формации Oxford для подземной изоляции РАО.

В настоящее время координацию всей деятельности по обращению с РАО, включая обеспечение экологической безопасности временного хранения и окончательного удаления, осуществляет NDA (Nuclear Decommissioning Authority). По мнению NDA, наиболее приемлемым подходом к долговременному обращению с САО, ВАО и радиоактивными материалами (ОЯТ, уран, плутоний) является их удаление в хранилища глубокого заложения. Подземной изоляции подлежат около 477 860 м$^3$ РАО с радиоактивностью около $80 \cdot 10^{18}$ Бк [95].

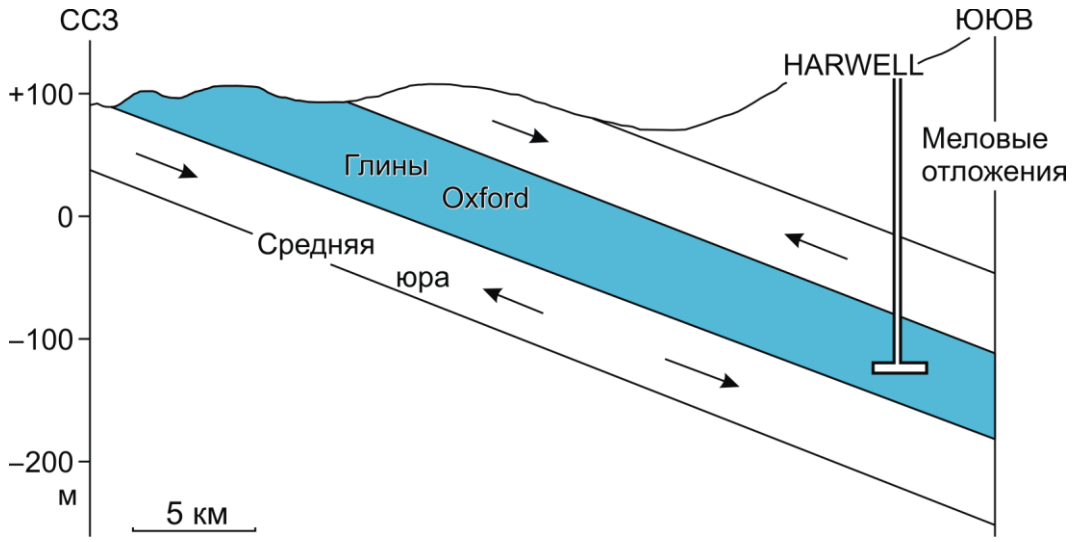



**Рис. 11.** Схема геологического положения глин Oxford на площадке Харуэлл [78]. Стрелками показано направление движения вод водоносных горизонтов.

Руководство программой по разработке хранилища глубокого заложения для высокоактивных и долгоживущих отходов осуществляет Директорат по обращению с РАО (Radioactive Waste Management Directorate – RWMD) как дочерняя структура NDA. Основная деятельность RWMD направлена на поиск, выбор и лицензирование площадки для строительства подземного хранилища.

### *4.4. Швейцария*

Для проведения исследований выбраны сланцеватые глины Юрских Гор вблизи Монт Терри, кантон Юра на севере страны. Название формации “Opalinus Clay” связано с отпечатками аммонита Leioceras opalinum, присутствующих в твердых, темно-серых иллит-каолинит-хлоритовых глинах, содержащих песчаные прослои и карбонатные конкреции. Помещения подземной лаборатории расположены в дорожном туннеле на глубине 300 м.

Возраст пород – средняя юра (доггер или ааленский ярус, т.е. 180–190 млн. лет). Средний минералогический состав и некоторые гидромеханические свойства Opalinus clay приведены в табл. 17.

Таблица 17.

Минералогический состав и некоторые гидро-механические свойства глин [81]

| **Минералогический состав, мас %** | Opalinus clay |
|---|---|
| Глинистые минералы | 40–80 |
| иллит | 18–36 |
| смектит | – |
| хлорит | 6–12 |
| каолинит | 10–20 |
| иллит/смектит | 6–12 |
| хлорит/смектит | – |
| Кварц | 18 |
| Полевые шпаты | 1 |
| Карбонаты | 5–20 |
| Пирит | 1 |
| Органический углерод | 0,7 |
| **Гидромеханические свойства** | |
| Общая пористость, % | 3–12 |
| Водопроницаемость, м/сут | $<10^{-6}$ |
| Модуль Юнга, МПа | 2 000–3 000 |

Гидравлические испытания в глубоких скважинах и детальное гидрогеологическое картирование 6 400 м туннельных выработок показали крайне низкую водопроницаемость Opalinus clay. При этом в процессе исследований в пласте глин были отмечены трещины и смещения породы.

Поровые воды глин хлор-натриевого типа с общей минерализацией ~20 г/дм$^3$ имеют pH 7,7.

Район Монт Терри расположен на южной оконечности крыла антиклинальной структуры, с падением на юг под углом от 30 до 50°. Породы Opalinus clay залегают на глубинах более 300 м и имеют мощность 150 м.

В специальных выработках ПИЛ проводятся исследования условий изоляции крупногабаритных канистр РАО, испытания инженерных бентонитовых барьеров, изучение влияния влажности [77]. В осевую часть сферического туннеля (диаметр ~2,5 м, длина 6 м) помещают макет крупной канистры диаметром 0,9 м. Пространство между канистрой и стенками туннеля заполняют компонентами инженерных барьеров (бентонитовыми блоками, материалами засыпки) и датчиками приборов системы наблюдения. Различные измерения состояния среды проводятся и в приконтурной зоне глин.

Серия испытаний проведена в скважине, вокруг которой через два года после закачки изучалось распределение введенных трассеров. Опыты подтверждают преобладание диффузионного механизма в миграционных процессах, происходящих в глинистых породах [81].

### *4.5. Италия*

В 80-х годах в Италии по программе Комиссии европейских сообществ (СЕС) проведены комплексные исследования глинистых пород по тематике «Природные аналоги» [96]. Перспективными формациями для изоляции РАО являются плиоценовые (5,2–1,6 млн. лет) глины, широко распространенные по всей территории страны.

Важным фактором, определяющим барьерные свойства глин, является окислительно-восстановительный потенциал среды этих пород. Известно, что в восстановительных условиях многие радионуклиды, например актиноиды, существуют в малорастворимых и, следовательно, неспособных к миграции химических формах.

Отрицательный окислительно-восстановительный потенциал возникает в начале диагенеза глинистых осадков. Восстановительные условия среды подтверждаются присутствием пирита ($FeS_2$), образованного при бактериальном восстановлении железа. Последнее подтверждается находками сульфат-восстанавливающих бактерий в морских осадках и в плейстоценовых глинах. Изменить восстановительные условия на окислительные может внедрение в глинистые породы кислорода или вод, содержащих кислород. Однако вероятность такого явления уменьшает крайне низкая проницаемость глин.

Сделанное заключение подтверждается геохимическими исследованиями глин в приповерхностных зонах выветривания. Проводились сравнения содержания следовых элементов (U, Th, V) в пласте глин и в маломощных перекрывающих прослоях, между окисленными песками. Различия концентраций не обнаружено.

Восстановительные условия обеспечиваются присутствием в приповерхностных частях глинистых пород органических веществ, преимущественно корней деревьев. Бактериальное окисление органики приводит к восстановительным условиям среды.

Нарушение непроницаемости глин может произойти в случае образования в них трещин и разломов, с последующей миграцией по этим каналам водных растворов, содержащих радионуклиды. Изучение процессов дестабилизации геологической среды и связанных с ними процессов наиболее достоверно можно проводить при помощи природных индикаторов непосредственно в местах залегания глинистых пород.

Один из методов оценки проницаемости глин использует природные трассеры – газы и флюиды, проявляющиеся в районах развития геотермальной деятельности. Для исследований была выбрана геотермальная область в Центральной Италии вблизи г. Амиат, в которой в крупной впадине глинистые отложения пересекают несколько крупных разломов. Через разломы происходит выход термальных вод (20–52°С) с образованием травертина. Кроме того, существуют выходы термальных флюидов (150–250°С) под давлением 40–60 атм, содержащих ртуть. Детальной разведкой были получены данные по нахождению и распределению гидротермальных и геотермальных продуктов, которые позволили сделать следующие выводы:

- выходы газов и термальных вод происходят по границам между залежами глин и блоками приподнятых карбонатных пород, расположенных на периферии изучаемой впадины;
- основные залежи травертина распространены также вдоль границ впадины;
- геотермальные флюиды проникают в основном в глинистые известняки и не проникают в плиоценовые глины;

- многочисленные отложения ртути обнаружены только в граничных частях горстовой структуры;
- в центральной части горстовой впадины, перекрытой плиоценовыми глинами, вторичные гидротермальные и геотермальные отложения не обнаружены.

Полученные данные показали непроницаемость глинистых залежей, препятствующих подъему глубинных флюидов, которые могут достигать поверхности, только мигрируя вдоль глубоких разломов, ограничивающих впадину. На периферийных участках пласт глин маломощный, разбавлен большим количеством песчаных прослоев, являющихся также проницаемыми для вод и флюидов.

Хорошо известным методом выявления проницаемых и разрывных структур является гелиевая съемка. Непроницаемые пласты горных пород препятствуют глубинному потоку гелия, а в местах, насыщенных разломами, содержание гелия в подпочвенных газах выше, чем в атмосфере. Проведенные в Италии исследования показали, что практически нулевая проницаемость глинистых отложений препятствует выходу гелия на поверхность, создавая зоны повышенного давления под пластами плиоценовых глин при малых концентрациях гелия в почвах над глинами. Для местных условий гелиевая съемка является эффективным методом определения непроницаемых зон.

Исследование нарушений проницаемости глин в связи с образованием в них разломов и трещин проводилось на поверхностных обнажениях и в подземных туннелях. Целый ряд тоннелей был проложен в глинах при строительстве железной дороги Рим–Флоренция. Один из туннелей длиной 7,5 км проходит в аргиллитовых отложениях на глубине 160 м. В нём наблюдались вывалы пород по разломам, которые идентифицировались по характеру гладкой поверхности разрывных нарушений. Однако просачивания вод из вышележащего водоносного горизонта по трещинам не наблюдалось.

На поверхностных обнажениях были выявлены различные явления, связанные с проникновением подземных вод по разломам и трещинам в глинах. Через глины серии Orte (область Лацио) проходит серия разломов, на поверхности которых отсутствуют следы окисления, что следует связывать с залечиванием разрывных нарушений. Однако целый ряд трещин имеют окисленные поверхности с толщиной окисленного слоя до 1 см. Такое явление итальянские специалисты связывают с прекращением тектонического подъема поверхности. Исчезновение вследствие эрозионного сноса боковых и покровных масс пород приводит к ослаблению сжатия глин, которые расширяются в объеме без параллельного увеличения массы. Это приводит к переходу закрытых трещин в открытые со всеми последствиями увеличения проницаемости пласта глинистых пород. Следует отметить, что такие изменения характерны лишь для верхних частей глинистых формаций в случае их тектонического подъема и эрозии. В целом, по результатам полевых наблюдений глинистые залежи остаются непроницаемыми даже в условиях тектонических напряжений.

Уникальные исследования проведены по изучению влияния на глины термометаморфизма. В качестве объекта был выбран участок плиоценовых глин на контакте с внедрившимися около 4-х млн лет назад вулканогенными трахитами (область Тоскана). Максимальная температура магматического тела оценивается в ~800°C. В результате термометаморфизма в глинах произошло образование новых минеральных ассоциаций высокотемпературных минералов (пироксен, Na-Ca пла-

гиоклаз, биотит, К-полевой шпат и др.). Несмотря на существенные изменения в зоне контакта, уже на расстоянии в несколько метров глины сохраняют свои первоначальные свойства, в том числе и низкую проницаемость.

Убедительным примером изолирующих возможностей глинистых пород являются находки в озерных плиоцен-плейстоценвых глинах (~1,5 млн. лет) стволов деревьев, сохранивших свое первоначальное вертикальное положение.

Нарушение физических и геохимических барьеров глинистых пород может произойти при исключительно неблагоприятных процессах, охватывающих геологическое окружение подземных хранилищ. Наиболее существенным негативным фактором является тектоническое поднятие региона с приближением хранилища РАО к зоне выветривания (рис. 9) [96].

В 90-х годах для оценки перспективности площадок для размещения хранилищ низкоактивных отходов была использована методология Географической информационной системы (ГИС) [77]. Работы проводились последовательно в три этапа:

- начальная оценка территории в масштабе 1:500 000, по которой только её 9 % могли быть использованы для строительства хранилища;
- на следующем этапе выделенные районы изучались с детальностью масштаба 1:200 000 – 1:100 000;
- на третьем этапе ГИС анализа проводились исследования 300 перспективных площадок.

Исключались из рассмотрения площадки, на которых:

- преобладали трещиноватые или водонасыщенные породы;
- присутствовали склоны с углами более 5°;
- абсолютные отметки высот с величинами менее 20 и более 600 м над уровнем моря;
- расположены заповедники;
- имеются залесенные или болотистые участки;
- общая площадь менее 3 км$^2$.

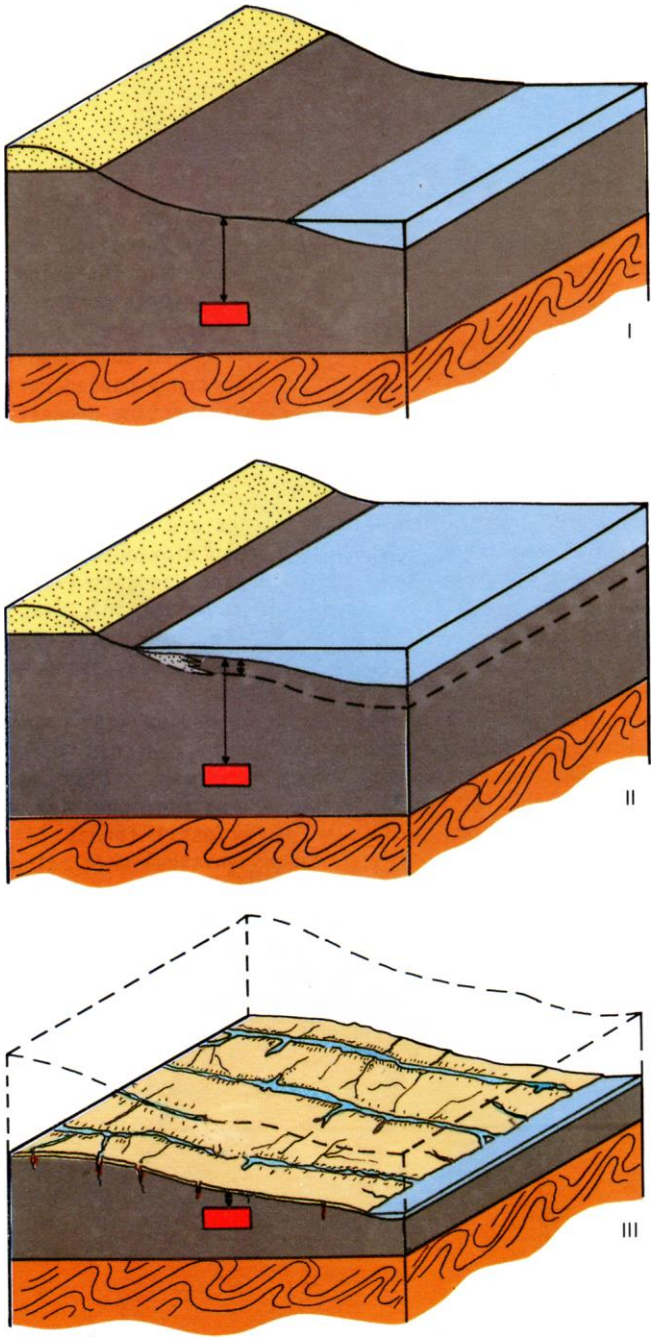



**Рис. 12.** Три варианта геологического развития участка расположения подземного могильника в глинах: I – стабильные условия; II – опускание участка с перекрытием могильника дополнительными осадочными породами; III – воздымание участка с выходом могильника в зону эрозии [96].

### *4.6. Германия*

В 2007 г. специалисты Федерального ведомства по геонаукам и природным ресурсам - BGR (Bundesanstalt fur Geowissenschaften und Rohstoffe) собрали и проанализировали геологические данные по распространению глинистых пород на территории Германии и, руководствуясь существующими и разработанными критериями, выделили наиболее перспективные формации и регионы [97]. В основу оценок были положены общепринятые фундаментальные требования к геологической среде, в которой предполагается разместить РАО [МАГАТЭ, "Nagra" (Швейцария), "ANDRA" (Франция)].

Первоочередные требования и критерии:

- длительная геологическая стабильность;
- благоприятные свойства вмещающих пород;
- достаточная протяженность тела вмещающих пород;
- устойчивость к неблагоприятным явлениям и осложнениям;
- разведанность (изученность);
- предсказуемость (прогнозируемость).

Исключающие критерии:

- региональные вертикальные движения;
- зоны активной складчатости;
- сейсмическая активность;
- вулканическая активность;
- существующий обмен глубинных и поверхностных вод.

Минимальные требования для участков удаления РАО:

- породы в зоне изоляции РАО должны иметь низкую гидравлическую проводимость, менее $0{,}8 \cdot 10^{-5}$м/сут;
- мощность пласта изолирующей зоны не менее 100 м;
- диапазон глубин для удаления РАО от 300 до 1 500 м;
- зона изоляции должна иметь размеры, позволяющие осуществить удаление РАО (~3 км$^2$ для каменной соли и 10 км$^2$ для глин и гранитов);

На территории Германии наиболее перспективны для окончательной изоляции РАО глинистые формации различного возраста:

- нижней юры (~ 200-180 млн. лет) на севере страны (рис. 13);
- средней юры (~ 180-160 млн. лет) на севере и юге страны;
- нижний мел (~ 100-140 млн. лет) на севере страны.

Учитывая специфику геологических условий Германии, при выборе участков введены дополнительные требования:

- хранилище должно быть расположено не глубже 1 000 м (геотемпературные и геомеханические ограничения);
- глины с пластическими свойствами не являются объектами исследований;
- дополнительные региональные ограничения;
- необходимо иметь данные о том, что за прошлый миллион лет на перспективном участке не произошло каких-либо изменений, негативно сказавшихся на изолирующих свойствах вмещающей геологической среды.

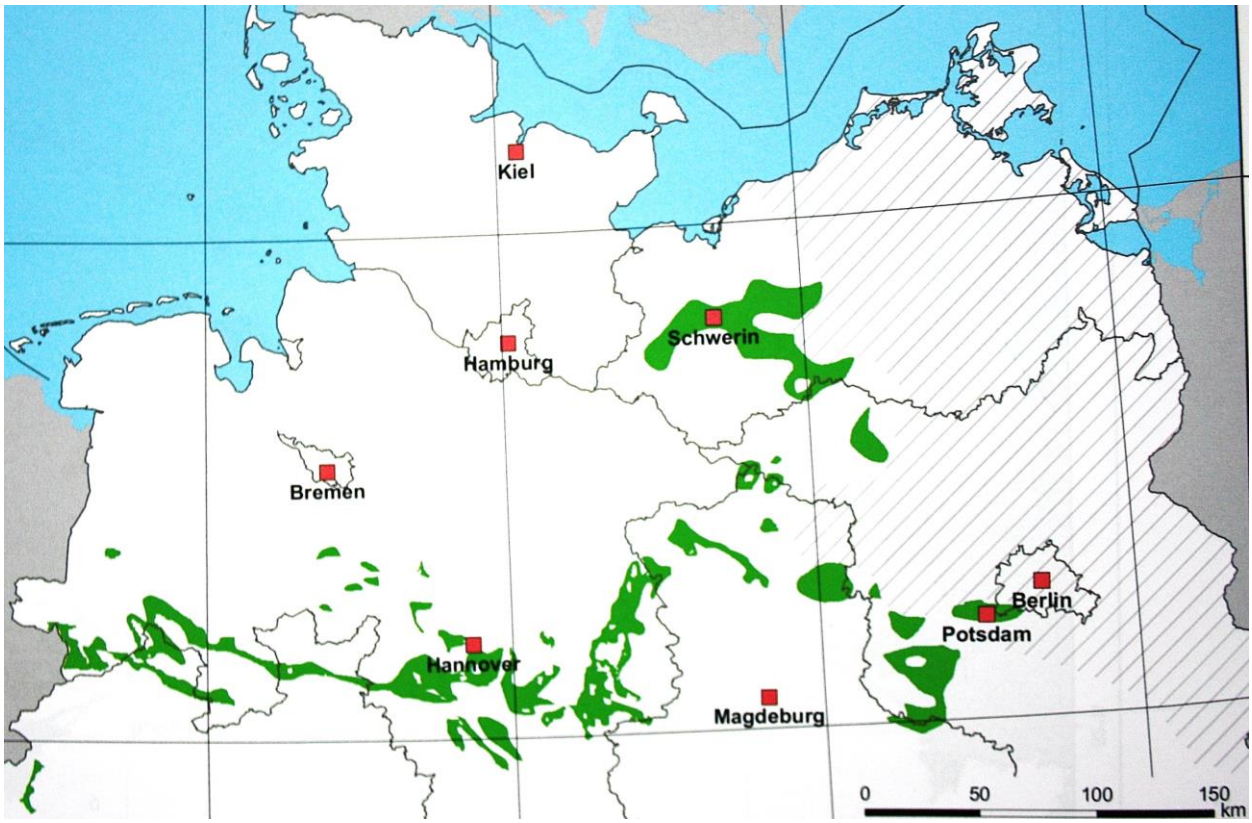



**Рис. 13.** Наиболее перспективные глинистые формации нижнеюрского возраста (выделены зеленым цветом). Косой штриховкой выделена территория, на которой в отложениях нижней юры преобладают песчаные фации (по данным работы [97]).

В южной части страны возможно использование “Opalinus Clay” – «опалиновых» глин средней юры (доггер), изученных в соседней Швейцарии (см. п. 4.4.). На юге Германии юрские отложения погружаются на глубину 1400–1800 м под более молодые осадочные породы (молассы) третичного возраста.

Исследования глинистых формаций [97] не ставили своей целью выбор определенных площадок для подземной изоляции РАО в Германии.

## 5. Перспективы использования глинистых формаций в Российской Федерации

Основной причиной сложной и постоянно ухудшающейся радиоэкологической обстановки на территории Российской Федерации является отсутствие региональных пунктов окончательной изоляции радиоактивных отходов. Отсутствует недостающий элемент системы обращения с РАО, без которого ядерная энергетика страны не может считаться безопасной [98, 99].

В настоящее время условия размещения, состав и формы изоляции РАО разнообразны и многочисленны (табл. 18) [100]. Существуют отходы, образовавшиеся после выполнения военных программ («ядерное наследие»); на территориях АЭС хранятся и постоянно поступают эксплуатационные РАО; в РФ функционируют 16 специализированных зональных комбинатов, на площадках которых осуществляется долговременное хранение отходов; в прибрежных районах страны расположены временные площадки хранения РАО и ОЯТ ядерных энергетических установок ВМФ.

Таблица 18

Типизация хранилищ РАО (по данным работы [100])

| Объект хранения РАО | Тип хранилища | Класс объекта |
|---|---|---|
| Хранилище РАО | Поверхностное | Помещение<br>Здание<br>Реакторный комплекс<br>Емкость (наземная и частично заглубленная)<br>Площадка<br>Отвал/хвостохранилище |
| | Заглубленное | Емкость (заглубленная)<br>Естественные или искусственные водоемы без инженерной изоляции<br>Траншея облицованная<br>Траншея необлицованная (или овраг) |
| | На плаву | На судне<br>Реакторный отсек |
| Объект окончательной изоляции РАО | Выше уровня грунтовых вод | Курган<br>Отвал/хвостохранилище<br>Котлован<br>Траншея<br>Бункер |
| | Ниже уровня грунтовых вод | Скважина |
| | Подземный (глубокого заложения) | Скважины и колодцы<br>Шахтный<br>Штольневый<br>ЖРО в пласте<br>Подземный ядерный взрыв |

Условия хранения значительной части накопленных РАО не соответствуют современным требованиям [101]. Объекты размещения отходов «ядерного наследия» и временного хранения не соответствуют геологическим критериям выбора площадок. Однако именно свойства вмещающей геологической среды определяют возможность модернизации существующих поверхностных хранилищ, в первую очередь сооружения «локальных» могильников для «неизвлекаемых» РАО.

Окончательная изоляция (захоронение) в геологических формациях является до настоящего времени безальтернативным, научно обоснованным вариантом решения проблемы радиоактивных отходов. Это подтверждается комплексными исследованиями и имеющейся практикой зарубежных стран с развитой атомной энергетикой.

В Российской Федерации, вследствие ряда причин, в том числе существующей практики длительного хранения РАО в поверхностных условиях, сложилась противоречивая ситуация. Территория страны позволяет выбрать перспективные формации и горные породы, чему способствует достаточно высокая степень геологической изученности её регионов и наличие крупных научно-исследовательских центров, специалисты которых способны решить геологические проблемы подземной изоляции РАО. Однако при таких благоприятных возможностях в РФ до настоящего времени отсутствуют подземные хранилища РАО и подземные исследовательские лаборатории. Следует признать неудовлетворительным развитие и обеспечение геологической деятельности программ и проектов по изоляции РАО и улучшению радиоэкологической обстановки в регионах.

Начиная с 70-х годов прошлого столетия Министерством атомной промышленности, Российской Академией Наук, Министерством науки, высшей школы и технической политики России проводятся исследования по оценкам изолирующих свойств геологических формаций и выбору площадок для строительства хранилищ в различных горных породах: каменной соли, гранитоидах, глинах [19, 21–24, 102, 103).

По результатам отечественных и зарубежных исследований выделены несколько направлений использования глинистых формаций.

**1)** Подземная изоляция РАО в ПЗРО, размещенных в мощных пластах (80-100 м) однородных глин морского генезиса. На территории РФ к таким формациям относятся верхневендские и нижнекембрийские глины северной оконечности Восточной платформы и олигоцен-миоценовые пласты глин её южной части. Перспективным регионом является Западно-Сибирская плита, в составе чехла которой присутствуют глинистые породы. Наиболее детально в настоящее время исследованы глинистые формации и отдельные площадки Ленинградской области. По результатам их изучения имеется большое число публикаций, позволяющих дать подробную информацию. В значительно меньшей степени исследованы глины других упомянутых регионов.

**2)** Строительство приповерхностных ПЗРО в глинах различного генезиса, изолирующие свойства которых обеспечивают надежную изоляцию подземных вод от проникновения хранящихся радионуклидов. Этот вариант должен быть ориентирован на известные месторождения глин различных регионов РФ. Начальная стадия выбора приповерхностных площадок выполняет требования геологических крите-

риев, но в дальнейшем безопасность изоляции РАО в значительной степени зависит от надёжности инженерно-строительных конструкций и инженерных барьеров.

**3)** Использование глин для инженерных барьеров в подземных и надземных ПЗРО, а также для усиления защитных свойств временных ПЗРО, не подлежащих перемещению. С этой целью наиболее эффективными являются глины монтмориллонитового состава – бентониты. Значение геологического фактора заключается в наличие месторождений такого типа глин, желательно вблизи площадок, выбранных для строительства ПЗРО.

## *5.1. Глинистые формации, перспективные для подземной изоляции РАО*

### *5.1.1. Коренные отложения глин Ленинградской области*

*5.1.1.1. История геологического развития, геологическое строение перспективного участка*

Участки для строительства ПЗРО в коренных отложениях глин Ленинградской области (Ломоносовский район) расположены на северо-западном окончании крупной континентальной структуры – Русской платформы (плиты) (рис. 14) [15].

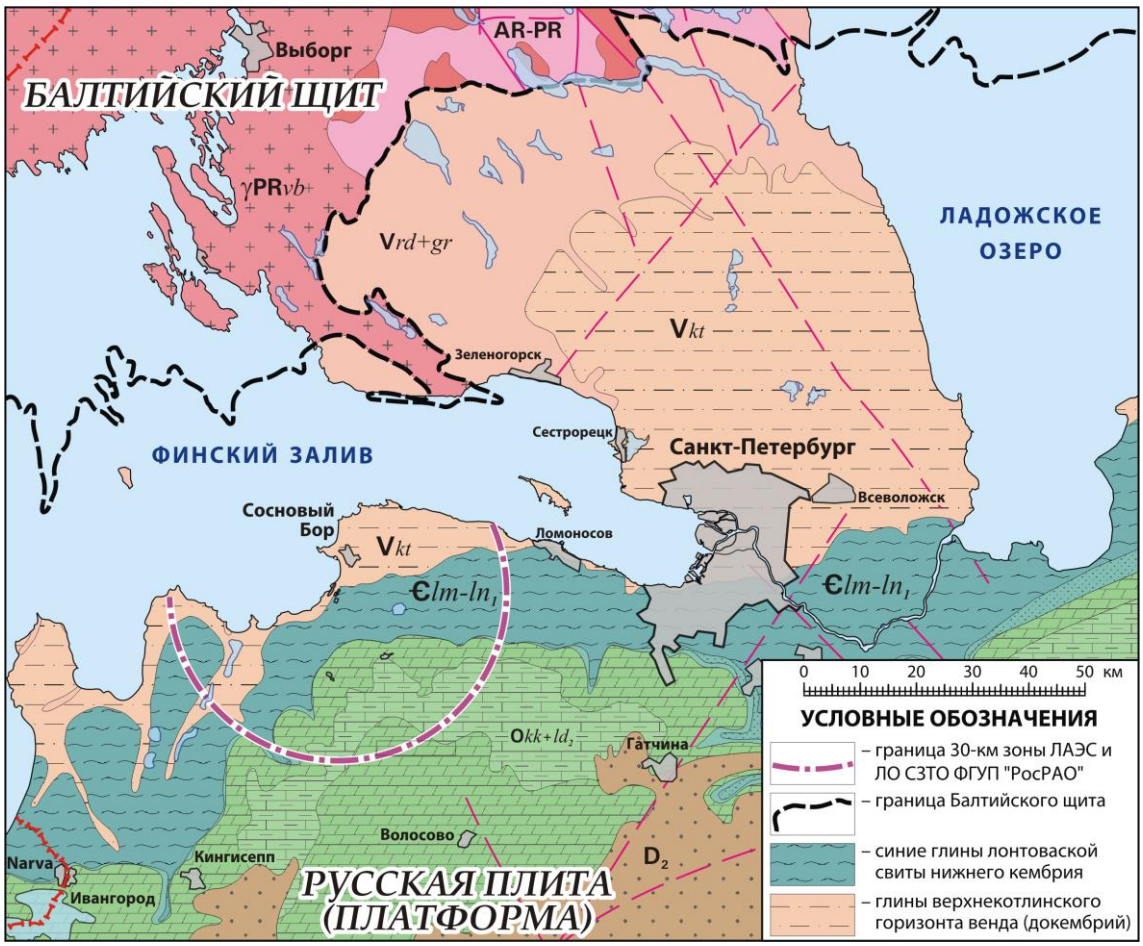



**Рис. 14**. Зона сочленения Балтийского щита и Русской плиты на северо-западе Ленинградской области по данным работы [15].

В платформах выделяют два основных структурных этажа. Нижний этаж (фундамент) состоит из древних метаморфизованных и деформированных осадочно-

вулканических и магматических пород. Верхний (платформенный чехол) сложен осадочными пологозалегающими породами, в которых дислокационные нарушения связаны обычно с подвижками по разломам блоков фундамента.

Русская платформа (плита) является самостоятельной структурно-тектонической частью Восточно-Европейской платформы. Северо-западная граница – зона её сочленения с Балтийским кристаллическим щитом.

Зона крупной дугой протягивается с северо-востока от Мезенской губы Белого моря на юго-запад до Финского залива. От рифея до мезозоя в пределах зоны проис ходили активные тектонические и магматические процессы. В узлах сопряжения Балтийско-Мезенской зоны с поперечно-радиальными тектоническими структурами формировались участки рудной минерализации, в том числе алмазоносные кимберлитовые поля [104].

Геодинамические условия зоны сочленения определяются сменой поднятия кристаллических формаций Фенно-Скандии на прогибание пород Восточно-Европейской низменности (флексура Полканова). При этом на геодинамику конкретных геологических структур оказывают обоюдное влияние тектонические процессы двух крупных литосферных мегаблоков – Балтийского кристаллического щита и Русской платформы. Для оценки геодинамического состояния региона в целом принимается модель субдукции (поддвигания) плиты раскрывающегося Палеоатлантического океана и пород мантии под край другой плиты (палеоконтинента). При этом активизировались древние зоны северо-западного простирания, что привело к формированию ортогональной системы тектонически ослабленных зон, разделяющих крупные жесткие блоки кристаллических пород.

В архейское время породы кристаллического щита представляли протоконтинентальную кору с «куполами» и «полями» метаморфогенных меланократовых плагиогранит-чарнокитов в обрамлении поясов мигматит-гранитов. Сформировалась «нуклеарная», купольно-поясная структура, характерная для древнейшего этапа развития земной коры [105].

В зоне сочленения двух сформировавшихся стабильных структур – Новгородского массива и Ладожского блока (территория Ленинградской области) купола представлены мигматизированными гнейсами и массивами плагиогранитов.

В позднем архее растяжение сформировавшихся структур сменилось сжатием, в результате чего образовались породы гнейсово-сланцевого комплекса.

На раннепротерозойском этапе происходит структурно-тектоническое развитие склонов кристаллического щита и прилегающих к нему районов платформы. Остаются стабильными Новгородский массив и Ладожский блок. Образовавшиеся коллизионные нарушения заполняются и «свариваются» гранитами рапакиви, завершая тем самым раннепротерозойский этап построения континентальной коры.

За всё протерозойское время происходило последовательное формирование, по крайней мере, трёх групп гранитоидов в возрастных интервалах 2400–1900, 1800–1500 и 1300–900 млн. лет. В дальнейшем территория Балтийского щита и его обрамления вступает в платформенный период развития.

В позднепротерозойское время (конец рифея) происходит кратковременный подъем территории и её пенепленизация. В связи с этим верхняя часть разреза кристаллического фундамента представлена обычно дресвяно-песчано-галечными породами коры выветривания.

В западной и центральной части Ленинградской области кристаллический фундамент разделен разрывными нарушениями на отдельные блоки, различающие-

ся по вещественному составу, интегральным плотностным характеристикам и внутренней структуре (рис. 15) [106].

Ленинградский блок сложен биотитовыми гнейсами с линзами метабазитов с четко выраженной северо-восточной структурной ориентировкой. Крупным элементом в границах блока является региональный разлом северо-западного простирания Вещево–Санкт-Петербург–Чудово. На одном из пересечений этого разлома с оперяющими разрывными нарушениями находится аварийный участок метрополитена – площадь Мужества.

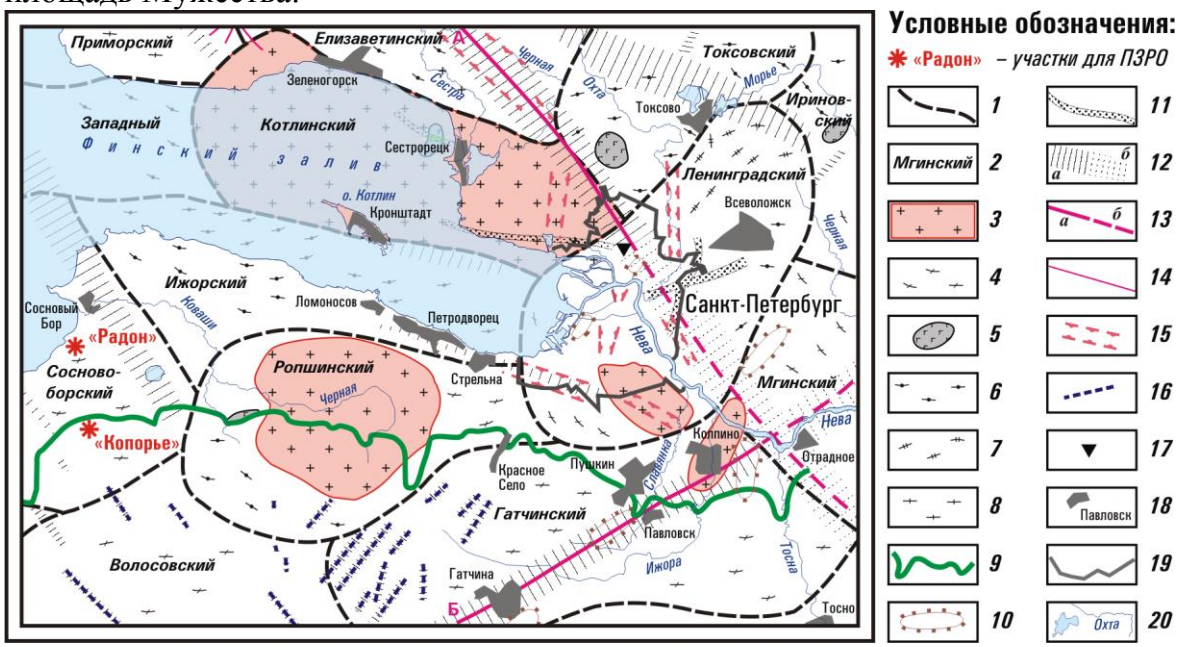



**Рис. 15.** Блоковое строение кристаллического фундамента в западной части Ленинградской области по данным работы [106] с дополнениями.

***1***– границы блоков (геодинамических систем); ***2***– наименование блоков; ***3***– граниты плагиомикроклиновые; ***4***– гранитогнейсы, граниты порфировидные; ***5***– диориты, метагаббродиты; ***6***– гнейсы биотито-амфиболовые; ***7***– гнейсы биотитовые с гранатом и кордиеритом; ***8***– гнейсы биотитовые; ***9***– ордовикский глинт; ***10***– локальные поднятия; ***11***– древние долины.

Активизированные разрывные нарушения кристаллического фундамента: ***12***– области динамического влияния разломов (*а*– достоверные, *б*– предполагаемые); ***13***– региональные разломы (*а*– достоверные, *б*– предполагаемые); А– разлом Вещево-Чудово; Б– разлом Гатчина-Колпино; ***14***– локальные разломы, установленные по геологическим данным; ***15***– контрастные линейные структуры в рельефе фундамента; ***16***– линейные трещинные зоны в породах ордовика; ***17***– участок трассы метрополитена с осложненными горно-геологическими условиями; ***18***– крупные населенные пункты; ***19***– границы городской застройки г.Санкт-Петербург; ***20*** – реки и прочие водоемы.

Западнее Ленинградского блока расположен Ижорский блок – геодинамическая система на гранито-гнейсовом фундаменте, занимающая территорию южного побережья и южной водной полосы Финского залива. Далее на запад находится Сосновоборский блок, отделенный от Ижорского разломом северо-западной ориентации. Область динамического влияния этого разлома распространена преимущественно в сторону Сосновоборского блока. Южнее Ижорского блока расположен Ропшинский, далее на юг – Волосовский. Большинство блоков имеет свою, характерную только для него сеть тектонических нарушений, в том числе и активированных. Во время тектонической активизации каждый блок реагирует в соответствии со своей внутренней структурой и использует для разрядки напряжений наиболее близкую по направлению систему разломов [106]. Ядра сравнительно од-

нородных блоков сохраняют свою стабильность, а наиболее вероятные подвижки происходят по границам блоков и по крупным региональным разломам.

В конце протерозоя – начале палеозоя структурные напряжения пород Балтийского щита проявились в структурах вращения крупных блоков и в крупных разрывных нарушениях. В пермско-триасовое время вращение ядер блоков усилилось. Движения распространились на северную часть Русской плиты, активизировались рифтогенные системы и малоамплитудные пликативные структуры осадочного чехла [105].

Первая обширная трансгрессия в регионе началась в вендское время (650–570 млн. лет), когда к юго-востоку от Балтийского щита началось опускание обширной части Восточно-Европейской платформы, продолжавшееся с короткими перерывами до конца раннего ордовика (~480 млн. лет). Начиная с венда формируется в качестве самостоятельной структурно-тектонической единицы платформы её восточная часть – Русская платформа (плита). Породы образующегося осадочного чехла залегают на кристаллическом фундаменте с пологим погружением на юго-восток. Осадки представлены породами венда, кембрия, ордовика, девона и карбона, мощность которых нарастает по падению поверхности фундамента под углами 9-12° и у юго-восточной границы Ленинградской области достигает 600–700 м (рис. 16).

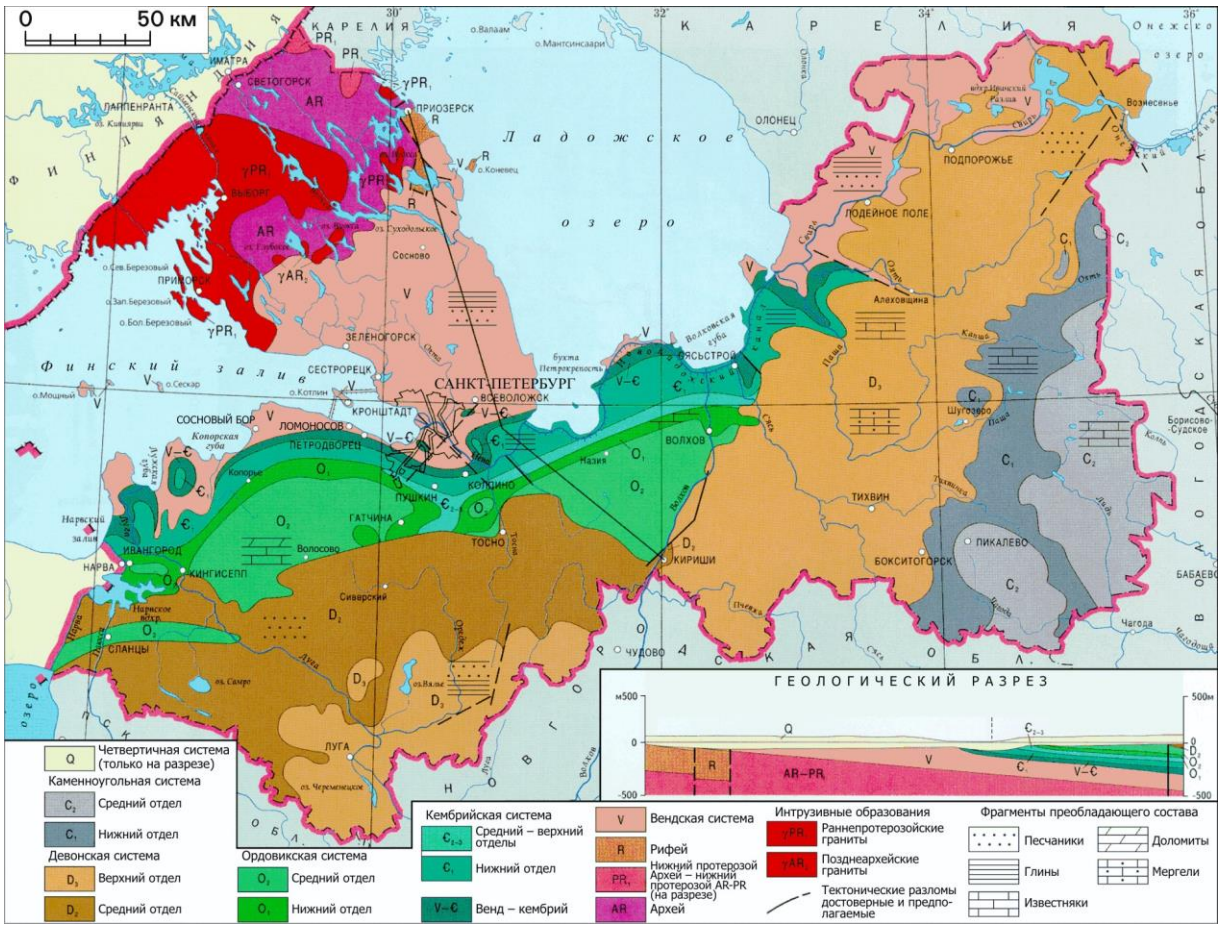



**Рис. 16**. Геологическое строение северо-западного окончания Русской платформы на территории Ленинградской области [107].

К отложениям вендского времени относятся:
- глины со слоями аркозовых песчаников гдовского горизонта;
- «ляминаритовые» слоистые глины с прослоями алевролитов и песчаников верхнекотлинского горизонта.

Вендские отложения являются нижней частью осадочного чехла, залегая непосредственно на архейско-протерозойских породах кристаллического фундамента. Началом морской трансгрессии соответствуют гдовские глины с прослоями аркозовых песчаников. Над гдовскими слоями залегают однородные серые и зеленовато-серые плотные алевролитовые глины с тонкой ритмичной слоистостью типа ленточной [107]. Глины в основном гидрослюдистые с прослойками и включениями бурого сидерита. На плоскостях напластования встречаются пиритовые и сапропелевые («ляминаритовые») пленки.

Осадки крупного вендского бассейна Восточно-Европейской платформы имеют широкое распространение в её северной части на территории Архангельской области. Возрастным и генетическим аналогом верхнекотлинских глин являются породы мезенской свиты, залегающие на восточном побережье Двинской губы Белого моря.

На рассматриваемой территории Ленинградской области глубина залегания верхнекотлинских глин варьирует от 5 до 120 м и определяется формами подземного рельефа кристаллического фундамента – положением погребенных долин, амплитудами дифференциального движения отдельных тектонических блоков и пр. В этих условиях мощность самих глинистых отложений может изменяться от 12 до 120 м.

Положение верхнекотлинских глин на участке предполагаемого строительства ПЗРО «ЛСК «Радон» (прибрежный участок предглинтовой низменности, скв. № 15 Гидрогеологической экспедиции № 25 Второго гидрогеологического управления Министерства геологии СССР):

| Глубина от – до, м | Мощность слоя, м | Характеристика пород |
|---|---|---|
| 0.0–2.0 | 2.0 | Q – суглинок с линзами песка |
| 2.0–17.0 | 15.0 | Є$_1$ lm - глины с прослоями песчаников |
| 17.0–95.0 | 78.0 | V kt – глина зеленовато-серая, тонкослоистая, неравномернослоистая, гидрослюдистая с тонкими прослоями алевролитов и сидеритов. На плоскостях глинистости обогащена ляминаритом. Среди глин встречаются редкие маломощные прослои песчаников (до 0,6 м), светло-серых мелкозернистых, кварцево-полевошпатовых |
| 95.0–123.0 | 28.0 | V gd – переслаивание алевролитов, песчаников и глин |
| 123.0–133.5 | 10.5 | V gd – глины с редкими прослоями алевролитов |
| 133.5–138.5 | 5.0 | V gd – песчаники и алевролиты (водоносный гдовский горизонт) |
| 138.5–144.0 | 5.5 | Vgd – глины плотные с вертикальной трещиноватостью |
| 144.0–157.0 | 13.0 | Vgd – переслаивание песчаников с алевролитами и глинами (стрельнинский водоносный горизонт) |

| | | |
|---|---|---|
| 157.0–158.5 | 1.5 | Vgd – песчаники грубозернистые до гравелитов |
| 158.5–164.0 | 5.5 | AR-$PR_1$ – дресвяно-песчано-галечные породы коры выветривания, легко разрушающиеся |
| 164.0–178.7 | 14.7 | AR-$PR_1$ – гранодиорит крупнозернистый порфировидный с прожилками гематита. В верхней части (до 1.5 м) сильновыветрелый, трещиноватый |

Сокращения:
Q – четвертичные отложения;
$Є_1$ lm – ломоносовский горизонт нижнего кембрия;
V kt –котлинский горизонт венда;
V gd – гдовский горизонт венда;
AR-$PR_1$ – породы архея и нижнего протерозоя.

Морская трансгрессия продолжалась в кембрии и сопровождалась накоплением песчано-глинистых осадков. Осадки вендского времени с несогласием перекрыты песками и глинистыми песчаниками ломоносовского горизонта. К нижнекембрийским песчаным породам мощностью 20-40 м приурочен ломоносовский водоносный горизонт.

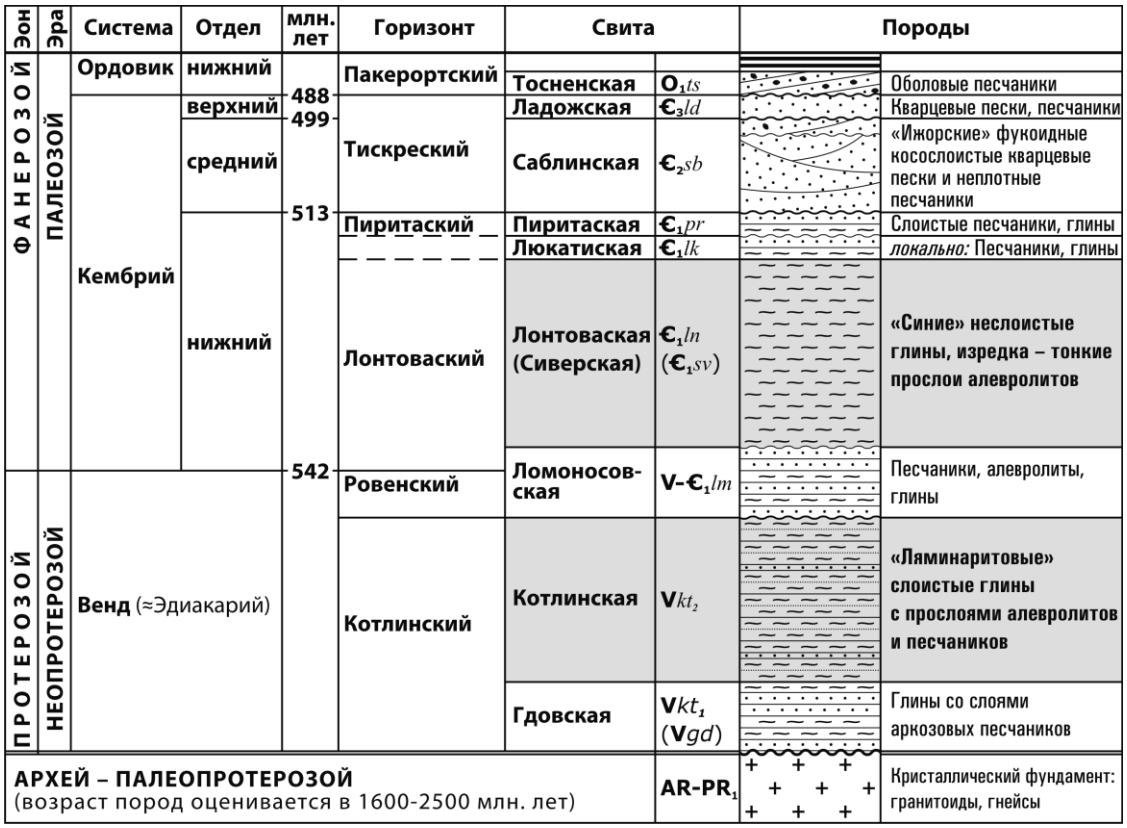
В дальнейшем в сравнительно спокойном гидродинамическом режиме [40] происходило накопление глин лонтоваского горизонта, которые из-за своего цвета обычно называют «синими». Крупный морской бассейн расширялся на запад без видимого перерыва в осадконакоплении. Море было сравнительно мелкое, спокойное, с близкими к норме соленостью и газовым режимом. Лонтоваский горизонт представлен большей частью выдержанной толщей глин с песчаниками и алевролитами в основании, которые трансгрессивно залегают на ровенских отложениях (табл. 19).

Возраст глин Ленинградской области и Белоруссии определен по глаукониту аргон-калиевым методом и составляет около 530 млн лет – нижний кембрий. Горизонт синих глин в предглинтовой полосе на территории Ленинградской области залегает непосредственно под четвертичными отложениями. В узкой полосе вдоль южного берега Финского залива глины были размыты и эродированы. К югу глины погружаются под молодые отложения ордовика, карбона и девона. При этом их мощность постепенно увеличивается от 2–10 м в зоне размыва до 100–200 м в юго-западной части Ленинградской области.

Нижнекембрийские глины – типичные морские осадки, отличающиеся однородностью и постоянством химического и гранулометрического состава, хорошими пластическими свойствами [108]. По составу они гидрослюдистые, реже монтмориллонитовые, в кровле нередко выветрелые, осветленные присутствующим каолинитом. Характерно присутствие пиритизированных следов червеобразных мелких кристаллов и друз пирита.

Таблица 19

Стратиграфическое положение вендских и нижнекембрийских глин на южном побережье Финского залива (Ломоносовский район)[15].




Положение вендских и нижнекембрийских глин в геологическом разрезе перспективого участка «Копорье» дано по материалам скважины, разбуренной у п. Подозвонье в 16 км южнее ЛАЭС [109]:

| Глубина, от–до, м | Мощность слоя, м | Характеристика пород |
|---|---|---|
| 0,0 –0,2 | 0,2 | Почвенный слой |
| 0,2 –4,4 | 4,2 | Моренные, песчано-глинистые отложения |
| 4,4 –28,0 | 23,6 | Известняки, нижний-средний ордовик |
| 28,0 –33,2 | 5,2 | Песчаники глауконитовые, нижний ордовик |
| 33,2 –40,6 | 7,4 | Сланцы диктионемовые, нижний ордовик |
| 40,6 –44,2 | 3,6 | Песчаники оболовые, нижний ордовик |
| 44,2 –47,8 | 3,6 | Пески, песчаники кварцевые, кембрий |
| 47,8 –155,8 | 108,0 | Глины, нижний кембрий |
| 155,8 –171,9 | 16,1 | Песчаники алевролитовые, нижний кембрий |
| 171,9 –261,4 | 89,5 | Глины, котлинский горизонт, венд |
| 261,4 –340,0 | 78,6 | Песчаники, гдовский горизонт, венд |
| 340,0 | | Породы кристаллического фундамента, архей, нижний протерозой |

Лонтоваское время бассейна завершилось поднятием всей территории, субаэральным выветриванием с образованием железистой и каолиновой коры.

В ордовикскую эпоху формирования осадочного чехла накапливались осадки нормального морского бассейна, в основном песчано-глинистые. Характер осадков, наличие трилобитов и эхиносферитов позволяют оценивать его глубину в 100–200 м. Дальнейшая морская трансгрессия вела к образованию более однородных карбонатных отложений.

В нижнем ордовике происходило накопление железистых песчаников – тосненской свиты пакерортского горизонта (табл. 19). Руководящая фауна нижнеордовикских отложений – раковины моллюсков Obolus apollinis (оболовые песчаники). Пакерортский горизонт обогащен фосфором до концентраций, позволяющих вести промышленные разработки. В западной части Ленинградской области в междуречье Луги и Нарвы в субширотной полосе длиной более 15 км открытым способом разрабатывается Кингисеппское месторождение.

На ордовикских песчаниках залегают диктионемовые сланцы – глинистые породы, на 15–20 % состоящие из органического вещества, остатков морских колониальных организмов Graptolithida. Внимание к этим породам привлекает повышенное содержание урана – 0,005–0,012 %, с максимальными значениями до 0,03 % [110]. В Ломоносовском районе области вблизи п. Лопухинка присутствие диктионемовых сланцев способствовало формированию небольших озер с повышенными концентрациями радона (в среднем 54 Бк/л).

Существующие природные радиоактивные аномалии учитываются при радиационном мониторинге территорий и наблюдении радиационно опасных объектов, например, ПЗРО.

Над диктионемовыми сланцами ($O_1$kp) или непосредственно на оболовых песчаниках ($O_1$ts) залегают глауконитовые песчаники и глины леэтоеского горизонта ($O_1$lt).

Нижнеордовикские породы перекрыты мощной толщей (120–180 м) известняков и доломитов (нижний-средний ордовик), слагающих Ижорскую возвышенность, которая расположена за пределами рассматриваемого нами района, но в пределах территории области представляет важную геолого-геоморфологическую структуру – Ижорское карбонатное плато. Последнее сложено устойчивыми к разрушению карбонатными породами, перекрытыми маломощными четвертичными отложениями. Интенсивная трещиноватость с развитием карста объясняет слабое развитие на плато гидросети. Плато ордовикских известняков полого погружается в юго-восточном направлении, где перекрывается палеозойскими отложениями девонского и каменноугольного возраста.

В 1996-1997 гг. в породах нижнего карбона на Пикалевском месторождении известняков обнаружены бентонитовые глины. Прогноз ресурсов бентонитов, доступных для эксплуатации, составляет 400–500 млн. т [111].

Начиная с каменноугольного периода, и до четвертичных оледенений значительная часть северо-западной территории области существовала как суша. Оледенения завершили заключительный этап формирования осадочного чехла на северо-западе Русской платформы. Формирование ледниковых образований происходило после длительного (позднемезозойско-плиоценового) периода континентальной денудации и сноса. Последние проходили в условиях нестабильных тектонических условий с изменяющимся базисом эрозии, что приводило к образованию структур-

но-денудационного рельефа дочетвертичных пород, расчлененных сетью каньонообразных «древних» долин [107].

В четвертичном периоде по общепринятым данным на территории Северо-Западного региона РФ были четыре ледниковые эпохи, которые чередовались с тремя эпохами межледниковья, во время которых ледяной покров исчезал [112–114]. Ритмические климатические изменения начались около плиоцена и плейстоцена около 1,6 млн лет назад, когда начали образовываться покровные льды северного полушария. При этом ~1 млн. лет назад произошел переход от 41-тысячелетней цикличности изменения объема льдов к 100-тысячелетней.

Самое первое оледенение Северо-Западного региона – окское, за которым следовало лихвинское межледниковье.

Второе оледенение – днепровское. В Европе его называют рисским, и оно занимало максимальную площадь развития покровных льдов ~5 млн. км$^2$. За днепровским оледенением следовало одинцовское межледниковье (~470–310 тыс. лет назад).

Третье оледенение – московское, после которого следовало микулинское межледниковье (~130–70 тыс. лет назад).

Четвертое валдайское оледенение – позднеплейстоценовое (~74–12 тыс. лет назад) было наименьшим по площади своего развития [107].

12–10 тыс. лет назад произошло последнее похолодание плейстоцена, а в интервале 10–9 тыс. лет назад в голоцене началось современное потепление.

Ритмические покровные оледенения четвертичного периода были глобальными с близкими по времени стадиями развития ледников и межледниковий на северных территориях Европы, Азии, Северной Америки (табл. 20) [113].

Таблица 20

Принципиальная схема сопоставления основных четвертичных оледенений [113]

| Альпы | Среднеевропейская равнина | Русская равнина | Северная Америка |
|---|---|---|---|
| Вюрм | Вислинское оледенение | Валдайское оледенение | Висконсинское оледенение |
| | Вартинская стадия | Московская стадия | |
| Рисс | Заальское оледенение | Днепровское оледенение | Иллинойское оледенение |
| Миндель | Эльстерское оледенение | Окское оледенение | Канзасское оледенение |
| Гюнц | | | Небраскское оледенение |

Вновь наступающие покровные ледники в значительной мере уничтожали отложения, накопившиеся в предшествующие ледниковые и межледниковые эпохи. Вследствие этого в большей части территории Ленинградской области представлены образования последнего валдайского оледенения [107]. По своему температурно-гляциальному режиму валдайское оледенение было неоднородным. Два максимальных похолодания (ранневалдайское и поздневалдайское оледенение) разделены теплым периодом – карукюласким межледниковьем – 40–25 тыс. лет назад.

Новейшая четвертичная история региона связана с изменениями климата, отступанием ледникового покрова, тектоническими движениями земной коры, вызванными как внутренними, так и изостатическими процессами, а также колебаниями уровня Мирового океана. Причина изостатических колебаний связана с увеличением или уменьшением нагрузки на отдельные участки земной поверхности.

Толщина льда в эпоху максимальных оледенений достигала 2000–3000 м [112], и земная кора при дополнительной нагрузке погружалась в пластичное подкоровое вещество. После таяния ледников происходило восстановление нарушенного равновесия – подъем ранее опустившихся участков. Изостатические движения могли вызвать деформации, и даже разрывы пластов осадочных пород в приповерхностных частях геологического разреза. По этой причине коренные отложения нижнекембрийских глин отдельные исследователи рассматривают не как однородную среду, а как зональную, трещиновато-блочную толщу, что осложняет оценки безопасности изоляции в ней радиоактивных отходов [40, 115].

Чередование ледниковых и межледниковых эпох, фактически – похолодание и потепление климата вызывали эвстатические колебания уровня Мирового океана. Во время оледенений, когда атмосферные осадки накапливались на суше, уровень понижался. После таяния ледников объемы океанических вод восстанавливались.

На протяжении последних 10–11 тыс. лет в Балтийской впадине и её окрестностях, в том числе Финском заливе, образовывались, сменяя друг друга, несколько крупных водных бассейнов (табл. 21) [112]. При отступании валдайского ледяного покрова первоначально образовалось Балтийское ледниковое озеро, подпруженное на севере краем ледника. По результатам изучения ленточных глин скорость сокращения льдов составляла ~450 м в год. В дальнейшем ~10 200 лет в центральной части Балтийской котловины образовалось Иольдиевое море, имеющее на западе связь с Атлантикой. В начале бореальной климатической фазы Балтика оказалась связанной с океаном через пролив в средней Швеции. Проникновение атлантических вод вызвало возникновение моря Рабдонема.

Позднее связь с Атлантикой нарушилась, что привело к превращению этого моря в пресноводное Анциловое озеро, просуществовавшее 300–400 лет. Около 8 500 лет назад воды Анцилового озера начали перетекать в Атлантику через датские проливы. На месте реки Невы текла река Тосна, которая по нынешнему Морскому каналу впадала в Анциловое озеро за Кронштадтом, и река Мга, текущая в сторону Приладожья.

Теплая атлантическая фаза окончательно растопила ледники Скандинавского нагорья. Вследствие опускания суши произошло отделение Ютландского полуострова от южной Швеции и образование проливов Большой и Малый Бельты. Через проливы океанические воды проникли в Балтийскую котловину, образовав Литориновое море. Морская трансгрессия продолжалась более 2 500 лет, и её максимум был 6 500 лет назад. Акватория Литоринового моря была больше, чем современного Балтийского моря. По Приневской низменности оно глубоко вдавалось в сушу. Ладожское озеро представляло собой залив моря и соединялось с ним через пролив на севере Карельского перешейка. В результате поднятия суши и понижения уровня океана Литориновое море стало сокращаться, образовав ~ 4 000 лет назад Древне-Балтийское море. Ладожский залив находился в области интенсивного поднятия земной коры и вскоре превратился в изолированный водоем. Поднявшийся уровень воды Ладожского озера превысил уровень моря на 17–18 м и 4 000–4 500 лет назад образовалась река Нева, воды которой частично использовали уже готовые речные долины рек Мги и Тосны.

Все послеледниковые бассейны оставили характерные отложения. Последнее Литориновое море оставило следы своего существования в виде террас, абразивных уступов, береговых валов и дюн, сформировав элементы современного ландшафта. При этом в каждом регионе на результаты деятельности послеледнико-

вых озер и морей влияли конкретные условия – геологические особенности и рельеф уже существующей поверхности.

Таблица 21

История и хронология Балтики [112]

| Абсолютный возраст (годы до 1950 г.) | Климатическая фаза | Стадии Балтики |
|---|---|---|
| 1000<br>2000 | Субатлантическая (влажная, умеренная) | Самые молодые стадии Балтики |
| 3000<br>4000 | Суббореальная (умеренно-прохладная, сухая) | Море Лимнея<br>Регрессия |
| 5000<br>6000<br>7000<br>8000 | Атлантическая (влажная, теплая; климатический оптимум голоцена) | **Литориновое море** |
| 9000 | Бореальная (сравнительно сухая, умеренно-прохладная) | Регрессия<br>**Анциловое озеро**<br>Море Рабдонема<br>Регрессия |
| 10 000 | Пребореальная (начало потепления) | **Иольдиевое море**<br>Регрессия |
| | Молодой или поздний дриас (холодная) | **Балтийское ледниковое озеро** |
| 11 000 | Аллерёд | Бассейны, предшествующие формированию Балтийского ледникового озера |
| 12 000 | Средний дриас | |
| | Беллинг | |
| 13 000 | Древний или ранний дриас | |

Примечание: Дриасовое время – позднеледниковые фазы похолодания. Подразделяются на древний дриас (окончившийся ~12 800 лет назад), средний дриас (12 300–11 400 лет назад) и поздний дриас (10 800–10 100 лет назад), разделенные фазами потепления – бёллинг и аллерёд.

В Ломоносовском районе и несколько южнее от Финского залива выделяют три основных орографических элемента: Предглинтовую низменность, Ордовикское, или Ижорское плато и разделяющий их Балтийско-Ладожский уступ – глинт.

Предглинтовая низменность – полого-волнистая, террасированная в нижней части равнина, плавно повышающаяся с севера на юг от 0 м – уровень воды залива до 55–60 м вблизи глинта.

Ижорское плато сложено устойчивыми к выветриванию карбонатными породами ордовика с максимальными абсолютными отметками 160–170 м.

При выборе площадок для строительства ПЗРО особый интерес представляют участки развития Балтийско-Ладожского рельефного уступа – глинта. Наличие такой формы рельефа позволяет на равнинной территории южного берега Финского залива сооружать тоннельные горные выработки для ПЗРО с горизонтальными или слабо наклонными выработками, имеющими непосредственный выход на поверхность.

Глинтом (от шведского Klint – обрыв, уступ) называют природную эрозионно-абразивную форму рельефа, отделяющую более возвышенную часть поверхности, сложенную прочными карбонатными породами ордовикской системы, от низ-

менных областей развития сравнительно легко разрушаемых глин и песчаников кембрийской и вендской систем. Протяженность глинта 1100-1200 км от шведского острова Эланд через острова и материковую территорию Эстонии и Ленинградской области до Ладожского озера. Максимальная абсолютная отметка бровки глинта между п. Копорье и Красным Селом около 100 м. Отсюда к западу и востоку наблюдается снижение этих отметок до 20–40 м с соответствующим понижением относительной высоты глинта от 25–40 до 5–10 м.

Происхождение глинта до конца не выяснено, но в настоящее время большинство исследователей согласны считать, что он маркирует береговой уступ Иольдиевого моря, образовавшегося после таяния ледника [116, 117]. Установлено экзогенное происхождение глинта, не связанное с какими-либо тектоническими процессами и возможными нарушениями подстилающих его коренных отложений глин.

Для районов предполагаемого сооружения ПЗРО необходимы достоверные детальные данные об эволюционных и коллизионных этапах геологического развития изучаемого сегмента земной коры и его поверхности. Естественно, что наибольшее внимание уделяется коллизионным, кризисным событиям, быстропротекающим и контрастным изменениям природной среды. Надёжность прогноза безопасности подземной изоляции РАО будет существенным образом зависеть от полноты знаний условий и закономерностей геологического, геоморфологического и климатического развития региона, особенно за последние сотни тысяч и миллионы лет.

### *5.1.1.2. Гидрогеологические условия региона*

Имеющие низкую водопроницаемость ($10^{-3}$–$10^{-5}$ м/сут) толщи глинистых пород являются водоупорами, разделяющими водоносные горизонты. Глины в значительной степени регулируют режим водообмена и одновременно обеспечивают защиту подземных вод от поверхностного техногенного загрязнения. В определенных условиях глинистые породы могут пополнять запасы подземных вод и изменять их химический состав [118].

Значительные по площади развития пласты глинистых пород формируют артезианские бассейны – гидрогеологические структуры, являющиеся важнейшими источниками водоснабжения. Крупнейшим артезианским бассейном северо-западной части Восточно-Европейской платформы является Прибалтийский. Он располагается на территории Эстонии, Латвии, Литвы, северо-западной части Белоруссии, Калининградской и части Псковской областей России. В структуре бассейна нижний ярус кембрийско-вендского водоносного горизонта отделяет от верхнего кембрийско-ордовикского мощная и выдержанная толща водоупорных нижнекембрийских глин [119]. Аналогичную функцию водоупоров нижнекембрийские и верхневендские глины выполняют и в Ленинградской области, большая часть территории которой относится к Ленинградскому артезианскому бассейну, имеющему сток в Финский залив. Воды Карельского перешейка относятся к Восточно-Балтийскому гидрогеологическому массиву.

В соответствии с геологическим строением и гидродинамическими условиями в стратиграфической последовательности снизу вверх выделяются следующие водоносные горизонты и разделяющие их водоупоры [107]:

- архейско-нижнепротерозойский водоносный комплекс с трещинно-жильными водами в изверженных и метаморфических породах ($AR – PR_1$);
- вендский водоносный комплекс с порово-трещинно-пластовыми водами в песчаниках и конгломератах с прослоями глинистых и вулканогенных пород ($V_2kt$);
- котлинский водоупор, представленный толщей глин, ($V_2kt$);
- нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт с порово-трещинно-пластовыми водами в песках и песчаниках ($Є_1lm$);
- лонтоваский водоупор, представленный толщей нижнекембрийских глин ($Є_1ln$);
- кембро-ордовикский водоносный горизонт с порово-трещинно-пластовыми водами в песках и песчаниках ($Є_1lk+pr$, $Є_2sb+ts$, $O_1pk$);
- ордовикский водоносный комплекс с трещинно-карстово-пластовыми водами в карбонатных отложениях ($O_1$,$O_2$,O,).

Близкий по стратиграфическим подразделениям гидрогеологический разрез по линии Сосновый Бор–Волосово представлен на рис.17.

Краткие характеристики водоносных горизонтов приведена по данным [107, 120, 121].

Объем разведанных эксплуатационных запасов подземных вод на территории Ленинградской области составляет 680 тыс. $м^3$/сут. Более половины (67 %) из них приходится на самый водообильный ордовикский водоносный комплекс, 10 % - на четвертичный, 8 % - на кембро-ордовикский, 15 % - на нижнекембрийский (ломоносовский), вендский (верхнекотлинский), аракюласко-швянтойский и веневско-протвинский (четвертичные горизонты).

*Архейско-нижнепротерозойский водоносный комплекс.*

Подземные воды приурочены к трещинам в породах кристаллического фундамента и к их выветрелой поверхностной части, развитой локально. При отсутствии разделяющего водоупора архейско-нижнепротерозойские воды образуют единый комплекс с вендским водоносным комплексом. Накопление трещинно-жильных вод приурочено к зонам повышенной трещиноватости в породах фундамента. Водообильность низкая, удельный дебит скважин составляет тысячные доли литра в секунду [107]. В случаях неглубокого залегания химический состав вод хлоридно-натриевый с минерализацией 1–3 мг/$дм^3$. В юго-восточном направлении в связи с погружением фундамента растет величина напора и степень минерализации. Предполагается, что на участках с повышенной тектонической активизацией в составе растворенных газов увеличивается количество $CO_2$ до 37,4–47,4%.

Практическое значение вод архейско-нижнепротерозойского комплекса ограничено [121]. Его воды с минерализацией до 0,4 мг/л используются для водоснабжения ряда населенных пунктов в Выборгском и Приозерском районах.

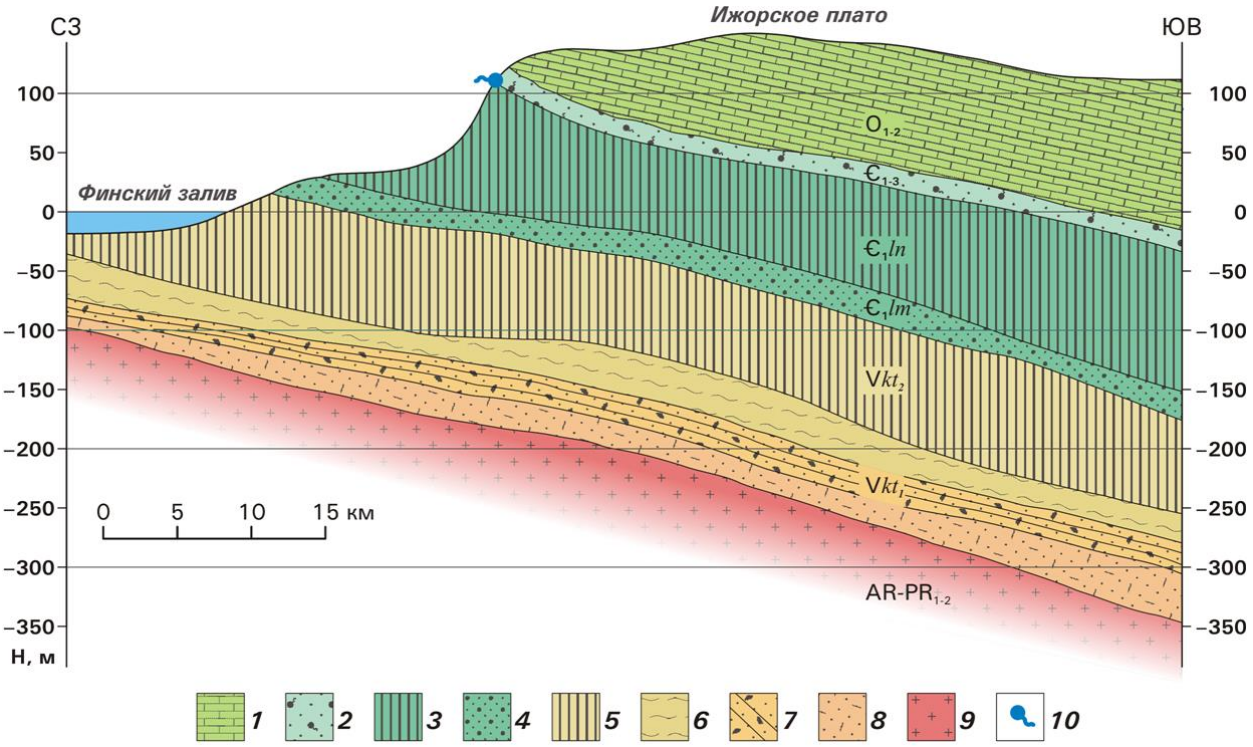



**Рис. 17**. Схематический геологический разрез по линии Сосновый Бор–Волосово [122].

*1* – водоносный горизонт ордовикских отложений; *2* – водоносный горизонт верхнего-нижнего кембрия; *3* – лонтоваская свита нижнего кембрия (водоупор); *4* – ломоносовский водоносный горизонт; *5* – верхнекотлинский горизонт венда (водоупор); *6* – перекрывающие водоупоры котлинского водоносного комплекса; *7* – нижнекотлинский водоносный горизонт; *8* – стрельнинский водоносный горизонт; *9* – архей-протерозойский водоносный горизонт; *10* – источники.

*Вендский водоносный комплекс.*

Залегает непосредственно на размытой поверхности кристаллического фундамента и на большей территории своего распространения перекрыт толщей верхнекотлинских глин, хорошо защищающих его от поверхностного загрязнения[123]. В предглинтовой низменности на южном побережье Финского залива выделяются два водоносных горизонта: нижний (так называемый стрельнинский) и верхний гдовский. Горизонты разделены толщей глин мощностью 5–20 м. Основное движение вод с юго-востока на северо-запад в область дренажа – Финский залив.

Горизонт содержит в основном минеральные воды. Зона пресных вод приурочена к центральной части Карельского перешейка и территориям, расположенным севернее г. Лодейное Поле.

Основную часть вендского комплекса слагают пески и песчаники, алевриты и алевролиты. Для значительной части разреза характерны аргиллитоподобные глины и аргиллиты. Мощность горизонта увеличивается с севера на юг: от нескольких метров до более 200 м. Также с севера на юг увеличивается глубина залегания комплекса: от 60 м в Курортном районе Санкт-Петербурга до 190 м в Красном Селе.

Водопроводимость пород изменяется от 50 до 500 $м^2$/сут. Воды высоконапорные. Нижнекотлинские песчаники обладают высокой водообильностью.

В пределах Карельского перешейка воды имеют гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав с минерализацией 0,1–0,4 г/дм$^3$. Ближе к границе минерализованных вод их состав меняется на гидрокарбонатно-хлоридный натриевый с минерализацией 0,5–0,8 г/дм$^3$.

На базе нижнекотлинского горизонта основано водоснабжение курортной зоны Санкт-Петербурга, г. Подпорожье, населенных пунктов Карельского перешейка и северного побережья Финского залива. Горизонт разрабатывается в Санкт-Петербурге, где его минеральные воды используют АО «Полюстрово», АО «Петроспирт», АО «Балтика». Воды горизонта используются для технического водоснабжение предприятий, а также находят лечебное применение.

На южном побережье Финского залива гдовский водоносный горизонт не эксплуатируется, гидродинамический режим формируется только за счет влияния эксплуатации в г. Санкт-Петербург [120].

*Котлинский водоупор*

Пласт вендских верхнекотлинских глин развит практически на всей территории Ленинградской области, за исключением Выборгского и Приозерского районов. Мощность пласта 50–130 м. Пласт вендских глины обеспечивает изоляцию нижележащего водоносного нижнекотлиноского горизонта от сточных и талых вод.

*Нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт*

Ломоносовский водоносный горизонт распространен к югу от Финского залива и Ладожского озера. В большей части своего распространения на юг и юго-восток содержит солоноватые и соленые воды. Пресные воды присутствуют только в западной части, где горизонт имеет эксплуатационное значение в Кингисеппском и Сланцевском районах [75]. Воды гидрокарбонатно-хлоридные натриевые с минерализацией 0,5-0,7 г/дм$^3$. Для западных районов ломоносовский горизонт – «гидравлически полностью изолированный напорный пласт с мощными водоупорами в его кровле (лонтоваские глины) и подошве (котлинские глины)» [75]. В северных частях Кингисеппского и Ломоносовского районов горизонт почти полностью выклинивается, не достигнув Финского залива. Местами он представлен мелкими изолированными линзами небольшой мощности. Общая пьезометрическая поверхность имеет уклон на северо-запад в сторону Финского залива.

Водовмещающие отложения Ломоносовского горизонта представлены кварцевыми песчаниками с прослоями глин общей мощностью ~ 30 м.

Максимальными значениями водопроводимости (100–140 м$^2$/сут) характеризуются западные окраины распространения горизонта – г.г. Сланцы, Ивангород. В центральной части (г. Кингисепп, п. Котлы) она составляет 50–100 м$^2$/сут., а к югу и востоку (в сторону г. Сосновый Бор) – менее 50 м$^2$/сут. Дебит скважин в районе ЛАЭС 0,2–0,4 л/сек, максимальная водопроводимость 1,5–9,0 м$^3$/сут [108].

Эксплуатацией ломоносовского горизонта на севере Ломоносовского района возможно решать только частные проблемы потребителей с водопотребностью до 100 м$^3$ в сутки [120].

В 2008 г. Правительством Ленинградской области в целях развития системы централизованного водоснабжения Всеволожского, Ломоносовского, Гатчинского и Тосненского районов принято решение о строительстве Новоладожского водовода [124]. В связи со строительством ЛАЭС-2 предусмотрено сооружение нового

водозабора из ордовикского водоносного горизонта с водоводом по территориям Волосовского и Ломоносовского районов к г. Сосновый Бор.

Приведенные данные в значительной мере снижают актуальность и остроту вопросов, связанных с вероятностью загрязнения ломоносовского водоносного горизонта в случае аварийной утечки радионуклидов из подземного ПЗРО в нижнекембрийских глинах. Прогнозируемые «экологические катастрофы» и «контаминация морской акватории» Финского залива [40, 115] должны быть обоснованы более убедительно и корректно.

*Сиверский (лонтоваский) водоупор*

Нижнекембрийские глины лонтоваского горизонта сиверской (лонтоваской) свиты являются региональным водоупором, разделяющим пресные воды вышезалегающих (ордовикских) водоносных комплексов от нижезалегающих (ломоносовских и нижнекотлинских) солоноватых и соленых вод, залегающих ниже водоупора (табл. 22). Установлено, что гидравлическая связь между этими водоносными комплексами отсутствует [120]. По данным гидрогеологического разбуривания мощность водоупора лонтоваских нижнекембрийских глин южнее и юго-восточнее перспективного участка «Копорье» составляет [109]:

85–102 м – п. Котлы;
114 м – д. Большое Рудилово;
108 м – п. Подозвонье;
120 м – с. Лопухинка;
120 м – п. Савольщина;
116 м – д. Старые Медуши;
117 м – с. Муховицы;
122 м – с. Каськово.

Таблица 22

Химический состав природных вод различных водоносных комплексов, мг/дм$^3$ [125]

| Компоненты | Водоносные комплексы (горизонты) | | |
|---|---|---|---|
| | нижнекотлинский | ломоносовский | ордовикский |
| Na | 1600 | 148 | 2,6 |
| K | 20 | 4,3 | 1,6 |
| Mg | 57 | 2,6 | 25,7 |
| Ca | 130,6 | 5,2 | 78,7 |
| Si | 0,5 | 4,7 | 3,9 |
| $HCO_3$ | 10 | 458 | 369 |
| $SO_4$ | 10 | 4,9 | 15,1 |
| Cl | 2900 | 49,2 | 8,8 |
| $NO_3$ | 0,5 | 0,1 | 2,9 |
| $NH_4$ | 0,9 | 6,8 | 7,4 |
| pH | 7,0 | 8,0 | 7,4 |

*Кембро-ордовикский водоносный горизонт.*

Распространен к юго-востоку от Балтийско-Ладожского глинта. Горизонт подстилается водоупором нижнекембрийских лонтоваских глин. Вблизи глинта залегает узкой полосой под четвертичными отложениями на глубинах 1–10 м, В основании глинта в области естественной разгрузки его воды выходят на поверхность многочисленными небольшими источниками.

Далее на юго-восток горизонт перекрыт породами ордовика, где его глубина увеличивается от 10 до 400 м.

Водовмещающие породы – пески и слабосцементированные песчаники с маломощными прослоями глин и алевролитов. В зависимости от мощности водоносного пласта коэффициент водопроводимости варьирует от 50 до 300 $м^2$/сут. В предглинтовой полосе воды безнапорные или слабонапорные.

В результате интенсивной эксплуатации скважин, дренажных шахт и карьеров в Кингсеппско-Сланцевском горнопромышленном районе образовалась крупная депрессионная воронка радиусом 30 км и снижением напоров в её центре на 65–70 м. Как источник водоснабжения имеет значение к востоку от Санкт-Петербурга в северной части Волховского плато, где вышележащие ордовикские известняки в значительное мере дренированы.

*Ордовикский водоносный комплекс*

Распространен к югу от Балтийско-Ладожского глинта на Ижорской возвышенности, Волховском плато и Сланцевском участке, и залегает под четвертичными валунно-суглинковыми отложениями. В остальной части комплекс перекрывается нарвскими отложениями мощностью 10–60 м с возрастанием глубины залегания в юго-восточном направлении до 190 м. В центре Ижорского плато (п. Бегуницы) глубина залегания вод 20–25 м. По границе глинта существуют многочисленные нисходящие источники.

Водовмещающие породы – трещиноватые и закарстованные известняки и доломиты. Мощность комплекса увеличивается в юго-восточном направлении от 5 до 130 м [36, 38].

По химическому составу воды гидрокарбонатные кальциево-магниевые. Воды жесткие. Минерализация увеличивается в юго-восточном направлении от 0,2 до 0,8 $г/дм^3$.

Питание комплекса атмосферное. Разгрузка вод происходит через родники периферии Ордовикского (Ижорского) плато, а также в нижележащий кембро-ордовикский водоносный горизонт. Существует интенсивная техногенная разгрузка водоносного комплекса через шахтные и карьерные водоотливы на месторождениях горючих сланцев, фосфоритов и на многочисленных водозаборах.

Подземные воды ордовикского водоносного комплекса широко эксплуатируются (более 70 % суммарного водоотбора и более 50 % эксплуатационных запасов области) в Волосовском, Волховском, Гатчинском, Кингисеппском, Киришском, Кировском, Ломоносовском, Лужском районах.

Кроме перечисленных выше водоносных комплексов в гидрогеологических структурах Ленинградской области подземные воды связаны с девонскими и каменноугольными породами.

Четвертичный водоносный комплекс приурочен к озовым и камовым массивам, флювиогляциальным полям и межморенным водоносным горизонтам. Состав

и водообильность вмещающих пород крайне изменчивы. В основном – это различной крупности пески с мощностью от единиц до 80 м.
Для водоснабжения особое значение представляют переуглубленные долины, в которых залегают несколько гидравлически связанных межморенных горизонтов. На таких участках происходит закономерное увеличение по вертикали зернистости песков – от грубозернистых у основания и до мелкозернистых у поверхности. Дебит скважин переуглубленных долин достигает 10-30 л/с, водопроводимость оценивается в 600-3 500 $м^2$/сут [120]. Воды гидрокарбонатные с минерализацией 0,2-0,3 г/$дм^3$, по катионному составу смешанные. В большинстве случаев повышено содержание двухвалентного железа до 3-5 мг/$дм^3$.
Подземные воды четвертичных межморенных водоносных горизонтов используются в основном во Всеволожском, Выборгском и Киришском районах.

*5.1.1.3. Тектоника и сейсмичность.*

Критерии МАГАТЭ требуют размещения ПЗРО в зонах с низкой тектонической и сейсмической активностью [18]. Эти требования являются обязательными показателями пригодности площадок и до настоящего времени используются в своем начальном изложении, с конкретными оценками неотектонических движений и активности очагов землетрясений. В геологии существует раздел – сейсмотектоника, изучающий сейсмические проявление современных тектонических процессов и их взаимосвязь. При этом параметры сейсмичности используются для оценки геотектонического режима, определения подвижных зон в структурах региона.

Разделение в тексте критерия двух взаимосвязанных природных явлений носит условный характер и традиционно используется для оценки тектонического режима и проявления землетрясений на конкретном участке земной коры. Есть основания трактовать критерий как сейсмотектонический, объединяющий геодинамические процессы литосферы – тектонику и сейсмику.

При этом для северного полушария Земли необходимо учитывать реакцию тектонических блоков и структур приповерхностных осадочных пород на развитие и деградацию ледниковых покровов, усложняющих ритмику собственно тектонических движений.

Расположение Ленинградской области в зоне сочленения Балтийского (Фенноскандинавского) щита и Русской плиты определяет её сейсмотектонический режим и современную активность. Движения земной коры, возникшие в кристаллическом фундаменте, распространяются в породах осадочного чехла. Характер и параметры «наведенных» дислокаций будут определять структурно-геологические особенности пород перекрывающей толщи. Например, аргиллиты венда над зоной активного разлома теряют свои изолирующие свойства в качестве водоупора. Связь дислокаций пород осадочного чехла с контрастными малоамплитудными смещениями пород фундамента установлена в центральной части Карельского перешейка и в южном Приладожье [106]. Зоны тектонической активизации, тяготеющие к долгоживущим глубинным разломам или другим мобильным структурам, определяют повышенную сейсмичность, характер флюидно-эманационных процессов, гидрохимические аномалии подземных вод и другие характеристики всей платформенной структуры.

Отмечается неравномерное распределение зон и участков современной тектонической активизации. В одних случаях они могут быть сконцентрированы в ме-

стах пересечения разнонаправленных разломов. В других – периодически проявляться по зонам разломов определенного направления. Не исключается связь такого неравномерного проявления современной активизации с каким-то единым глубинным фактором, например, процессом холодной дегазации Земли [126].

В последние десятилетия в связи с появлением сейсмотомографии существенно расширились знания о глубинной геодинамике Земли, связанной с её продолжающейся дегазацией и, как следствие этого процесса, с глобальными движениями литосферных плит (плюмтектоника). Влияния планетарной дегазации, как тектонического и геохимического (газофлюидного) фактора, необходимо учитывать при выборе площадок для подземной изоляции радиоактивных отходов [127].

На характерные особенности строения пород осадочного чехла оказали влияние байкальский, каледонский, герцинский и альпийский циклы орогенеза. Наиболее хорошо изучены тектонические процессы, связанные с последним альпийским циклом, проявившимся в неоген-четвертичное время.

На основании геоморфологических, геологических и геодезических исследований новейшие тектонические процессы Санкт-Петербургского региона разделены на несколько циклов [126].

В начале олигоцен-неогенового времени (~30–23 млн. лет назад) преобладало воздымание территории, происходила дифференциация рельефа древних поверхностей выравнивания.

На рубеже палеогена–неогена на поверхностях выравнивания была заложена доледниковая эрозионная сеть [128]. В результате эрозионных процессов образовались глубоко врезанные в коренные осадочные породы доледниковые долины (долинообразные понижения, ложбины) глубиной от 10 до 200 м и максимальной шириной до 2-3 км. Их V-образная форма сидетельствовала о превалировании глубинной эрозии над боковой, что, в свою очередь, объяснялось быстрым снижением уровня Мирового океана или быстрым поднятием территории. Позднее эти долины были заполнены моренными отложениями, переслаивающимися или подстилаемыми аллювиально-флювиогляциальными межледниковыми отложениями. Долины обычно не выражены в современном рельефе и вскрываются в результате буровых работ, например, по северному краю Ордовикского плато.

В миоцене (23–5 млн. лет назад) происходит тектоническая стабилизация и формирование кор выветривания. В плиоцене – начале плейстоцена (5–1,5 млн. лет назад) тектонические движения активизируются, возникают новые разрывные нарушения, отмечаются максимальные амплитуды движений, усиливается врез рек. Образованный рельеф по конфигурации близок к современному.

В четвертичном периоде (от ~1,6 млн. лет) происходила смена нескольких погружений и поднятий территории, связанных с нагрузкой и разгрузкой ледниковых масс. В голоцене после таяния Валдайского ледника (~10 тыс. лет назад) произошел региональный подъем территории с формированием русел современных рек. Ранее сформированные тектонические структуры практически не изменялись.

Территория Ломоносовского района входит в область современных умеренных поднятий, включающую северную часть предглинтовой низины, и охватывает с севера и запада относительно стабильный блок Ордовикского плато [126].

Ледовые массы кроме динамических нагрузок были способны оказать механическое воздействие на приповерхностные осадочные породы. Хорошо известна

куполообразная структура ордовикских известняков на р. Поповка к югу от г. Павловска, нарушения залегания палеозойских пород по рекам Славянке и Ижоре. Такие структуры объясняются механическим воздействием ледника, способного деформировать поверхностные слои горных пород. В то же время наиболее рельефно давление края ледникового покрова проявлено над зонами локальных тектонических нарушений, что свидетельствует о взаимосвязи эндогенных нарушений и гляциодислокаций.

При оценке нижнекембрийских глин региона в публикациях [40,115, 129] приведены вероятные последствия, вызванные различными по генезису тектонодинамическими процессами, существенно ограничивающие в итоге изолирующие свойства этих пород.

1) Со времени образования пласта глин постоянным тектоническим фактором является движение по разломам кристаллического фундамента. Процесс активизировался в ледниковую эпоху, во время которой структурные блоки реагировали на развитие и деградацию мощных покровов льда. На определенных этапах оледенения эти подвижки могли сопровождаться активизацией аллювиальной деятельности, внедрением ледниковых кислородсодержащих вод в коренные отложения глин, взаимодействием водной фазы с минералами.

2) Тектонические нарушения в толщах слоистых глин могут образовывать в сравнительно однородной породе разломно-блоковую структуру. Параметры блочной структуры зависят от расположения пласта относительно разлома и от характера литологической слоистости.

3) За время своего существования нижнекембрийские глины прошли несколько стадий прогрессивного и регрессивного литогенеза. В конце мелового периода в пределах Санкт-Петербургского региона глинистая толща была выведена на поверхность, что привело к разуплотнению и палеовыветриванию пород. Могла сформироваться неотектоническая трещиноватость верхней части разреза, создающая зональное строение всей толщи.

4) Во время оледенений, наступления ледниковых покровов толщиной до 2,5 км и последующего стаивания льдов пласт глин испытывал мощные нагрузки, сменяющиеся возвратом к исходному литостатическому состоянию. При этом в породах могли образоваться дополнительная система наложенной трещиноватости, и фильтрационная способность глин возрасти до $10^{-3}$ м/сут.

Сделанные заключения не являются бесспорными, поскольку данные о наличии трещиноватости были получены для верхних частей разрезов, без проведения каких-либо буровых работ, позволяющих оценивать свойства всей толщи. Кроме того:

1) Зарубежные исследования глинистых формаций “Boom Clay” (Бельгия), “Opalinus Clay” (Швейцария), “Callovo-Oxfordian Sity Clay” (Франция), показали, что трещины существуют лишь в приповерхностных зонах разрезов и их образование обусловлено исключительно процессами выветривания и разгрузкой напряженного состояния исследованных массивов. На больших глубинах задокументированы лишь одиночные трещины. Внешние обжимающие давления вполне достаточны для полного смыкания трещин, что и обеспечивает высокие водоупорные свойства глинистых толщ.

2) Предположение о разломно-блоковой структуре нижнекембрийских глин противоречит общепринятой оценке этих пород как регионального водоупора, раз-

деляющего два водоносных горизонта с различным химическим составом вод [75, 107, 108, 120–122].

3) Присутствие разрывных нарушений в пластах глинистых пород не подтверждается исследованием процессов новейшей геодинамики в зоне сочленения Балтийского щита и Русской плиты [130]. Установлено, что подъем территории, освобождаемой как от последнего, так и от предшествующих ледниковых покровов, происходил в форме колебательных движений преимущественно изгибного характера и не оставил достаточно заметных остаточных дислокаций.

4) Наличие трещин в массиве с высокими емкостными свойствами блоков отнюдь не является основанием для отнесения его к формациям, малопригодным для размещения РАО [122].

Примыкающая к рассматриваемому региону северо-западная часть Балтийского кристаллического щита характеризуется достаточно интенсивной сейсмической деятельностью (рис. 18). Основным источником динамического воздействия является Норвежская коллизионная зона, проходящая вдоль побережья Скандинавского полуострова [106]. Такими же характеристиками сейсмической активности обладает линейная зона Осло–Хибины.

Восточная (российская) часть щита относится к областям со слабой сейсмичностью [131, 132]. На картах сейсмического районирования Ленинградская область отнесена к территориям с возможными землетрясениями не выше 5 баллов за период не только 500, но даже 5 000 лет [133], т.е. к территориям асейсмичным.

Сейсмический режим рассматриваемого региона, кроме влияния геотектонических структур, связан с процессами развития и последующей деградацией ледникового покрова. Под нагрузкой последнего ледника поверхность Балтийского кристаллического щита была опущена приблизительно на 800 м. После таяния льдов максимум его поднятия за последние 13 000 лет составил также около 800 м. Литосфера Скандинавии и сопряженных частей платформенных плит, находящиеся в пределах развития покровных ледников, испытывали усиление сейсмичности в периоды дегляциации и последующего снижения интенсивности и количества землетрясений по мере изостатического выравнивания.

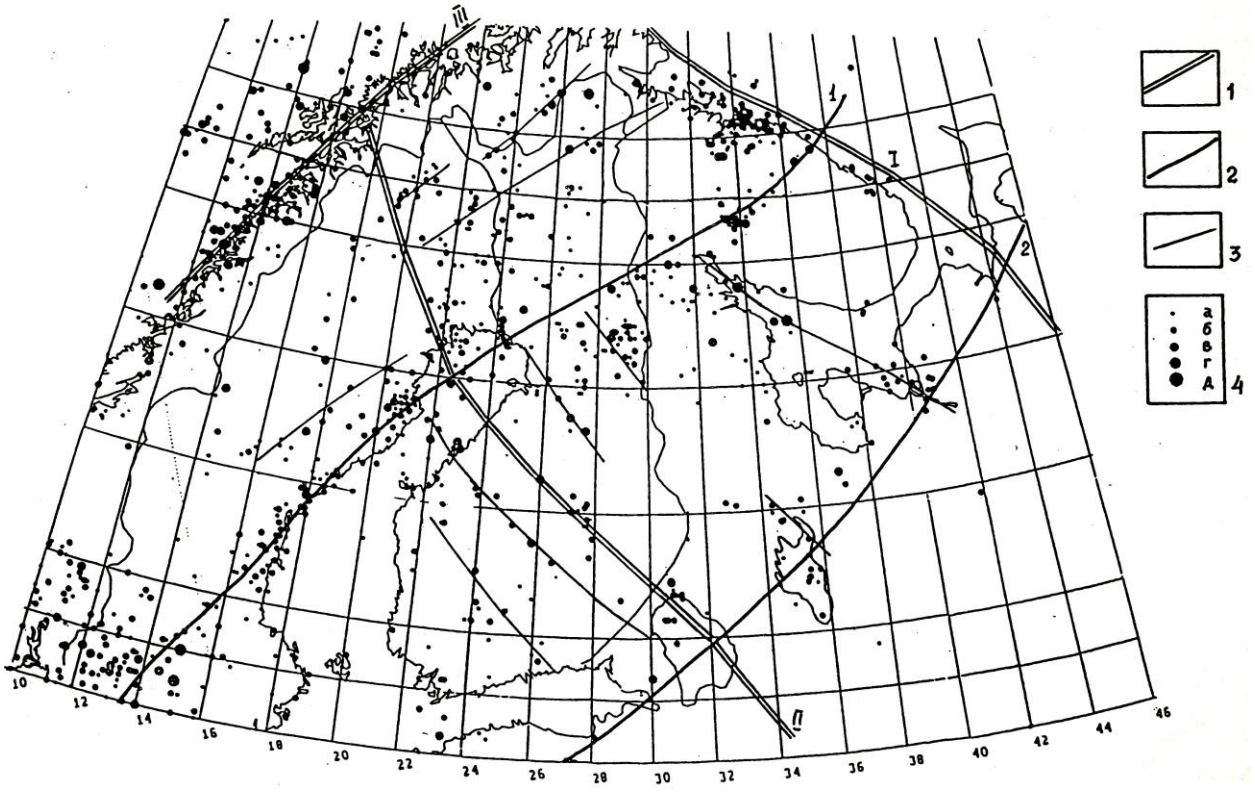



**Рис. 18**. Связь эпицентров землетрясений с геотектоническими элементами северо-западной части Восточно-Европейской платформы [106].
Зоны, ограничивающие Карело-Кольский протоконтинент: I – Карпинского; II – Ладожско-Ботническая; III – Норвежская (коллизионная).
Зоны, предположительно связанные с динамическим воздействием океанической плиты на континент: 1 – Осло–Хибины; 2 – зона сочленения Балтийского щита и Русской плиты (флексура Полканова); 3 – активизированные элементы палеорифтов и другие разломы; 4 – эпицентры землетрясений с магнитудой: а – 2.5…2,99; б – 3…3,99; в – 4…4,99; г – 5…5,99; д – более 6.

Письменно зафиксированы следующие места подземных толчков и слабых землетрясений [73]:
- 1089, 1107, 1109, 1130 гг. – Новгородские земли;
- 1804 г. – Петербург;
- 1881 г. – Ивангород;
- 1904 г. – Лужский уезд.

В 1910 г. произошло Сестрорецкое землетрясение, эпицентр которого с магнитудой около 5 балов по шкале Рихтера находился в центральной части Котовского плато (Приозерский район) в узле пересечения зон разломов северо-восточного и широтного направления.

В 1921 г. произошло землетрясение на восточном берегу Ладожского озера с интенсивностью 6±0,5 (по 10–бальной шкале) и магнитудой 4,0±0,5 [130]. Сейсмические толчки связаны с омоложенной зоной разломов северо-западного простирания на границе Ладожского грабена.

В 1976 г. на о. Осмуссаар в Балтийском море произошло землетрясение с интенсивностью в эпицентре 6-7 баллов.

В Санкт-Петербурге и Ленинградской области неоднократно фиксировались отдалённые, но достаточно интенсивные землетрясения. К ним относятся два землетрясения в Карпатах в сейсмической области Вранча в 1977 г. (M = 7,2), в 1986 г. (M = 7,0).

Землетрясения любой интенсивности создают в структурных литосферных блоках собственные весьма слабые колебания. Наличие осадочного чехла может усиливать такие колебания почти в два раза [134]. Необходимо выяснить, как будут реагировать на постоянно действующий малоамплитудный сейсмический фактор ПЗРО, находящиеся в пластах глин над кристаллическими блоками фундамента. Существует несколько методов изучения геологической среды, влияния активных внутриплитных и внутриблоковых разломов. На опыте Калининской АЭС показана перспективность сочетания таких традиционных методов (геофизических, газовых и пр.) с гравимикросейсмическими исследованиями для оценки риска, связанного с возможными сейсмическими событиями, а также со степенью «усталости» или «текущей прочности» объектов среды [135].

При оценках сейсмической опасности сооружения ПЗРО в экономически развитом регионе с высокой плотностью населения, каковым является Ленинградская область, должны быть учтены и проанализированы современные представления о наведенных природных и техногенных факторах, инициирующих сейсмические события и представляющих опасность для наземно-подземных комплексов изоляции РАО.

### *5.1.1.4. Барьерные свойства глин относительно радионуклидов*

Ограниченное движения (миграция) радионуклидов на выбранном участке является одним из основных требований при решении вопроса о возможности строительства ПЗРО и оценках безопасности подземной изоляции РАО.

При анализе изолирующих свойств геологической среды одновременно рассматриваются две природные системы – миграционная и барьерная, которые выполняют разнонаправленные функции, приводящие в итоге к рассеянию или удержанию вещества. На выбранном для строительства ПЗРО участке горные породы должны выполнять функции основного барьера на пути миграции радионуклидов. Анализируя барьерные свойства глин Ленинградской области, необходимо оценить влияние на условия подземной изоляции РАО не только самих верхневендских и нижнекембрийских глинистых пород, но и их геологического окружения – платформенную структуру региона в целом.

Природные геохимические барьеры – это участки и зоны горных пород с резким снижением интенсивности миграции элементов на коротких расстояниях, что приводит к накоплению на барьере мигрирующих элементов. Геохимические барьеры являются фундаментальным понятием геохимии [136].

Распространению радионуклидов в геологической среде препятствуют:

- механический захват суспензированных и коллоидных частиц;
- осаждение оксигидратов и других малорастворимых соединений;
- кольматация водопроводящих трещин и пор – каналов миграции;
- ионный обмен;

- сорбция радионуклидов минералами–природными сорбентами;
- изоморфный и изотопный обмен радионуклидов с химическими аналогами в горных породах.

Указанными процессами не исчерпываются все возможности природных барьеров, поскольку существуют дополнительные группы факторов, связанные со свойствами мигрирующих радионуклидов и особенностями среды их перемещения. Все они направлены на замедление переноса радионуклидов относительно движения подземных вод [4]. При этом суммарный эффект удержания будет значительно выше, чем при каком-либо одном барьерном механизме, например, сорбции. Учесть все факторы, и их взаимодействие в количественных моделях для многокомпонентоной геотехнологической системы ПЗРО весьма сложно [2, 4, 9].

Количественным показателем барьера, определяемым по изменению геохимической обстановки, является градиент барьера $G$, определяемый по формуле:

$$G = \frac{m_1 - m_2}{L}, \text{ где}$$

$m_1$ – показатель, характеризующий какой-либо параметр до барьера, например концентрацию мигрирующего радионуклида в водной фазе;
$m_2$ - аналогичный показатель после барьера;
$L$ - мощность (ширина) барьера.

Существует формула для расчета концентраций элементов на барьере:

$$h = K \frac{C_1 - C_2}{a_1 - a_2}, \text{ где}$$

$h$ – концентрация элемента (соединения) на барьере;
$K$– коэффициент, зависящий от характера среды барьера;
$C_1$ – содержание рассматриваемого вещества в миграционном потоке до барьера**;**
$C_2$ – то же, после барьера;
$a_1$ – общее содержание всех веществ, мигрирующих в потоке до барьера;
$a_2$ – то же, после него.

Весьма важно, что для накопления какого-либо элемента на барьере не обязательно его высокое содержание в миграционном потоке. Даже при низких концентрациях за длительные промежутки времени может произойти существенное обогащение, вплоть до формирования рудных тел. Соответственно при миграции долгоживущих радиационно и биологически опасных радионуклидов не исключено их накопление на локальных барьерах, например, на узких прослоях глинистых минералов в песчаных породах. При этом возможно появление вторичного источника потенциального радиационного загрязнения геологической среды, расположенного за пределами хранилища.

Существенной количественной характеристикой барьера является контрастность образовавшихся геохимических аномалий:

$$K = \frac{C_a}{C_ф}, \text{ где}$$

$C_a$ – среднее содержание рассматриваемого компонента в аномалии (на барьере); $C_ф$ – фоновое содержание компонента в окружающей среде (миграционном потоке).

Ранее отмечалось, что по своему содержанию контрастность барьера аналогична коэффициенту распределения $K_d$.

На начальных этапах исследований целесообразно проводить последовательный анализ отдельных компонентов системы миграции, а именно: каналов миграции, миграционной подвижной среды, структурно-минералогического окружения (вмещающих горных пород).

*Каналы миграции*

Каналами миграции в горных породах и минералах являются трещинно-поровые пространства, заполненные жидкой, газовой или смешанными газово-жидкими фазами. Любая горная порода состоит из двух неразделимых частей – твердого минерального скелета и трещинно-порового пространства, и её можно рассматривать как систему статистически упорядоченных структурных неоднородностей различного уровня [137]. На микроуровне – это поры, микрополости, каналы в минералах со слоистой и каркасной структурами, дефекты кристаллизации и пр. На макроуровне – это разрывные нарушения в горных породах: трещины. разломы, зоны дробления, региональные линеаменты и пр.

От размеров каналов зависят механизмы миграции. В тонкодисперсных пелитовых породах превалирует диффузионный механизм миграции – самопроизвольный и необратимый перенос вещества, возникающий под влиянием градиента концентраций, температур, давления, электрического потенциала и пр. В крупноскелетных, сильнопористых и трещиноватых породах основной формой водной (флюидной) миграции является напорная и безнапорная фильтрация растворов – фильтрационная миграция [4]. При этом движение растворов вдоль трещин во много раз быстрее, чем через систему рассеянных пор, даже если общий объем последних гораздо больше поперечного сечения трещин [138].

При этом трещины нельзя рассматривать как геометрические пространства, ограниченные двумя плоскостями. Блоки горных пород по различным сторонам трещины имеют многочисленные зоны и точки соприкосновения, что приводит к случайному распределению направлений движения трещинных вод. Наряду с главными каналами миграции существуют участки с застойным режимом, в которых миграция происходит в основном путем диффузии.

Пласты верхневендских и нижнекембрийских глин являются анизотропными геологическими средами, что неоднократно отмечалось и характерно для глинистых формаций [87, 107]. Для рассматриваемых пород наблюдается чередование собственно глинистых тонкозернистых прослоев с песчано-глинистыми, имеющими различный минералогический состав, различную пористость и проницаемость. Миграция радионуклидов по песчаным прослоям будет интенсивнее, чем по глинистым. Лабораторные эксперименты подтвердили, что диффузионный перенос радионуклидов вдоль напластования нижнекембрийских глин выше, чем перпендикулярно слоистости. Величина коэффициента анизотропии для $^{90}Sr$ достигает 6 [139].

Очевиден разброс результатов количественных определений пористости для структурно неоднородных глинистых пород, которые зависят от соотношения в анализируемых пробах тонкозернистых пелитовых и песчано-глинистых прослоев. Обычно эта величина находится в пределах 26–35 % для нижнекембрийских и 20,3–41,2 % для верхневендских глин.

Наличие или отсутствие в пластах глин крупных каналов миграции – трещин различного происхождения – будет установлено после детального изучения всего блока пород, выделенного для строительства ПЗРО. При этом необходимо обратить внимание на возможность залечивания образующихся разрывных нарушений в случаях увеличения влажности и последующего набухания глин. Для нижнекембрийских глин величина набухания составляет от 4,5 до 14,0 % [115].

*Среда миграции*

Для оценки миграции необходимо установить наиболее вероятные миграционные формы радионуклидов и среды их перемещения – подземных и внутриформационых водных растворов.

В условиях разгерметизации и обводнения ПЗРО в водной фазе могут присутствовать различные подвижные формы радионуклидов, среди которых будут преобладать диссоциированные ионы, недиссоциированные молекулы и комплексные соединения.

Возможно присутствие миграционноспособных коллоидных форм, образующихся при гидрохимическом метаморфизме матриц и упаковок, а также компонентов инженерных барьеров [140, 141].

Наименьшая подвижность радионуклидов в растворах с пониженными значениями Eh и близкими к нейтральным или слабощелочным величинами pH [4].

Исследование поровых растворов нижнекембрийских глин показало, что в жидкой фазе присутствуют наиболее легко растворимые компоненты: $Na_2SO_4$, $MgSO_4$, NaCl, а также $CaSO_4$ и $Ca(HCO_3)_2$ Их минерализация составляет 1,80–3,19 г/дм$^3$ [122].

В случае серьезной аварии и разрушения ПЗРО возможен приток к упаковкам РАО вод из вышележащих водоносных горизонтов. По мере просачивания через пласты глин их начальный химический состав будет изменяться.

*Структурно-минералогическое окружение*

Удерживающие (барьерные) свойства глин определяются в основном их минералогическим составом, структурой и количеством мелкодисперсных пелитовых фракций с размерами частиц <0,005 мм.

**1)** Нижнекембрийские глины лонтоваской свиты

По сравнению с аналогичными формациями, выбранными для подземной изоляции РАО за рубежом [78], средние значения физико-химических параметров нижнекембрийских глин [17, 115, 142] не имеют существенных различий и характерны для этого типа пород:

| | |
|---|---|
| объемная масса | 2,15–2,22 г/см$^3$; |
| влажность | 14,07–16,47 %; |
| пористость | 28,2–32,6 %; |
| коэффициент фильтрации | $10^{-5}$–$10^{-7}$ м/сут. |

В табл. 23 приведен минералогический состав нижнекембрийских глин приповерхностной части разреза (10–30 м) на участке «Копорье» по данным разведочного бурения 1990 г. Основные глинистые минералы представлены гидрослюдами и каолинитом. В более поздних работах выделены три глинистых минерала: гидрослюды, каолинит и монтмориллонит, и глины отнесены к типу монтмориллонитово-гидрослюдистых [122]. В 2010 г. в образцах из Никольского карьера диагностированы (в порядке убывания): иллит, каолинит, хлорит [139]. В минералогических словарях термины иллит и гидромусковит (гидрослюда) рассматриваются как синонимы [54, 55], что позволяет определять нижнекембрийские глины как смешанные иллит-каолинит-хлоритовые.

Таблица 23

Минералогический состав нижнекембрийских глин на участке «Копорье»

| №№ проб | Класс < 0,005 мм, % | | Другие минералы (обломочные) |
|---|---|---|---|
| | Гидрослюды | Каолинит | |
| 1 | 88–89 | 11–12 | Кварц, гематит, гидрогематит, кальцит, сидерит, хлорит |
| 2 | до 80 | 18–20 | Кварц, плагиоклаз, кальцит, хлорит |
| 3 | 85–87 | 12–13 | Пирит, сидерит, кальцит, хлорит |
| 4 | 80–83 | 13–15 | Кварц, плагиоклаз, кальцит |
| 5 | 89 | 10 | Кварц, карбонаты, хлорит |

Содержание фракции с размерами частиц менее 0,005 мм варьирует от 30 до 60 %, и, как отмечалось выше, будет зависеть от соотношения в пробах пелитовых (глинистых) и алевритовых (песчаных) прослоев.

В таблице 24 приведен гранулометрический состав глин Никольского карьера [139]. Основными минералами пылеватой и глинистой фракций являются иллит и каолинит с примесью хлорита. В песчаной фракции основным минералом является кварц с примесью полевых шпатов.

Во фракции <0,005 мм присутствуют также карбонаты, глауконит, пирит. Последний часто образует тонкодисперсные темно-бурые пленки на плоскостях слоистости глин. На участке «Копорье» среднее количество тяжелых акцессорных минералов составляет около 0,04 %. Идентифицированы (кроме примесных пирита и сидерита) рутил, анатаз, циркон, гранат, турмалин, роговая обманка, биотит, ильменит, гематит. Магнитная фракция в тяжелых акцессорных минералах обычно отсутствует.

Таблица 24

Результаты гранулометрического анализа кембрийских глин (всего 183 образца) [139]

| Фракция | Диаметр частиц, мм | Содержание частиц, %, среднее (от–до) |
|---|---|---|
| Песчаная | 0,05–1,0 | 1,8 (0,1–4,8) |
| Пылеватая | 0,005–0,005 | 37,5 (28,9–53,1) |
| Глинистая | <0,005 | 60,5 (30,9–70,8) |

По своему химическому составу это малоглиноземистые глины с избыточным содержанием кремнезема, который сосредоточен в кварце алевритовой составляющей пород. Ранее в табл. 2 приведен химический состав тонкодисперсной фракции (класс <0,005 мм) нижнекембрийских глин Ленинградской области [41].
Химический состав песчаной и глинистой фракций нижнекембрийской глины Никольского карьера по результатам исследований 2010 г. приведен в табл. 25[139].

Таблица 25
Компонентный состав песчаной и глинистой фракций нижнекембрийских глин [139]

| Компонент | Фракционный состав, % | |
|---|---|---|
| | песчаная, 0,05–1,0 мм | глинистая, <0,005 мм |
| $SiO_2$ | 87,2 | 52,5 |
| $Fe_2O_3$ | 1,2 | 13,7 |
| $TiO_2$ | 1,0 | 1,1 |
| $Al_2O_3$ | 3,3 | 16,6 |
| MgO | <0,01 | 3,6 |
| MnO | 0,9 | 0,06 |
| $K_2O$ | 2,0 | 6,5 |
| $Na_2O$ | 0,7 | 4,5 |
| CaO | – | 0,4 |
| CuO | – | 0,3 |
| $Cr_2O_3$ | – | 0,05 |
| ZnO | – | 0,02 |
| NiO | – | 0,01 |
| S | 3,7 | 0,7 |

Нижнекембрийские глины являются анизотропной средой, неоднородность которой обусловлена чередованием в пласте отложений глинистых минералов с прослоями, обогащенными более крупными песчаными частицами. Слоистая структура породы определяет различие проницаемости глин по напластованию и перпендикулярно ему. Коэффициенты фильтрации в первом случае варьируют от $6{,}5\cdot10^{-5}$ до $3{,}9\cdot10^{-6}$ м/сут (среднее $1{,}8\cdot10^{-5}$), во втором – от $3{,}3\cdot10^{-5}$ до $1{,}6\cdot10^{-6}$ (среднее $7{,}6\cdot10^{-6}$ м/сут) [122]. Среднее значение анизотропии для этого параметра 2,4.
Аналогичная величина для Boom Clay равна 2 [85].
В публикации [122] для вертикальной фильтрации нижнекембрийских глин приведены и более низкие коэффициенты фильтрации - $1\cdot10^{-6}$–$1\cdot10^{-7}$ м/сут, с указанием, что меньшие значения наиболее вероятны (с.228).

Емкость катионного поглощения нижнекембрийских иллит-каолинит-хлоритовых глин сравнительно невелика и варьирует от 10,2 до 13,4 мг-экв на 100 г

породы. Катионообменная емкость монтмориллонитовых глин, как известно, составляет 80–150 мг-экв на 100 г породы.

Низкую емкость поглощения отдельные исследователи объясняют наличием в нижнекембрийских глинах органических соединений, которые образуют экранирующие пленки на тонкодисперсных минералах, снижающие их сорбционную и обменную способность [115]. Вместе с этим установлено, что сорбционную активность глин увеличивают пленки аморфных соединений железа [143].

Проведенные в 1990 г. в Радиевом институте исследования [22] показали, что нижнекембрийские глины обладают достаточно высокой сорбционной способностью относительно радионуклидов (табл. 26) .

Таблица 26

Оценки коэффициентов распределения радионуклидов для образцов глин из карьера «Красный Бор» [22]

| Радионуклиды | *Kd*, см$^3$/г |
|---|---|
| $^{90}$Sr | ~$10^2$ |
| $^{137}$Cs | ~ $10^2$ |
| $^{239}$Pu | ~ $10^4$ |
| $^{241}$Am | ~ $10^3$ |

По предварительным оценкам, время диффузионного переноса радионуклидов через слой глины мощностью в 1 м составит для стронция – 300 лет, цезия – 5 000 лет, плутония – 50 000 лет.

В соответствии с коэффициентами удержания скорость передвижения радионуклидов с просачивающимися водами будет в $10^2$–$10^4$ раз меньше скорости движения воды.

В случае возникновения направленного водного потока через зону ПЗРО, заполненную глинистым материалом, при скорости потока 0,7 м/год и гидравлическом градиенте (1,5–3,0) $\cdot 10^{-3}$ м/м максимальное распространение радионуклидов составит ~3,3 м через 600 лет [22].

Комплексные исследования, проведенные в начале 2000-х годов специалистами Санкт-Петербургского университета по оценке влияния атомно-промышленного комплекса г. Сосновый Бор на подземные воды и смежные природные объекты, показали высокие барьерные свойства нижнекембрийских глин. Расчеты вертикальной миграции радиоактивных растворов через пласт глин с коэффициентом фильтрации $1 \cdot 10^{-6}$–$1 \cdot 10^{-7}$ м/сут, пористостью 40 % и градиентом вертикального напора 1 м/м показали, что даже при отсутствии сорбционных процессов загрязнение за 10 000 лет проникнет в породу только на первые метры [122].

Ранее на материалах этого же района было показано влияние присутствия глин в четвертичных породах на величину *Kd* для цезия и стронция [144] (табл.27).

Таблица 27

Влияние примесей глин в песчано-суглинистых породах на величину *Kd* [144]

| Характер четвертичных пород | *Kd*, см$^3$/г | |
|---|---|---|
| | $^{90}$Sr | $^{137}$Cs |
| Песчано-суглинистые | 44–86 | 13–96 |
| Глинистые разности | до 220 | до 3 300 |

Коэффициент распределения *Kd* является основным количественным параметром, характеризующим барьерные свойства горной породы. Для того, чтобы получить лабораторные данные, наиболее соответствующие реальным сорбционно-барьерным свойствам глин в естественном залегании, необходимо использование соответствующих методик.

В большинстве исследований для определения *Kd* глины размельчают, переводят в форму водной суспензии, добавляют изучаемый радионуклид, выдерживают систему для достижения сорбционного равновесия, и после разделения жидкой и твердой фаз определяют в них содержания радионуклида [22, 122]. Метод имеет много недостатков, главный из которых – нарушение первичной структуры (дезинтеграция минеральных скелетных агрегатов, разрушение пор и пр.). Кроме того, в экспериментах используются очень малые (миллиграммовые) образцы глин и очень низкое по сравнению с монолитными образцами отношение твердой и жидкой фазы.

Более корректными являются фильтрационные опыты (percolation experiment) с использованием образцов глин с ненарушенной структурой [87]. Однако и они имеют методические недостатки, поскольку в лаборатории сложно создать такие же условия, как в пласте коренного залегания породы. Даже элементарное извлечение керновых проб при бурении снимает литостатическое давление, изменяя при этом существующую порово-трещинную систему породы.

В 2009 году в Радиевом институте была разработана унифицированная неразрушающая методика для определения параметров миграции радионуклидов в глинах [145]. Через образцы глин толщиной 1–2 см всасывающим давлением испарительного фильтра создавался поток жидкой фазы со скоростью 0,005–0,05 мл/сут. Вынесенные фильтратом подвижные формы радионуклидов (растворимые и коллоидные) улавливаются на испарительном фильтре и определяются радиометрически. Получаемая зависимость процента вымывания $^{85}$Sr от объема дренированного раствора позволяет рассчитать квазиравновесный (эффективный) коэффициент распределения между твердой фазой глины и поровым раствором.

Для компактных образцов нижнекембрийских глин (Никольский карьер, Ленинградская область) для $^{85}$Sr получена величина *Kd* = 80 мл/г, что примерно в два раза превышает аналогичный параметр, полученный для эксперимента с суспензией измельченного образца – 42,4 мл/г.

Рассчитанный по данным нового метода коэффициент задержки *R*=516. За 300 лет (время полного распада стронция) этот радионуклид переместится по глине менее чем на 1 см [145].

В 2010 году была изучена анизотропия нижнекембрийских глин при диффузионном переносе радионуклидов [139]. Комплексный анализ физико-химических и минералогических свойств проведен на монолитном образце из Никольского карьера (на глубине 30 м от кровли пласта) с размерами 46 × 28 × 20 см. Продолжительность эксперимента составила 510 сут. Экспериментальное моделирование диффузионного переноса радионуклидов (табл. 28) подтвердило ранее отмечаемую анизотропию глин, связанную с их стратификацией. При этом коэффициент анизотропии для $^{90}Sr$ достигает 6.

Таблица 28

Параметры коэффициентов молекулярной диффузии (D) для монолита нижнекембрийских глин [139]

| Радионуклид | D, $см^2/с$ | | Коэффициент анизотропии |
|---|---|---|---|
| | параллельно слоистости | перпендикулярно слоистости | |
| $^{36}Cl$ | $3{,}15\cdot10^{-10}$ | $9{,}55\cdot10^{-11}$ | 3,3 |
| $^{90}Sr$ | $3{,}79\cdot10^{-11}$ | $6{,}32\cdot10^{-12}$ | 6 |
| $^{60}Co$ | $5{,}25\cdot10^{-12}$ | $2{,}1\cdot10^{-12}$ | 2,5 |

Литологическая неоднородность нижнекембрийских глин будет определять размеры и форму радиоактивного ореола (барьерной зоны), которая может образоваться в случае утечки радионуклидов за пределы ПЗРО [146].

**2)** Верхневендские глины котлинского горизонта

В подошве нижнекембрийских глин расположен ломоносовский водоносный горизонт, который перекрывает, в свою очередь, водоупорный пласт верхневендских глин котлинского горизонта (табл.19).

По минералогическому составу – это иллит-каолинитовые глины с примесью хлорита. Для площадки ЛСК «Радон» вариации состава в интервале глубин 20,1–127,7 м составляют [17]:

иллит 35–76 %;
каолинит 16–61 %;
хлорит 3–8 %.

Содержание фракции с размерами частиц менее 0,005 мм варьирует от 15,9 до 63,9 %.

Влажность (для этой же площадки) составляет 11-19 %. Химический состав: $SiO_2$ > 50%, $Al_2O_3$ >15 %, $Fe_2O_3$ >5 %, $Na_2O$ – до 2 %, MgO – до 6 %.

Величина емкости катионного поглощения в пределах от 3,0 до 10,7 мг–экв/100 г, что несколько ниже, чем для нижнекембрийских глин. В табл. 29 приведены значения емкости поглощения для глин площадки ЛСК «Радон» по глубине опорной скважины № 1 [17].

Таблица 29

Величина емкости катионного поглощения
вендских глин площадки ЛСК «Радон», скв. № 1 [17]

| Интервал, м | Емкость поглощения, мг-экв/100 г |
|---|---|
| 20,50–20,65 | 6,0 |
| 36,80–36,95 | 5,3 |
| 48,45–48,60 | 9,0 |
| 58,20–58,35 | 7,5 |
| 65,95–66,10 | 5,3 |
| 77,00–77,15 | 6,8 |
| 88,30–88,45 | 8,3 |
| 97,90–98,05 | 5,3 |
| 111,45–111,60 | 3,0 |
| 117,95–118,05 | 0,8 |
| 133,25–133,40 | 4,5 |

Лабораторные эксперименты показали достаточно высокие барьерные свойства верхневендских глин по отношению к радионуклидам (табл. 30) [17].

Таблица 30

Коэффициенты распределения для вендских глин.
Площадка ЛСК «Радон», скв. №1 [17]

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

Безусловным преимуществом верхнекотлинских глин является возможность строительства подземного ПЗРО на промплощадке Ленинградского отделения филиала СЗТО ФГУП «РосРАО», что исключает сложную процедуру изъятия земель в Ломоносовском районе Ленинградской области.

### *5.1.1.5. Развитие концепции строительства ПЗРО в глинах Ленинградской области.*

Наличие в Ленинградской области мощного пласта глинистых пород не могло не привлечь внимание специалистов, занимающихся проблемами РАО. Особое значение поиск перспективных площадок приобрел в середине 80-х годов, что было связано с требованиями модернизации и расширения возможностей ленинградского спецкомбината «Радон», а также появлением больших количеств

РАО после аварии на Чернобыльской АЭС. В 1988 г. специалисты предприятия «Невскгеология» и Радиевого института представили для рассмотрения комиссии Леноблисполкома 24 участка, пригодных для проведения начальных этапов разведочных работ по строительству приповерхностного хранилища РАО в пласте нижнекембрийских глин. В феврале 1991 г. Ленинградским отделением Ядерного общества СССР проведен семинар по теме «Радиационная обстановка и захоронение радиоактивных отходов в Ленинградском регионе», на котором специалисты Радиевого института представили основные положения геологической концепции подземной изоляции РАО, а также результаты лабораторных исследований нижнекембрийских глин [147].

В 1992 г. специалистами Высшего военно-инженерного строительного училища им. А. Н. Комаровского разработаны «Технические предложения по созданию региональной системы обращения с РАО» [109]. Предложения разрабатывались по инициативе Ленинградского спецкомбината «Радон» и были ориентированы на вариант хранилища емкостью 20 000 м$^3$, размещенном в пласте нижнекембрийских глин на глубинах 50–60 м. Было установлено, что наиболее предпочтительным является подземный комплекс с горизонтальными или наклонными входными участками, не пересекающими водоносные горизонты. При этом используются апробированные конструкции подземных станций Ленинградского метрополитена, перегонных тоннелей, узлов примыкания, съездов и входных участков. Для оценки приемлемости подземного варианта хранилища проанализированы результаты гидрогеологических исследований на участке Котлы – Копорье – Глобицы, проведенные партией эколого-геохимических исследований Опытно-методической экспедиции Министерства геологии. Приведены общие сведения о Ломоносовском водоносном горизонте в 30-километровой зоне ЛАЭС, геологические и гидрогеологические разрезы по данным структурно-гидрогеологических скважин, разбуренных в районе г. Котлы (скв. №№ 839,472), п. Подозвонье, расположенного в 3 км к юго-востоку от п. Копорье (скв. № 552) и в с. Усть-Рудица (скв. № 656).

В конце 1992 года в г. Апатиты состоялась Международная конференция «Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики» - первая в отечественной практике научная конференция такого направления. Радиевым институтом был представлен доклад «О возможности создания хранилища радиоактивных отходов в залежах глин Ленинградской области» [22].

В докладе приводились результаты исследований глин и практические предложения по строительству хранилища.

- Наиболее приемлемым решением по выбору места расположения и типу хранилища предлагается считать подземное хранилище в пласте низкопроницаемых нижнекембрийских глин.
- В относительно густонаселенной Ленинградской области с неблагополучной радиационно-экологической обстановкой необходимо ужесточить требования к выбору площадки, формам отходов, свойствам вмещающих горных пород.
- Подземное хранилище должно быть построено таким образом, чтобы новая геотехнологическая система не нарушала закрытости существующей природной подсистемы.

- Для сооружения хранилища может быть использован метод проходки, принятый в метростроении, с включением в систему изоляции дополнительных геохимических барьеров.
- Для удаления низко- и среднеактивных отходов региона необходим полезный объем хранилища тоннельного типа 200–500 тыс. $м^3$, с наклонным въездом трейлеров со стандартными бетонными контейнерами.
- Лабораторные исследования, проведенные в Радиевом институте, показали, что нижнекембрийские глины обладают значительной сорбционной способностью относительно радионуклидов, и в соответствии с коэффициентом удержания скорость продвижения радионуклидов с просачивающимися водами будет много меньше скорости просачивания воды, дальность распространения радионуклидов от места локализации не превысит 3,3 м через 600 лет после размещения РАО.
- Безопасность подземной локализации может быть усилена созданием дополнительных инженерных барьеров на основе бентонитовых глин.
- В качестве первой очереди строительства пункта локализации РАО должна быть создана подземная исследовательская лаборатория, по результатам натурных экспериментов которой будут корректироваться дальнейшие этапы работ.

В 1993 году, после привлечения к работам специалистов ВНИПИЭТ было разработано технико-экономическое обоснование строительства пункта захоронения РАО в нижнекембрийских глинах [148]. Проектируемый ПЗРО предствляет собой подземную выработку спирального типа, в которой одна часть предназначена для захоронения короткоживущих отходов, а другая – для временного хранения долгоживущих.

Основным негативным фактором строительства хранилищ в пласте нижнекембрийских глин является размещение последнего над горизонтом пресной питьевой воды ломоносовского горизонта. В то же время расчёты, выполненные английскими специалистами AEA T, подтвердили, что при условии однородности геологической среды можно гарантировать высокую надёжность локализации радионуклидов [149].

В конце 90-х гг. на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского государственного горного института им. Г. В. Плеханова (СПГГИ) проведена инженерно-геологическая и геоэкологическая оценка условий захоронения промышленных отходов в нижнекембрийских глинах Ленинградской области [22, 115]. Авторы исследований ставят под сомнение ранее полученные данные, характеризующие глины как перспективную среду подземной изоляции и проект размещения хранилища вблизи п. Копорье, разработанный «специалистами Минатома, Правительства Ленинградской области, Радиевого института, ВНИПИЭТ для захоронения радиоактивных отходов». Специалистами СПГГИ предложен комплекс дополнительных инженерно-геологических критериев, учитывающих результаты новых исследований нижнекембрийских глин.

В 1997 г. концептуальный проект регионального могильника Северо-Западного региона разрабатывался в рамках проекта TACIS финской фирмой “IVO PE LTD” совместно с французской фирмой “SGN” и английской “AEA Technology” при участии ФГУ «ГИ «ВНИПИЭТ» и АО «Ленметрогипротранс». Для изоляции РАО предлагалось создание подземных камер большого объема [150].

В 2003 г. опубликованы результаты исследований большого коллектива учёных Межфакультетского научно-исследовательского центра гидрогеоэкологии Санкт-Петербургского государственного университета по оценке влияния атомно-промышленного комплекса г. Сосновый Бор Ленинградской области на подземные воды и смежные природные объекты (Ломоносовский район, северные части Кингисеппского, Волосовского и Гатчинского районов) [122]. В монографии обобщены результаты комплексного гидрогеологического и радиоэкологического мониторинга подземных вод области и связанных с ними компонентов природной среды – поверхностные воды, приземный воздух, атмосферные выпадения и пр. Приведены результаты экспериментальных лабораторных и натурных испытаний, необходимые для математического моделирования миграции радионуклидов в водоносных горизонтах.

В работе рассмотрены геологические среды, перспективные для подземного хранения РАО: котлинские глины верхнего венда и нижнекембрийские глины лонтоваского горизонта. Оцениваются возможности сооружения в них подземных хранилищ РАО. По результатам проведенных региональных гидрогеологических исследований [122] в пределах 30-километровой зоны ЛАЭС возможно создание комплекса подземного хранения РАО в верхневендских и нижнекембрийских глинах. Для принятия решений необходимы детальные геологические, гидрогеологические и инженерно-геологические изыскания.

Использование пласта верхневендских глин непосредственно под площадкой ЛСК «Радон» имеет ряд преимуществ по сравнению с площадкой «Копорье» в нижнекембрийских глинах [150]:

- значительная часть РАО транспортируется в пределах промзоны г. Сосновый Бор;
- для строительства и эксплуатации ПЗРО существует инфраструктура промзоны;
- исключается необходимость нового землеотвода в Ломоносовском районе;
- ПЗРО в верхневендских глинах располагается ниже Ломоносовского водоносного горизонта.

Подземная изоляция РАО в пластах верхневендских или нижнекембрийских глин позволит [150]:

- повысить экологическую безопасность региона за счет ликвидации значительного числа временных площадок наземного хранения РАО;
- отказаться от строительства дорогостоящих наземных хранилищ нового поколения для эксплуатационных РАО и РАО, образующихся при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии в регионе;
- значительно повысить безопасность изоляции РАО по сравнению с наземными хранилищами.

В 2004 году началась совместная разработка «Концепции и программы создания пункта захоронения радиоактивных отходов в Ленинградской области ФГУП «ГИ «ВНИПИЭТ» и шведской фирмой “SKB SIP” [150]. Концепция подразумевает создание как приповерхностного, так и подземного вариантов захоронения РАО.

В 2005-2007 гг. инженерно-геологические и гидрогеологические исследования вендских и кембрийских глин были проведены специалистами Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии РАН, Санкт-Петербургского университета, ЛСК «Радон» и НИТИ им. А. П. Александрова [151]. Исследования

проведены на нескольких участках на образцах, отобранных из подземных и наземных горных выработок, а также скважин.

В публикации (доклад на II Международном ядерном форуме) представлены:

1) краткие сведения о геологическом строении района распространения глинистых толщ;
2) характеристика фактического материала;
3) изменчивость гранулометрического состава, водно-физических свойств вендских глин;
4) деформационные и прочностные свойства вендских глин;
5) состав, водно-физические и физико-механические свойства кембрийских глин;
6) структурные особенности глинистых толщ;
7) диффузионные и сорбционные свойства кембрийских глин.

Авторы доклада отмечают, что дискуссионный характер проблемы использования глинистых пород региона для подземной изоляции РАО требует продолжения исследований по изучению и детализации свойств вендских и кембрийских глин. Позднее, в 2007–2009 гг. комплексные инженерно-геологические и гидрогеологические исследования вендских и кембрийских глин были продолжены и расширены [17].

В Федеральной целевой программе «Обращение с радиоактивными отходами и отработавшими ядерными материалами, их утилизация и захоронение на 1996–2005 годы» в качестве одной из основных задач было определено создание регионального центра кондиционирования и захоронения РАО на базе Ленинградского специализированного комбината «Радон» (Подпрограмма 10) [152].

В последующие годы и до настоящего времени специалисты ФГУП «ГИ «ВНИПИЭТ» развивают концепцию надежной изоляции и долговременного хранения РАО в регионе, обращая особое внимание на характеристики инженерных барьеров, а также на технико-экономическую оценку различных вариантов ПЗРО [153–156].

В докладе на III Международном ядерном форуме (2008 г) в качестве основных разработок выделены [155]:

- технико-экономическая оценка (ТЭО) строительства площадки захоронения короткоживущих РАО и долговременного хранения долгоживущих отходов в Ленинградской области, по результатам которой был предложен подземный тип конструкции могильника, а также разработан концептуальный проект строительства подземного сооружения спирального типа;
- концептуальный проект регионального могильника РАО подземного типа в виде камер большого объема, разработанный в рамках проекта TACIS, финской фирмой IVO PE LTD в консорциуме с французской фирмой SGN и английской фирмой AEA Technology при участии ФГПУ «ГИ «ВНИПИЭТ» и Ленметрогипротранс;
- концепция создания регионального пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) в Ленинградской области в консорциуме с фирмой SKB International Consultants AB (Швеция) и при участии экспертов фирмы DBE Technology (Германия).

Рассмотрены различные варианты строительства ПЗРО – наземный, подземный камерный и подземный тоннельный. В последнем варианте строительство производится высокопроизводительным горнопроходческим щитом.

Для принятия решений требуются дополнительные, в первую очередь комплексные геологические исследования как нижнекембрийских, так и вендских глин верхнекотлинского горизонта.

В июне 2009 г. по инициативе руководства Северо-Западного территориального округа ФГУП «РосРАО» состоялось координационное совещание [157], на котором после обсуждения сообщений представителей ОАО ГИ «ВНИПИЭТ» и НПО «Радиевый институт им.В.Г.Хлопина» по проблеме создания регионального могильника было разработано предложение:

«Региональный объект окончательной изоляции низко- и среднеактивных РАО в Ленинградской области на базе филиала СЗТО ФГУП «РосРАО».

Предложение отмечает, что предпосылками строительства являются:

- степень заполнения временных хранилищ более 70%;
- количество накопленных РАО в Ленобласти более 100 000 м$^3$;
- прогнозируемый объем накопленных РАО к 2030 г. до 250 000 м$^3$;
- благоприятные геолого-гидрологические условия;
- наличие кадровых, производственных и научных ресурсов;
- наличие уникальных технологий строительства подземных сооружений (опыт метрополитена);
- предпроектная проработка нескольких концепций регионального ПЗРО, подтверждающая техническую осуществимость задачи.

Подтверждаются преимущества подземного варианта захоронения РАО, поскольку в его пользу свидетельствуют:

- усиление радиационной безопасности объекта;
- снижение требований к предварительной сортировке РАО в условиях неопределенности состава некоторых видов РАО, накопленных в предшествующие периоды;
- снижение степени воздействия природных и техногенных факторов;
- снижение степени уязвимости в случае несанкционированного проникновения (включая террористические акты) на объекты, содержащие РАО;
- смягчение психологической напряженности населения при сравнительной оценке с наземным вариантом.

На основе представленных данных сформированы консолидированные предложения – концепция по созданию регионального объекта в регионе. Для отработки технологии подземной изоляции в промышленном масштабе реализуется пилотный проект в режиме пробно-опытной эксплуатации.

Концепция создания пункта захоронения низко- и среднеактивных РАО в Ленинградской области получила дальнейшее развитие в обобщенных материалах НПО «Радиевый институт», Институт геоэкологии РАН, ГИ ВНИПИЭТ, представленных в 2010 г. СЗТО ФГУП «РосРАО» [158].

Отмечается, что «дальнейшее строительство временных хранилищ - деструктивный и тупиковый путь развития отрасли». Избежать его возможно лишь при создании ПЗРО емкостью не менее 250 000 м$^3$.

Требуемые объемы связаны как с уже имеющимися, так и образующимися в ближайшей перспективе РАО:

- на 2010 г. в регионе накоплено 140 000 м$^3$ радиоактивных отходов;
- на 2015 г. прогнозируется 150 000 м$^3$ РАО;

- 70-80 % накопленных РАО находятся во временных хранилищах ЛАЭС и «РосРАО»;
- при выводе из эксплуатации 4 блоков ЛАЭС-1 без развития новых технологии образуетсяч до 100 000 $м^3$ РАО;

В Северо-Западном территориальном округе на 2009 год наиболее высокая степень проработки у концепции ПЗРО в глинах Ленинградской области, но для её развития требуются детальные предпроектные изыскания и подготовка ОБИН (Обоснование инвестиций).

В концепции ПЗРО учитываются следующие геологические критерии:

- устойчивость геологических формаций различных регионов к тектоническим, геоклиматическим и техногенным воздействиям;
- физико-механические и фильтрационно-миграционные свойства вмещающих горных пород;
- возможность влияния водоносных горизонтов;
- время безопасной эксплуатации ПЗРО – не менее 500 лет.

По имеющимся результатам исследований:

- вендские котлинские глины (Сосновый Бор) и кембрийские глины (Копорье) имеют близкие свойства по основным параметрам, что позволяет расматривать две потенциальные площадки на участкх «Копорье» и «Радон» (рис. 19);
- на глубинах свыше 50 м приемлемость глиняных формаций района определяется:
  - высокой естетсвенной плотностью и малой сжимаемостью;
  - коэффциентами фильтрации до $10^{-6}$ м/сут;
  - отсутствием трещиноватости;
  - коэффициентами диффузии радионуклидов от $10^{-5}$ до $10^{-7}$ $м^2$/сут;
- по результатам Центра ядерных исследований Бельгии верхневендские и нижнекембрийские глины приемлемы для строительства ПЗРО на глубинах 40-60 м;
- в регионе имеется огромный опыт проходки подземных горных выработок в глинах изучаемых формаций, их защиты от геодинамических и тектонических воздействий и гидроизоляции (метрополитен Санкт-Петербурга);
- Результаты предпроектных работ ГИ ВНИПИЭТ по обоснованию технической возможности реализации строительства ПЗРО подземного типа в глинах Ленинградской области подтверждены специалистами DBE (Германия), ANDRA (Франция), COVRA N.V. (Нидерланды), SKB (Швеция), NDA (Великобритания).

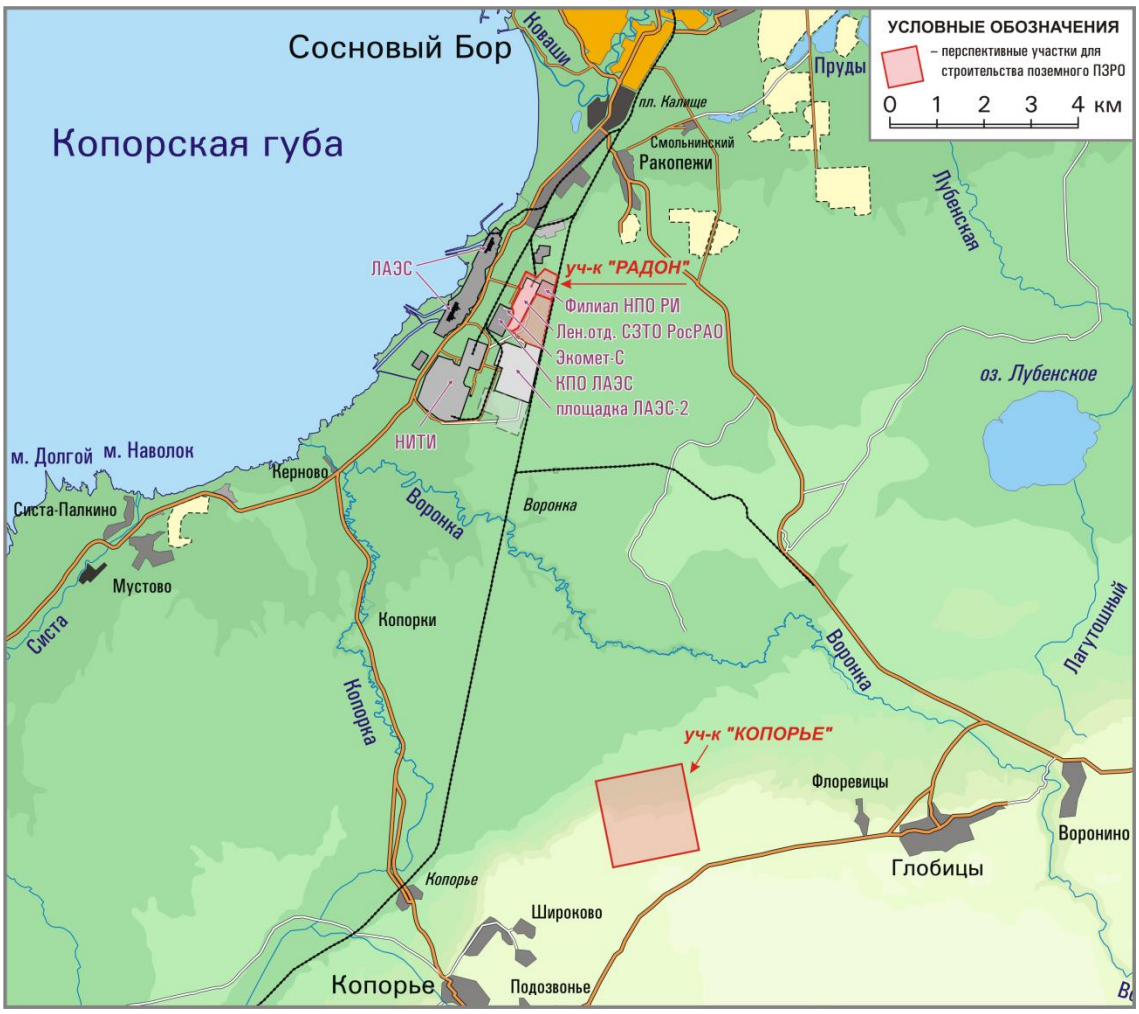



Рис. **19**. Расположение площадок, перспективных для строительства ПЗРО в верхневендских (участок «ЛСК «Радон») и нижнекембрийских (участок «Копорье») глинах (по данным работ [142, 158]).

Выводы отечественных и зарубежных специалистов о пригодности верхневендских и нижнекембрийских глин для строительства ПЗРО не означают наличие достаточных фактических данных, характеризующих разновозрастные глины в качестве среды для безопасной изоляции РАО.

Очевиден факт, что в Ленинградской области в районе, насыщенном ядерными и радиационными объектами, существует уникальная геологическая ситуация – наличие мощных пластов глин, залегающих вблизи поверхности или даже вскрытых рельефом, в которых шахтным или тоннельным способом возможна проходка горных выработок для строительства хранилищ РАО. Разработаны различные варианты сооружения ПЗРО, однако целый ряд вопросов остается нерешенным, в первую очередь связанных с проведением инженерно-геологических изысканий на выбранной площадке, а в дальнейшем – с осуществлением натурных испытаний массива глинистых пород.

Продолжается сравнительный анализ наземного и заглубленного вариантов ПЗРО (табл. 31) [159].

Таблица 31

Сравнительный анализ различных типов ПЗРО [159]

| **Фактор** | **Наземный ПЗРО** | **Заглубленный ПЗРО** |
|---|---|---|
| 1. Характеристика кондиционированных отходов | Срок потенциальной опасности отходов будет определяться наличием долгоживущих радионуклидов, что может быть критичным для захоронения в наземном ПЗРО. Требуются дополнительные исследования радионуклидного состава отходов, извлекаемых из сущестующих хранилищ | |
| 2. Характеристика предполагаемых мест размещения пункта захоронения РАО | Наиболее предпочтительное место находится в Предглинтовой низменности в урочище Кастицкое между пп. Копорье и Глобицы. Необходимо проведение процедуры отвода земли (примерно 45 га) | Предполагаемое место размещения находится на территории, подведомственной Госкорпорации Росатом. ПЗРО предлагается разместить в толще котлинских глин, залегающих на глубине 60–70 м |
| 3. Техническая осуществимость | Имеются аналоги: эксплуатируемые хранилища в Испании и Франции, разработан проект для Литвы. Опыта эксплуатации ПЗРО в климатической зоне, аналогичной Северо-Западному региону – нет | Имеется многолетний опыт строительства Санкт-Петербургского метрополитена в аналогичных условиях |
| 4. Безопасность захоронения для населения, персонала и влияние на окружающую среду при нормальных условиях эксплуатации ПЗРО и авариях. | Безопасность захоронения обеспечивается только инженерными барьерами и зависит от проектных решений, качества строительных работ, влияния природных факторов на эволюцию инженерных барьеров | Безопасность захоронения обеспечивается совокупностью инженерных и природных барьеров. Залежи глин, возраст которых более 500 млн. лет, характеризуются низкой водопроницаемостью, высокими коэффициентами задержки радионуклидов |
| 5. Чувствительность к природным и техногенным воздействиям | Наземный ПЗРО наиболее чувствителен к природным и техногенным воздействиям, а также террористическим актам | Заглубленный ПЗРО наиболее безопасен в отношении природных и техногенных воздействий |
| 6.Потребность в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах | Требуется разработка предварительных и окончательных критериев приемлемости РАО для захоронения в наземном и заглубленном ПЗРО, проведение геологических изысканий и полномасштабных исследований безопасности, разработка нестандартного оборудования для проведения транспортных операций | |
| 7.Наличие законодательной и нормативной базы | Федеральный закон «Об обращении с радиоактивными отходами» (в стадии рассмотрения в Государственной думе); Федеральные нормы и правила: НП-055-04, НП-058-04, НП-060-05, НП-069; Руководства по безопасности: РБ-011-2000, РБ-023-02; ГОСТ: Р52037-2003 | |
| 8.Экономичность | Инвестиционные затраты на создание 1 очереди ПЗРО в ценах I кв. 2008 г.– 2040 млн. руб. | Инвестиционные затраты на создание 1 очереди ПЗРО в ценах I кв. 2008 г. – 3957 млн. руб. |
| 9.Социально-экономический | Благоприятные факторы: снижение радиационного риска, образование новых рабочих мест, налоговые отчисления в местный бюджет. До начала проектирования должны быть проведены общественные слушания | |
| 10.Военно-политический | Повышение национальной безопасности. Соблюдение требований международной конвенции по обращению с ОЯТ и РАО | |

С учетом неопределенности радионуклидного состава накопленных РАО (наличие долгоживущих радионуклидов) и климатических условий Северо-Западного региона наибольшей степени безопасности отвечает вариант заглубленного ПЗРО [159].

### *5.1.1.6. Подземные исследовательские лаборатории*

Необходимо отметить, что большинство предлагаемых вариантов концепции подземной изоляции РАО в глинах Ленинградской области не затрагивают вопросы создания подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). О необходимости проведения натурных испытаний и строительства ПИЛ, как первой очереди всего геотехнологического комплекса, говорится лишь в работах Радиевого института [22, 142, 147].

Многолетняя мировая практика выделила подземные исследовательские лаборатории как обязательную составную часть геотехнологического комплекса подземной изоляции радиоактивных отходов [82]. В различных горных породах (глинах, гранитоидах, каменной соли) создавались и создаются в наше время ПИЛ, наиболее известные из которых были сооружены в конце 70– начале 80–х годов прошлого столетия в Бельгии, Германии, США, Франции, Швейцарии, Швеции. Сооружение ПИЛ требует значительных затрат (до сотен миллионов долларов), однако их количество достаточно велико (табл. 32) [82], и строительство новых ПИЛ продолжается.

По результатам комплексных программ натурных испытаний зарубежных ПИЛ:

- оцениваются природные и инженерные барьеры, возможности использования новых изолирующих материалов;
- определяются условия приемлемости различных форм и упаковок РАО с облицовочными материалами горных выработок и горными породами;
- устанавливается стабильность подземных сооружений, технология использования буферных и закладочных материалов;
- уточняются параметры миграции водных растворов и газов во вмещающей геологической среде;
- проверяются и корректируются математические модели условий подземной изоляции РАО;
- разрабатывается долгосрочный прогноз безопасности ПЗРО;
- корректируется и принимается окончательный выбор строительной площадки ПЗРО;

Таблица 32

Подземные исследовательские лаборатории [82]

| Страна | Местонахождение | Название/тип установки | Грунт, глубина размещения | Годы эксплуатации |
|---|---|---|---|---|
| Бельгия | Вблизи Центра ядерных исследований в Моле | HADES-URF (Underground Research Facility), PRACLEY | Пластичная глина, 225 м | С 1980 |
| Германия | Ассе | Испытательная галерея в соляной шахте | Соляной купол, 875 м | 1977–1995 |
| | Горлебен | URL (Underground Research Laboratory) испытательная галерея | Соляной купол, 840 м | 1997 (в настоящее время работы прекращены) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Конрад | Испытательная галерея в железорудной шахте | Оолитовый известняк с залежами железных руд, 800–1300 м | С 1980 |
| Канада | Вблизи Центра ядерных исследований в Уайтшелле (Лак-де–Боне, пров.Манитоба) | URL | Гранит, 250 м | С 1984 |
| США | Невадский испытательный полигон | CLIMAX | Гранит | 1978-1983 |
| | Невадский испытательный полигон | G-тунель | Туф | С 1993 |
| | Карлсбад, шт. Нью-Мексико | WIPP | Соляные пласты, 650 м | С 1982 |
| | Горный массив Юкка-Маунтин | ESF (Exploratory Studies Facility) | Туф, 305 м | С 1993 |
| | Горный массив Юкка-Маунтин | Бастед Бьют | Туф | С 1997 |
| Финляндия | Олкилуото | Исследовательский тунель | Гранит, 70–100 м | С 1993 |
| | Округ Еурайоки, вблизи АЭС «Олкилуото» | ONKALO, исследовательский тунель | Гранит 420–520 м | Начало строительства в 2004 г. |
| Франция | Фаней | Галерея в урановой шахте | Гранит | 1980–1990 |
| | Амели | Галерея в соляной шахте | Соляной пласт | 1986–1994 |
| | Турнемир | Испытательные галереи | Сланцеватая глина, 300 м | С 1995 |
| | Кантон Бюре (вблизи Бар-де-Дюк, деп. Мёз–Верхняя Марна | | Глина, 500 м | Ведется строительство |
| Швейцария | Гримзель, Альпы | GTS (Grimsel Test Site) в туннеле дамбы | Гранит | С 1983 |
| | Мон Терри, кантон Юра | Галереи в дорожном туннеле | Сланцеватая глина, 300 м | С 1995 |
| Швеция | Стрипе | Галерея в железорудной шахте | Гранит | 1976–1992 |
| | О.Эспе | HRL (Hard Rock Laboratory) | Гранит, ~500 м | С 1990 |
| Япония | Вблизи Геологического научного центра в Тоно, преф. Гифу | Галереи в урановой шахте | Песчаник | С 1986 |
| | Камаиси | Галереи в железо-меднорудной шахте | Гранит, 300 м, 700 м | 1988–1998 |
| | Мицунами | Исследовательский туннель | Гранит, 1000 м | 2009 (проходка шахтного ствола начата в 2002) |
| | Вблизи г. Хоронобе на о. Хоккайдо | Исследовательский туннель | Осадочная порода, 500 м | 2010 (проходка ствола шахты начата в 2005) |

Весьма существенно, что ПИЛ представляют широкую возможность общедоступно и наглядно продемонстрировать населению и общественности технологию обеспечения безопасности подземной изоляции РАО.

Только в условиях подземной лаборатории, при которых исследования проводятся в местах естественного залегания горных пород, возможно наиболее корректное проведение экспериментов по таким сложным вопросам, как условия миграции радионуклидов (трассерные испытания), непосредственные оценки взаимодействия инженерных барьеров с вмещающей геологической средой.

По результатам комплексных испытаний подземных лабораторий обосновано выделение «зон экстраполяции», определяющих возможности проведения горных работ по увеличению размеров хранилища на выбранных площадках.

Натурные испытания могут разрешить противоречия, возникающие у различных исследователей при общих оценках геологической среды или по результатам конкретных лабораторных экспериментов.

Крупные международные программы, выполненные в ПИЛ, позволили привлечь к исследованиям специалистов различных научных направлений, использовать современную аппаратуру, что, несомненно, повлияло на формирование доверия населения к проектам геологических хранилищ.

ПИЛ создаются:

- как самостоятельные исследовательские центры;
- как первая очередь ПЗРО;
- как пилотный комплекс на базе приповерхностных горных выработок и скважин.

В концепции удаления РАО в геологические формации должно присутствовать создание подземной лаборатории, по результатам испытаний в которой будет принято окончательное решение о строительстве ПЗРО.

В 2010 году определилась наиболее вероятная площадка строительства регионального хранилища – территория хранилищ Ленинградского отделения филиала СЗТО РосРАО (площадка ЛСК «Радон»). По этому варианту ПЗРО будет размещен в толще слоистых верхневендских глин котлинской свиты на глубине 65–80 м от поверхности.

Объем геологической и иной информации, имеющейся к настоящему времени по участкам и горным породам (глинам) в районе Соснового Бора позволяет сделать вывод, что здесь возможно захоронение, как минимум, многих десятков тысяч кубометров короткоживущих НАО и САО. Однако возможность захоронения здесь долгоживущих РАО, в том числе содержащих радионуклиды с высокой способностью к миграции, требует серьезного обоснования.

Предметом дискуссии является и общий объем НАО и САО, который допустимо захоронить на рассматриваемых участках. Имеющаяся в настоящее время информация позволяет сделать оптимистические предположения на этот счет, но она недостаточна для доказательств безопасности. Более того, основные параметры миграции радионуклидов в глинах, полученные в лабораторных условиях, несут лишь оценочный характер и в силу особенностей глины как горной породы, могут существенно отличаться от параметров в реальной геологической среде захоронения. В свою очередь параметры в реальной среде можно получить, лишь проведя эксперименты *in situ*.

Еще одним аспектом, который сложно адекватно оценить в условиях обычной лаборатории, является вопрос изменений, которые вносит в геологическую среду построенный ПЗРО, а также вопрос геохимических и гидрогеохимических взаимоотношений между всеми компонентами геотехнологической системы захоронения РАО. Строительство подземного объекта нарушает естественную среду и изменяет ее состав: проходка подземных выработок создает зоны нарушений и воздействий в горной породе и может изменить направление и скорости движения подземных вод; недостаточная или деградировавшая со временем гидроизоляция ПЗРО может привести к прямому взаимодействию подземных вод с различными материалами инженерных барьеров и т.д. Все эти процессы, безусловно, медленные, но их правильная оценка необходима при захоронении как долгоживущих РАО, так и больших объемов радиоактивных отходов вообще.

Всё вышесказанное показывает, что получить строго обоснованную оценку количеств РАО, которые можно захоронить в данном месте и в данной толще горных пород, равно как и обеспечить правильный выбор материалов инженерных барьеров, можно лишь на основе данных, полученных в строго соответствующих условиях.

Критерии приемлемости РАО для подземного захоронения не могут быть определены без четкого понимания этих условий и без практических знаний о поведении как радионуклидов, так и веществ, из которых выполнены инженерные барьеры, в конкретных физико-химических условиях геологической среды захоронения.

Создание подземной исследовательской лаборатории позволит:

1) получить данные, обосновывающие возможность захоронения здесь долгоживущих РАО;
2) дать обоснованную оценку общего количества РАО, допустимого к захоронению в районе г. Сосновый Бор;
3) оценить роль тектонических нарушений в толще глин как возможных каналов миграции радионуклидов;
4) проанализировать, насколько параметры миграции радионуклидов в глинах, полученные в лабораторных условиях, соответствуют параметрам в реальной геологической среде на глубине заложения могильника с целью использования полученных данных для глин других типов, представленных в районах расположения различных объектов использования атомной энергии;
5) оценить пригодность материалов различных матриц РАО и иных инженерных барьеров к использованию для захоронения в данном типе глин;
6) разработать строго обоснованные критерии приемлемости РАО к захоронению в ПЗРО площадки «Радон»;
7) исследовать изменения, которые произошли в закрепном пространстве в результате используемых технологий проходки и обделки подземных выработок, а также (путем длительного мониторинга) изменений свойств геологической среды со временем;
8) исследовать процессы изменений материалов обделки и гидроизоляции в процессе длительного взаимодействия с вмещающей геологической средой и вынести рекомендации по технологиям строительства последующих очередей ПЗРО;
9) вынести рекомендации по технологии уплотнительной засыпки (заключительная процедура) для первой очереди ПЗРО и осуществить практическую полномасштабную отработку такой технологии.

Концепция ПИЛ предлагает сооружение горных выработок из нижней части вспомогательного строительного тоннеля («наклонного хода») ПЗРО, который предназначен для спуска на требуемую глубину проходческого щита и после завершения работ подлежит полной засыпке (рис. 20).

Подземная исследовательская лаборатория будет включать в себя подземные горные выработки, где в условиях, соответствующих условиям захоронения РАО, будут проводиться исследования и ставиться эксперименты, а также наземный лабораторный комплекс в здании сосновоборского филиала Радиевого института, где образцы горных пород, подземных вод и технологических материалов будут исследоваться различными методами.

Основными задачами рассматриваемой ПИЛ являются:

1) практическое исследование миграции подземных вод в толще глин *in situ*, то есть непосредственно в толще, где будет осуществляться захоронение, с соответствующими химическим, минералогическим и гранулометрическим составами глин, параметрами горного давления и состава подземных вод;
2) практические исследования миграции долгоживущих радионуклидов с использованием их короткоживущих изотопов и иных аналогов в объеме глин в горно-геологических условиях строящегося ПЗРО, а также при изменении этих условий;
3) изучение прямого взаимодействия материалов существующих и разрабатываемых инженерных барьеров, в том числе матриц РАО, с глинами, обладающими естественной водонасыщенностью и находящимися в условиях горного давления, температуры и иных параметров, соответствующих условиям ПЗРО. Концептуальный проект ПИЛ предусматривает также возможность изменения параметров среды по температуре и водонасыщенности;
4) оценка скорости выщелачивания радионуклидов из матриц РАО в результате прямого взаимодействия образцов матриц и глин с вариациями по температуре и водонасыщенности;
5) детальное изучение зоны нарушений толщи глин при проходке тоннеля ПЗРО, оценка изменений проницаемости этой зоны;
6) мониторинг изменения состояния внешней стороны железобетонной обделки тоннеля ПЗРО и используемой системы ее гидроизоляции;
7) использование отдельных помещений после выхода подземной лаборатории на режим постоянной работы для демонстрации общественности подходов к повышению радиационной безопасности захоронения РАО.

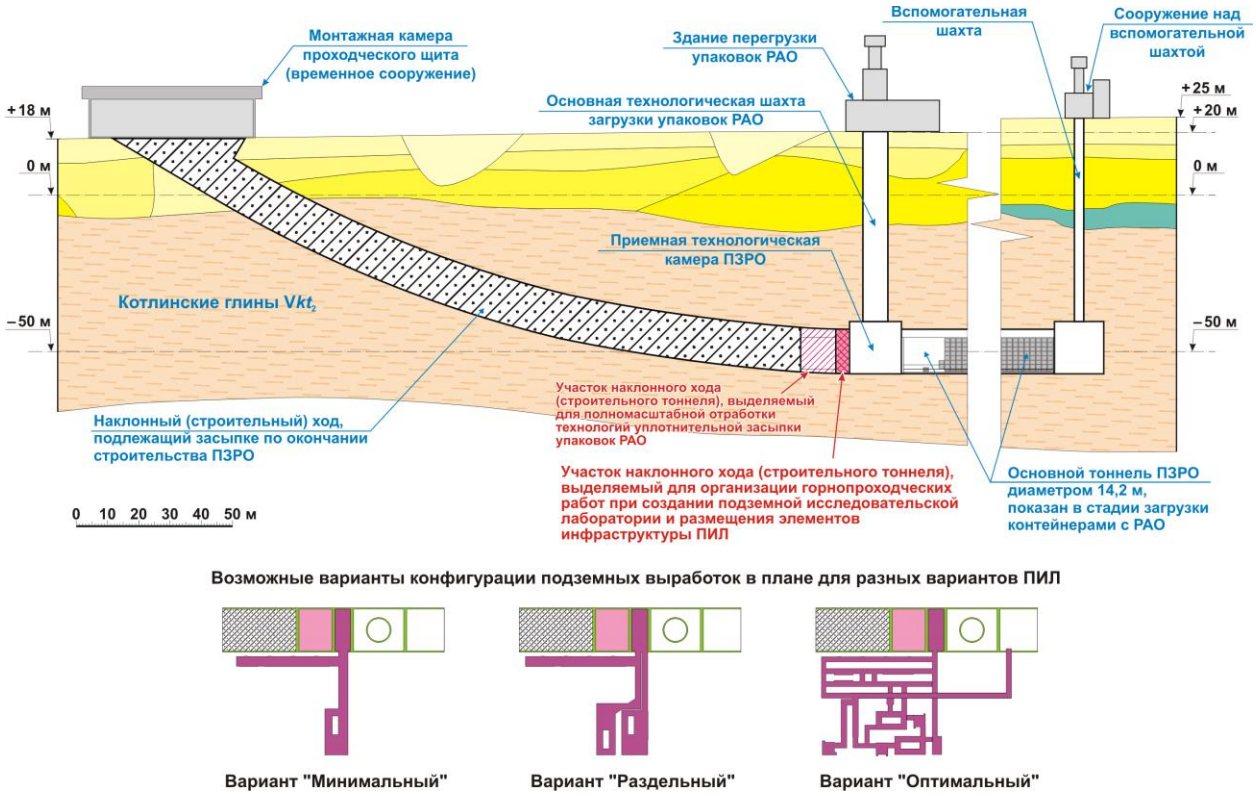



**Рис. 20.** Размещение подземной части ПИЛ при строительном тоннеле 1-й очереди ПЗРО и варианты размещения лабораторных выработок. Конфигурация тоннелей ПЗРО показана в соответствии с презентацией Головного института ВНИПИЭТ с упрощениями и дополнениями.

Концептуально рассматриваются несколько вариантов конфигурации подземной части ПИЛ (рис. 20). Все они создаются с использованием инфраструктуры и части нерабочего пространства будущего пункта захоронения РАО и проходкой дополнительных горных выработок.

Согласно предпроектным разработкам ОАО «Головной институт ВНИПИЭТ», проходка тоннеля, служащего основой ПЗРО, начнется с поверхности, и после демонтажа горнопроходческого щита «наклонный ход» (первые 220 м тоннеля) будет засыпан (рис. 20). Предлагаемые варианты конфигурации предусматривают, что нижняя граница засыпки сместится на 15–20 м от основной шахты, и что свободное пространство между засыпкой и приемной технологической камерой ПЗРО будет использовано для проходки выработок ПИЛ, размещения ее инфраструктурных помещений, а также для организации специального помещения для полномасштабной отработки технологий уплотнительной засыпки (завершающей стадии работы ПЗРО). Направление выработок ПИЛ следует ориентировать на юго-юго-запад – в сторону наименее вероятного места строительства второй очереди ПЗРО, и на запад, чтобы минимизировать возможное влияние собственных выработок ПИЛ на рабочий тоннель ПЗРО и приемную технологическую камеру.

Строительство ПИЛ может быть начато сразу после завершения строительных работ приемной камеры ПЗРО. Оптимальной для основного горизонта ПИЛ является высота, примерно соответствующая оси рабочего тоннеля (в концептуальном проекте ПЗРО – –50 м от уровня моря, или –70 от поверхности земли).

Принципиальное отличие вариантов конфигурации выработок заключается в объеме проходческих работ и возможности раздельного проведения различных экспериментов. Для варианта «Минимальный» проходятся всего две горные выработки – перпендикулярная тоннелю ПЗРО (возможно, арочного сечения) и отходящая от него – параллельная тоннелю, со сводчатым сечением. При проходке максимально используется стандартное метростроевское оборудование и стандартные методы обделки (за исключением «рабочих» стен параллельной выработки). Параллельная выработка служит также рабочим помещением для исследования зоны нарушений при проходке и для мониторинга изменений внешней поверхности и гидроизоляции тоннеля – используется ближайшая к тоннелю «рабочая стена» – а противоположная стена используется для проведения материаловедческих экспериментов.

В конце «перпендикулярной» выработки («штрека»), на удалении 20–25 м от тоннеля ПЗРО по принципу ниш создаются рабочие помещения для гидрогеологических исследований и исследований блоков («объемных»). В минимальном варианте максимально используется инфраструктура ПЗРО – в пределах выделенной под ПИЛ части строительного тоннеля, помимо отсека, предназначенного для полномасштабной отработки технологии уплотнительной засыпки упаковок РАО, имеются только дозиметрический пост, небольшой санпропускник (на случай загрязнений), щитовая, узел вентиляции и помещение дежурного.

Недостатками варианта «Минимальный» является необходимость использовать одни и те же помещения для работы как с «неактивными», так и с радиоактивными веществами, а также большая зависимость в работе от возможностей и графика работы ПЗРО, что может также создавать помехи нормальному функционированию последнего. Минимальный вариант сложно использовать как объект демонстрации для общественности.

Вариант «Раздельный» отличается от минимального наличием отдельных помещений для экспериментов с радиоактивными веществами, отдельным входом в «грязную» зону, а также более развитой инфраструктурой.

Вариант «Оптимальный» (рис. 21) предусматривает возможность наращивания объема исследовательских задач и создание фактически автономного комплекса с развитой инфраструктурой, связанного с ПЗРО лишь необходимостью использовать для доставки персонала и оборудования одни и те же шахты, а также общий водопровод. В то же время, бóльшая автономность ПИЛ позволяет выстраивать более гибкий график взаимодействия с ПЗРО.

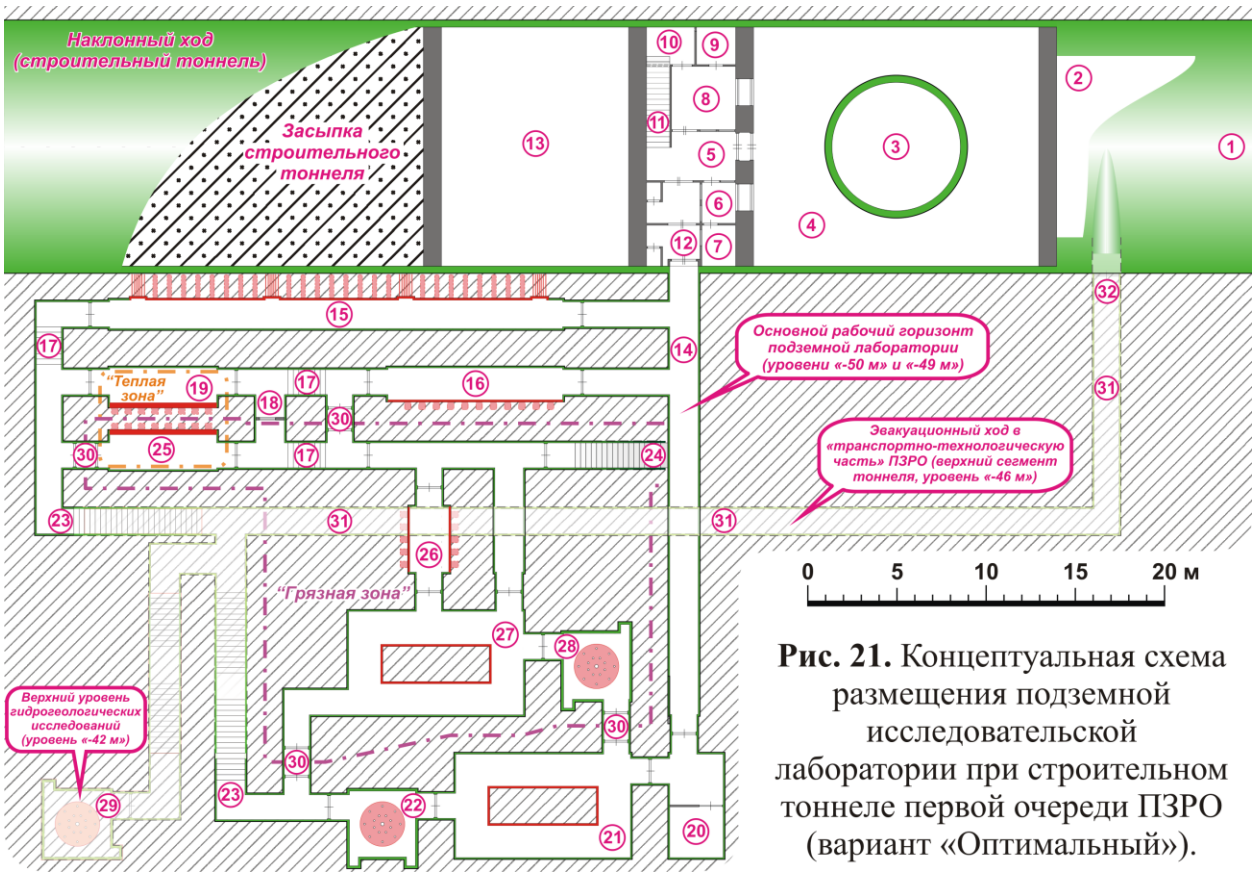



**Рис. 21.** Концептуальная схема размещения подземной исследовательской лаборатории при строительном тоннеле первой очереди ПЗРО (вариант «Оптимальный»).

Условные обозначения:

*1* – Рабочий тоннель ПЗРО; *2* – уровень транспортно-технологической части ПЗРО (–46 м); *3* – ствол основной технологической шахты; *4* – помещение приемной технологической камеры ПЗРО; *5* – вход во «внешние» помещения ПИЛ на уровне («–50 м»); *6* – помещение дежурного; *7* – пульт управления системой вентиляции ПИЛ; *8* – помещение персонала; *9* – комната отдыха персонала; *10* – переход на уровень санпропускника «грязной» зоны ПИЛ и пункта дозиметрического контроля; *11* – подъем на технический уровень ПИЛ (к системе вентиляции, кабельной и пр.); *12* – вход в горные выработки ПИЛ; *13* – участок наклонного хода (строительного тоннеля), выделяемый для полномасштабной отработки технологии уплотнительной засыпки упаковок РАО (контейнеров, бочек); *14* – ход в «рабочие» помещения «чистой» зоны ПИЛ; *15* – рабочее помещение для исследования зоны нарушений горных пород при проходке тоннеля ПЗРО, а также для мониторинга изменений внешней поверхности обделки тоннеля и его гидроизоляции; *16* – помещение для материаловедческих экспериментов в обычных условиях и без использования РВ; *17* – подъем в «теплую» зону (уровень «–49 м»); *18* – пульт контроля локального нагрева в «теплой» зоне; *19* – помещение для материаловедческих экспериментов в условиях локального нагрева, но без использования РВ; *20* – подсобное помещение «чистой» зоны; *21* – помещение «объемного» исследования глин в «чистой» зоне; *22* – помещение гидрогеологических исследований (нижний уровень «чистой» зоны); *23* – подъем к эвакуационному ходу и уровню «–42 м»); *24* – спуск из «грязной» зоны на уровень санпропускника; *25* – помещение для материаловедческих экспериментов с материалам, содержащими РВ, в условиях локального нагрева; *26* – помещение для материаловедческих экспериментов в обычных условиях, но с материалами, содержащими РВ; *27* – помещение «объемного» исследования глин в «грязной» зоне; *28* – помещение для гидрогеологических испытаний с использованием РВ («грязная» зона); *29* – помещение гидрогеологических исследований (верхний уровень «чистой» зоны); *30* – переходы из «чистой» зоны в «грязную» (используются в особых случаях); *31* – эвакуационный ход; 32 – эвакуационный выход в верхний сегмент рабочего тоннеля ПЗРО (транспортно-технологическая часть, уровень «–46 м»).

В этом варианте (рис. 21) за пределами тоннеля создается сеть выработок с несколькими уровнями. Разделены «грязная» (для работы с радиоактивными веществами) и «чистая» зоны. «Грязная» имеет отдельный вход со своего горизонта через санпропускник, но имеет также переходы в «чистую» зону, в случае необходимости и допустимости такого перехода. Как следствие, «чистая» зона может использоваться для демонстрации исследований общественности. Отдельно, в «чистой» и «грязной» зонах выделена «теплая» зона для экспериментов с локальным нагревом. Два уровня гидрогеологических исследований позволяют оценить проницаемость вмещающих глин на всей глубине расположения ПЗРО. Для повышения уровня безопасности в большой сети выработок предусмотрен эвакуационный выход на верхний уровень ПЗРО (в транспортно-технологическую часть). Доступ в отсек, предназначенный для полномасштабной отработки технологии уплотнительной засыпки упаковок РАО, осуществляется через порталы на верхнем и нижнем уровне помещений, где расположена инфраструктура подземной исследовательской лаборатории.

### *5.1.2. Верхневендские аргиллиты Архангельской области*

В 1960–1990–е годы на территории Северо-Западного региона России был выполнен значительный объем комплексных исследований с целью поиска рудных месторождений, месторождений строительных материалов, выявления запасов подземных вод. На основе имеющихся в геологических фондах Мурманской и Архангельской областей документации были отобраны геологические формации и конкретные участки, по которым имелись фактические данные, достаточные для сравнения с критериями выбора площадок для подземной изоляции РАО [160–162].

В Архангельской области были выбраны верхневендские аргиллиты, протянувшиеся широкой полосой по северо-восточному побережью Двинской Губы Белого моря (Зимний берег) в районе и северо-западнее г. Архангельск более, чем на 300 км.

Площадка «Большая Торожма» размещается в 2–3 км от морского побережья в 100 км к северу от Архангельска в пределах Беломорско-Кулойского плато (Кулойского полуострова) (рис.22). В элементах рельефа это возвышенность с абсолютной отметкой 108 м, имеющая крутой юго-восточный склон к реке Большая Торожма и пологий на юго-запад к морю. Район площадки изучался в процессе геологической съемки масштаба 1:50 000 с использованием одной скважиной до глубины 286 м (скв. № 247). Мощность четвертичных отложений 30–50 м, на юго-восточном склоне – до 0.

Западная прибрежная часть плато сложена верхневендскими породами котлинского горизонта, в который входят аргиллиты мезенской свиты, предлагаемые в качестве вмещающей геологической среды для строительства подземного хранилища РАО (табл. 33) [163].

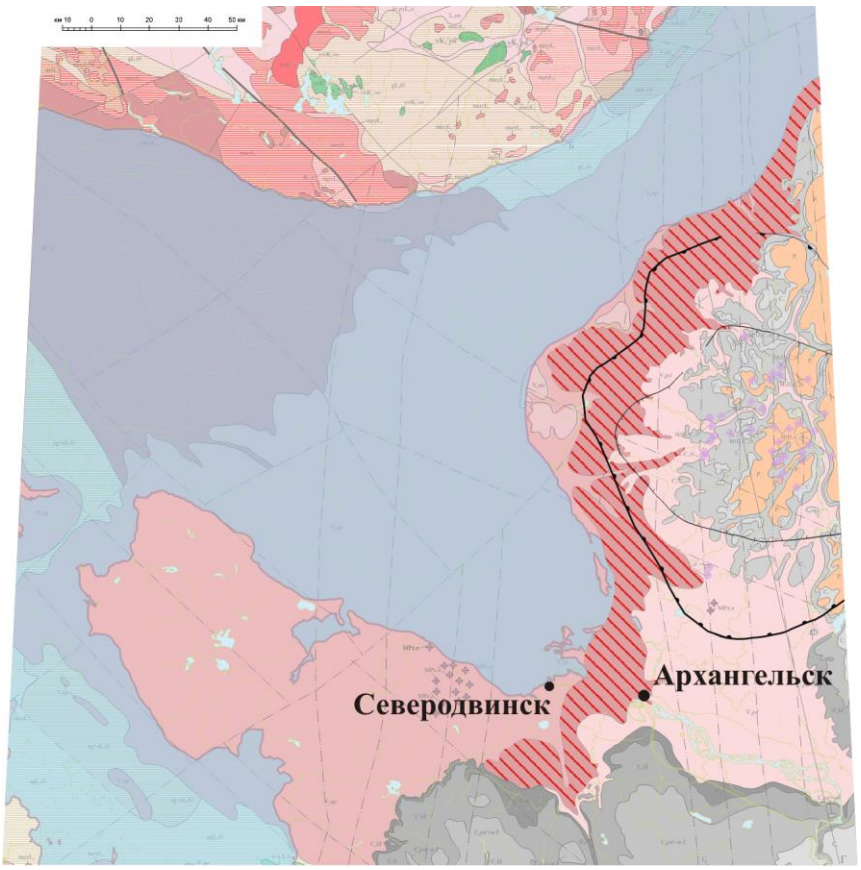



**Рис. 22**. Полоса верхневендских аргиллитов (выделена) и площадка «Большая Торожма». Сплошные линии - границы Двинско-Пинежского потенциального алмазоносного района (внешняя) и Золотицкого кимберлитового поля (внутренняя) [163].

Таблица 33

Стратиграфическое подразделение и состав пород валдайского надгоризонта верхнего венда в пределах листа ГГК Q-37 (Архангельск) [163]

| Горизонт | Свита | Состав |
|---|---|---|
| Котлинский | Падунская $V_{2pd}$<br><br>Мезенская $V_{2mz}$ | Красноцветные песчаники и алевролиты<br>Красноцветные алевролиты и аргиллиты с прослоями песчаников и гравелито-песчаников в основании свиты |
| Редкинский | Усть–пинежская $V_{2up}$ | Аргиллиты, прослои алевролитов пепловых туфов, в основании местами песчаники, гравелиты, конгломераты |

Вскрытая скважиной № 247 пачка аргиллитов залегает на глубине ~100 м и имеет мощность ~130 м. Аргиллиты тонкослоистые, зеленоватого и шоколадного цвета, по составу – монтмориллонитовые. Предполагается, что эти породы являются относительным водоупором с коэффициентом фильтрации менее $10^{-4}$ м/сут [160]. Аргиллиты перекрыты водоносным комплексом песчаников и алевролитов котлинского горизонта. По данным откачек из скважин дебит этих пород составляет 0,07–0,8 $дм^3/с$ при понижениях от 0,5–0,7 до 24,3 м. Питание аргиллитовой формации возможно в пределах ограниченной площади через водопроницаемые породы. Сведений о возможности водопритока из подстилающих горизонтов нет.

Осадки верхнего венда не имеют существенных дислокаций. Залегают на эродированной поверхности кристаллического фундамента и рифейских толщ. Залегание моноклинальное с пологим погружением (около 3 м на 1 км) к востоку–юго-востоку. В районе площадки разломы не отмечены.

Мощность вендского структурного яруса в районе Золотицкого кемберлитового поля (центральная часть Беломорско-Кулойского плато) достигает 941 м. Максимальная мощность мезенской свиты – 215 м.

Породы венда и фанерозоя составляют структурный этаж, образующий чехол Русской (Восточно-Европейской) платформы. Породы котлинского горизонта, выходящие на поверхность в наше время на побережье Белого моря и Финского залива, образовались в крупном морском бассейне, существовавшем на территории платформы и Балтийского щита в верхневендское время.

Для палеозоя Русской платформы характерна смена трансгрессий и регрессий эпиконтинентального морского бассейна. Какие именно из этих трансгрессий распространялись на территории северной части Архангельской области, точных данных нет. В пределах Беломорско-Кулойского плато аргиллиты и алевролиты венда (устьпинежская свита) перекрыты породами карбонового и пермского возрастов. Отложения более ранних периодов палеозоя отсутствуют. Исключением являются находки ксенолитов ордовика в кимберлитовых девонских трубках, которые свидетельствует о проникновении ордовикского бассейна в районе Зимнего Берега [163].

При оценках перспективности площадки «Большая Торожма» необходимо учитывать несколько существенных ограничений для строительства ПЗРО.

- Основная часть территории Беломорско-Кулойского плато входит в Двинско-Пинежский потенциальный алмазоносный район, исключая узкую береговую полосу шириной 5–15 км. Центральная часть плато представляет Ненокский потенциальный алмазоносный узел (Золотицко-Кепинское кимберлитовое поле), границы которого находятся в 30–40 км от берега Белого моря. Основная часть этой прибрежной полосы представлена алевролитами и аргиллитами мезенской свиты.

  Размещение хранилища РАО на участке Большая Торожма потребует согласований с алмазодобывающей компанией, разрабатывающей месторождение алмазов им. М.В.Ломоносова (трубки – Поморская, Ломоносова, Карпинского-1, Карпинского-2, Архангельская, Пионерская). Контрольный пакет акций на разработку месторождения принадлежит акционерной компании «Алроса». Запасы по предварительным оценкам составляют 832,5 млн карат. В настоящее время (2009 г.) добыча алмазов производится на трубке Архангельская.

- Выбор конкретного участка в зоне распространения пород мезенской свиты должен учитывать статус Беломорско-Кулойского плато в ранге уникального природного комплекса, в который входят район поселка Поморье и региональный заказник «Соянский».
- Воды, откачиваемые при проведении горных работ на Ломоносовском горно-обогатительном комбинате, предполагается использовать для снабжения питьевой водой городов Архангельск, Новодвинск и Северодвинск.

Указанные осложнения могут быть разрешены, поскольку толща аргиллитов распространена на значительной площади в прибрежной зоне Белого моря.

### 5.1.3. Глины майкопской серии (олигоцен–миоцен) Южного федерального округа

Рассматриваемая территория расположена на юге Европейской части Российской Федерации, в юго-западной части Республики Калмыкия. Участок предполагаемого строительства могильника РАО располагается в южной части Калмыцкой республики в 10–15 км от границы со Ставропольским краем. Это район деятельности уранового рудника на месторождении «Степное», который функционировал в 1961–1967 гг. [164].

Осадочные породы региона представлены почти полным комплексом мезозоя и кайнозоя. Это осадочный чехол, перекрывающий древние формации кристаллического фундамента. Над более приподнятой частью фундамента их мощность составляет 800 м, а в области его наибольшего погружения достигает 4500 м. Осадки мезозоя представлены преимущественно терригенными породами и лишь отчасти карбонатными.

Юрские отложения распространены не повсеместно и характеризуются песчано-глинисто-алевролитовой толщей.

Меловые отложения в нижней части сложены терригенными (песчаники, глины, алевролиты), в верхней части – карбонатными (известняки, мергели) породами.

Палеоген распространен повсеместно и представлен всеми ярусами, но особое место принадлежит майкопской серии, которая стратиграфически объединяет отложения олигоцена и нижнего миоцена.

Майкопская серия сложена в основном плотными однородными глинами мощностью 800–1500 м. Их отличительной особенностью является тонкодисперсный гидрослюдисто-монтмориллонитовый состав и отсутствие трещиноватости в естественном залегании. Содержание глинистой фракции оставляет около 90 %.

Толща майкопских глин является региональным водоупором и изолирующей покрышкой для углеводородов [165].

Майкопские глины не полностью водонасыщены. В случае поступления воды по вновь образовавшимся разрывным нарушениям значительная её часть будет удерживаться породой. Кроме того, набухание глин (давление набухания составляет 0,45–0,12 МПа) будет залечивать трещины и препятствовать дальнейшему продвижению воды. Отсутствие внутриформационной обводненности и способность исключить перетоки вод в тектонических трещинах в сочетании с высокими сорбционными свойствами будут обеспечивать надежность подземной изоляции РАО.

Необходимо отметить высокое аргон-калиевое отношение, полученное для майкопских глин, соответствующее возрасту 160-180 млн лет, т.е. юрскому времени [166]. Следует предположить, что калий в майкопских глин (2,00–2,45 %) присутствует в основном в микроблоках полевых шпатов и слюд механических осадков, образовавшихся из пород более древнего, чем палеоген возраста. Эти данные могут быть использовано при разработках долгосрочного прогноза условий изоляции РАО в геологических формациях.

Неогеновые и четвертичные отложения распространены повсеместно и представлены песчано-глинистыми породами.

В мезо-кайнозойских отложениях Восточно-Предкавказского бассейна четко выделяются два водоносных этажа, между которыми расположена глинистая майкопская толща. Мощность водоупора на большей части бассейна более 1 км.

Надмайкопский водоносный этаж сложен преимущественно среднемиоценовыми и сармат-постилиоценовыми отложениями, содержащими воду в лёссах, песчаниках, алевролитах. Наиболее выдержанным водоупором в надмайкопском водоносном этаже является глинистая толща нижнего сармата. К песчано-алевролитовым слоям майкопской серии приурочен одноименный водоносный комплекс.

Подмайкопский водоносный этаж включает палеоцен–эоценовый, верхнемеловой, нижнемеловой, юрский и палеозойский водоносные комплексы. Основные водоупоры здесь – глины среднего и верхнего альба и батского яруса. Водоносность палеозойского фундамента изучена недостаточно, породы имеют низкую пористость и проницаемость, их обводненность обусловлена лишь наличием трещин.

Области современной инфильтрации и формирования напора вод надмайкопских горизонтов приурочены к выходам этих горизонтов на северных склонах и в предгорьях Кавказского хребта и на восточных склонах Ставропольского свода. Поток вод этих отложений направлен на северо-восток к Каспийскому морю, где происходит их разгрузка.

Области питания водоносных горизонтов надмайкопского этажа расположены на северных склонах Кавказа, воды движутся на северо-северо-восток и разгружаются в основном в пределах вала Карпинского, где глины майкопской серии выклиниваются или имеют малую мощность.

**Рис. 23**. Приблизительная стратиграфическая колонка участка предполагаемого строительства могильника РАО в районе месторождения «Степное».

Предлагаемый участок сложен полого залегающей под углами 3–8° толщей палеогеновых и неогеновых отложений, перекрытых четвертичными образованиями мощностью до 30 м (рис. 23). Палеогеновые породы представлены глинистыми образованиями, среди которых выделяется мощная пачка глин майкопской свиты.

К средне–майкопским отложениям приурочено урановое месторождение. Район месторождения и его окружение детально разведаны буровыми скважинами и горными выработками. Пройдено несколько структурных скважин глубиной более 450 м и разведочно-эксплуатационная шахта, состоящая из вертикального ствола и горизонтальных выработок на горизонте 467 м.

Как показали опытные работы, наиболее эффективным способом проходки капитальных выработок является механический. Для сооружения вертикальных протяженных выработок диаметром 2–3 м целесообразно применять бурение. При этом наличие водоносных горизонтов в четвертичных породах не является осложнением. Комбайновый или молотковый способ проходки неглубоких стволов большого диаметра пригоден для участков с минимальной мощно-

стью четвертичных отложений. Для создания горизонтальных выработок целесообразно применять щитовой способ проходки.

Разведочно-эксплуатационная шахта пройдена в северной части месторождения вне промышленной залежи. Граница балансовых запасов находится в 200 м от ствола. Мощность глин на этом участке более километра.

При проходке ствола шахты водоносные горизонты отмечены в верхней части разреза в четвертичных породах до глубины 30 м и в коре выветривания майкопских глин. Глубже в их толще водоносные горизонты не обнаружены.

По предварительным оценкам рассматриваемый район перспективен для сооружения ПЗРО после проведения дополнительных целенаправленных исследований, и в первую очередь – по определению барьерных свойств майкопских глин относительно радионуклидов.

Кроме трёх рассмотренных районов глинистые формации широко развиты на территории Восточно-Европейской платформы.

Глинистые породы триаса мощностью от первых десятков метров до 600 м (Печорская синеклиза) развиты в Ярославской, частично Нижегородской, Костромской и Кировской областях и Республике Коми.

На юге Оренбургской области развиты глины юрского и триасового возраста мощностью от первых десятков до 500 и более метров. Залегают они на глубине 300 и более метров.

На востоке Русской плиты выделена формация волжского яруса (верхняя юра) монтмориллонит-гидрослюдистых глин в залежах Ульяновско-Саратовского, Рязано-Костромского и Сысольского прогибов. Типичным представителем глинистой формации являются юрские оксфордско-нижневолжские глины в Подмосковье.

В Саратовском Поволжье на возвышенности Общий Сырт распространены неогеновые «сыртовые глины».

Перспективность большинства из них для сооружения подземных ПЗРО не рассматривалась.

### *5.1.4. Глинистые формации Западно-Сибирской плиты*

Областью развития глинистых формаций различного состава и происхождения является Западно-Сибирская плита – крупнейшая тектоническая структура на территории Российской Федерации. На западе она ограничена Уралом, на востоке – долиной реки Енисей, на юге – складчатыми образованиями Казахстана, Салаирского кряжа, Кузнецкого бассейна, Кузнецкого Алатау, на севере – побережьем Карского моря. В этих границах территория Западно-Сибирской плиты составляет около 2,5 млн км$^2$ и включает Уральский федеральный округ (Курганская, Свердловская, Тюменская, Челябинская области, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа) и частично западные области Сибирского федерального округа.

Аналогично Восточно-Европейской платформе Западно-Сибирская плита представляет собой двухъярусную структуру – древний метаморфизованный фундамент, несогласно перекрытый мезозойскими и кайнозойскими отложениями. В отличие от Восточно-Европейской платформы крупные структурные элементы Западно-Сибирской плиты проявлены в современном рельефе менее отчетливо, что

связано с глубоким залеганием фундамента, неровности которого нивелируются мощным осадочным чехлом, морские и континентальные отложения которого в центральных частях плиты превышают 3500 м [167]. Структура мезозойско–кайнозойского плитного комплекса представляет собой обширную плоскую впадину – мегасинеклизу. Мощность отдельных пластов, количество и объемы перекрывающих осадков зависят от их положения относительно границ мегасинеклизы и от наличия внутренних тектонических структур фундамента.

В мезозое глинистые формации Западно–Сибирской плиты связаны с осадками средней юры (180–160 млн. лет), когда произошло значительное расширение области осадконакопления вследствие опускания территории. Среднеюрские отложения представлены преимущественно континентальными глинами и аргиллитами с прослоями песчаников, алевролитов и незначительными пластами угля. Мощность их в Омске, Барабинске и Татарске от 100 до 285 м, в Максимо-Ярске более 450 м, а в Тюмени всего 41 м. Севернее широты р. Тара континентальные осадки сменяются морскими. На среднеюрских, местами верхнеюрских морских осадках залегают лагунно-континентальные аргиллиты мощностью до 100–150 м. Верхний отдел юры сложен аргиллитами с прослоями алевролитов, песчаников и глинистых известняков преимущественно морского происхождения. Их мощность не более 150 м.

Отложения мелового возраста (145,6–65,0 млн. лет) представлены широким набором континентальных и морских отложений преимущественно песчано-глинистого состава. В районе Тары, Ханты-Мансийска, Увата мощность их до 1900 м. Характерно различие пород по литологическому составу и по условиям образования в различных местах плиты. Например, континентальные песчано-глинистые отложения (аптский и альбский ярусы) восточного склона Урала к востоку постепенно переходят в морские.

Валанжинский ярус нижнего мела представлен морскими песчаными, алевритовыми и глинистыми породами, выходящими на дневную поверхность в бассейнах рек Ляля (Свердловская область), Северная Сосьва (Ханты-Мансийский автономный округ) на восточном склоне Урала и в районе Усть-Порта (Таймырский автономный округ). Мощность их не более 250 м, однако на западе Хатангской впадины вместе с верхней юрой она достигает 1000 м.

Готтерив-баррем (нижний мел) представлен коричневыми и зелеными глинами с прослоями песчаников и алевролитов частично морского, частично континентального происхождения. Мощность этих пород в центральных частях плиты превышает 600 м, а по окраинам они залегают непосредственно на породах кристаллического фундамента.

Аптский и альбский ярусы нижнего мела представлены различными по происхождению и литологическому составу осадками. Вдоль восточного склона Урала они представлены континентальными песчано-глинистыми породами, переходящими к востоку в морские. Последние преобладают в районах Березово–Ханты-Мансийск, Тюмень–Викулово (Тюменская область). Континентальные осадки апта и альба угленосны, в центральной части южной половины плиты достигают мощности до 580 м.

Морскими глинами и мергелями преимущественно сложены отложения кампан–маастрихтского яруса верхнего мела. Мощность этих пород достигает 200 м.

Палеоген (65,0–23,3 млн. лет) на значительных площадях представлен глинами морского генезиса с незначительными прослоями песчаников и алевролитов.

В центральных частях мегасинеклизы суммарная мощность пород палеогенового возраста составляет ~400 м.

Неоген представлен миоценовыми (23,3–5,2 млн. лет) алевролитами и мелкозернистыми песками с немногочисленными прослоями глин, бурого угля, лигнита, а также плиоценовыми песчано-известковисытыми глинами. По простиранию эти континентальные отложения резко фациально изменчивы. Их мощность более 300 м. Вдоль восточного склона Урала неогеновые отложения, по-видимому, отсутствуют.

Четвертичные отложения (1,6 млн. лет и до нашего времени) представлены песчано-глинистыми породами, литологические особенности которых изменяются в вертикальном и горизонтальном направлениях разрезов. В северной части плиты это в основном ледниковые образования, в южной – озерные и аллювиальные.

Тектонические структуры мезозойских и кайнозойских отложений покровного этажа Западно-Сибиской плиты определяются структурами фундамента. Крупные валы и прогибы покрова приурочены соответственно к отрицательным и положительным гравитационным аномалиям фундамента. Формирование валов и прогибов мезозойско-кайнозойских толщ обусловлены вертикальной подвижностью блоков фундамента. Современный рельеф формировался при дифференциальном движении блоков фундамента, происходившем на фоне преобладающих медленных опусканий плиты.

За последнее время на территории Западно-Сибирской плиты выполнен огромный объем геологоразведочных работ, связанных с поисками залежей нефти и газа. Установлена региональная перспективность северных районов и центра, и в меньшей степени для южных районов.

Восточнее Западно-Сибирской плиты глинистые формации присутствуют во многих геологических структурах Сибирского и Дальневосточного округов. Данные об исследованиях глин как среды для подземной изоляции РАО и выбор перспективных участков на этих территориях, а также в пределах Западно-Сибирской плиты в настоящее время отсутствуют.

## 5.2. Использование глинистых формаций для строительства приповерхностных ПЗРО

Глинистые формации необходимо использовать для решения проблемы сокращения и ликвидации временных ПЗРО. Новые хранилища, в том числе и региональные, целесообразно создавать на поверхности или заглублять в пласт глинистых пород, способных изолировать подземные воды от проникновения хранящихся радионуклидов. При выборе площадок следует брать за основу районы и участки месторождений глин, включая отработанные карьеры и еще не эксплуатируемые месторождения. Очевидно, что для каждого конкретного случая необходимо обосновать приоритет ПЗРО и статус полезного ископаемого. Само наличие месторождения может дать направление поиска площадок ПЗРО.

На территории РФ, в каждом федеральном округе и почти в каждой области найдены месторождения различного типа глин – этого важнейшего строительно-промышленного сырья, определяющего в ряде случаев направление экономического развития района или области. Количество и состояние месторождений меняются

и уточняются со временем, что связано с выработкой запасов и открытием новых участков.

В перечне «Государственного баланса запасов полезных ископаемых РФ» 2001–2004 гг. числятся следующие наиболее крупные месторождения керамических, тугоплавких и других глин.

Центральный федеральный округ.

1) Большая Карповка (Курская область);
2) Лотненское (Воронежская область);
3) Кондровское (Калужская область);
4) Призаводское (Московская область);
5) Лукошкинское ((Липецкая область);
6) Ульяновское (Калужская область);
7) Тимоховское (Московская область);
8) Шулеповское (Рязанская область);
9) Власово-Губинское (Московская область);
10) Малоархангельское 2 (Орловская область).

Северо-Западный федеральный округ.

11) Печорское (Псковская область).

Приволжский федеральный округ.

12) Талалаевское (Башкортостан).

Южный федеральный округ.

13) Владимировское (Ростовская область);
14) Серебряковское (Волгоградская область).

Уральский федеральный округ.

15) Берлинское (Челябинская область);
16) Нижне-Увельское (Челябинская область).

Сибирский федеральный округ.

17) Трошковское (Половинское) (Иркутская область);
18) Кантатское (Красноярский край);
19) Глухаринское (Кемеровская область);
20) Евсинское (Новосибирская область);
21) Каменское (Иркутская область);
22) Гавриловское (Кемеровская область);
23) Суховское (Кемеровская область);
24) Октябрьское (Томская область);
25) Тулунское (Иркутская область);
26) Арышевское (Томская область);
27) Единисское (Кемеровская область).

Дальневосточный федеральный округ.

28) Юхта-Бузулинское (Амурская область);
29) Усачевское (Приморский край);
30) Липовецкое (Приморский край);
31) Меркушевское (Приморский край).

В отдельных геологических провинциях существуют свои характерные особенности распространения и характера глинистых формаций, наличие небольших месторождений.

Например, в пределах Уральского территориального округа разведано 393 месторождения кирпичных глин с общими запасами по категории $A+B+C_1$ 590 млн. $м^3$ [168]. На Среднем Урале большинство из них приурочено к делювиальным четвертичным отложениям. В Зауральской равнине в надпойменных террасах размещены аллювиальные месторождения. На Южном Урале, в Республике Башкортостан и в Оренбургской области выявлено более 80 месторождений. Характерной особенностью всех месторождений кирпичных глин является их небольшая мощность, как правило, не превышающая 10–15 м.

Мощности пластов 30-100 м выявлены для каолиновых глин, месторождения которых расположены на восточном склоне Урала, в пределах гранитных массивов и кварц-серицитовых сланцев. Крупнейшей является Урал-Мугоджарская каолиноносная провинция, в которой зарегистрировано более 100 месторождений и проявлений первичного и вторичного каолина. Известна группа месторождений в районе г. Невьянск в Свердловской области, Полетаевское, Еленинское и месторождение «Журавлиный лог» в Челябинской области. Использование каолиновых глин для изоляции РАО проблематично, поскольку минералы группы каолина имеют наименьшую сорбционную емкость по сравнению с другими глинистыми минералами.

Наличие и характер залегания глинистых формаций является предметом исследований, проводимых при выборе мест размещения полигонов твердых бытовых и технических отходов. При этом решается та же задача, что и при выборе площадок для строительства приповерхностных ПЗРО, – определение экранирующей способности геологической среды и оценка защищенности водоносных горизонтов и поверхностных водоемов. Выбор мест расположения полигонов регламентируется геологическими критериями.

При выборе полигонов по геологическим признакам исключаются территории [169]:

- с проявлением экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов (оползни, осыпи, овражная эрозия, карстовые процессы и пр.);
- с неизбежным контактом отходов с поверхностными водами (поймы рек, овраги, болота и пр.);
- с распространением высокопроницаемых водоносных грунтов (галечники, трещиноватые известняки, щебнистые грунты и пр.);
- с уклоном рельефа более 15°;
- в пределах водозаборов в границах 1–3 поясов зон санитарной охраны, а при наличии поверхностных водозаборов на расстоянии от 3 до 5 км от последних;
- распространения полезных ископаемых;
- с высоким залеганием грунтовых вод (менее 3 м от поверхности);
- при отсутствии глинистых водоупорных отложений, перекрывающих эксплуатируемые водоносные горизонты;
- при расположении в радиусе до 500 м водоемов, пойм, временных водотоков;
- при возможной активизации экзогенных геологических процессов.

Соблюдение критериев позволяет выбрать оптимальные условия размещения в геологической среде твердых бытовых отходов (ТБО) и промышленных отходов (ПО). С выбора участка размещения полигона начинается управление процессом захоронения, которое в первую очередь должно обеспечить защиту подземных вод.

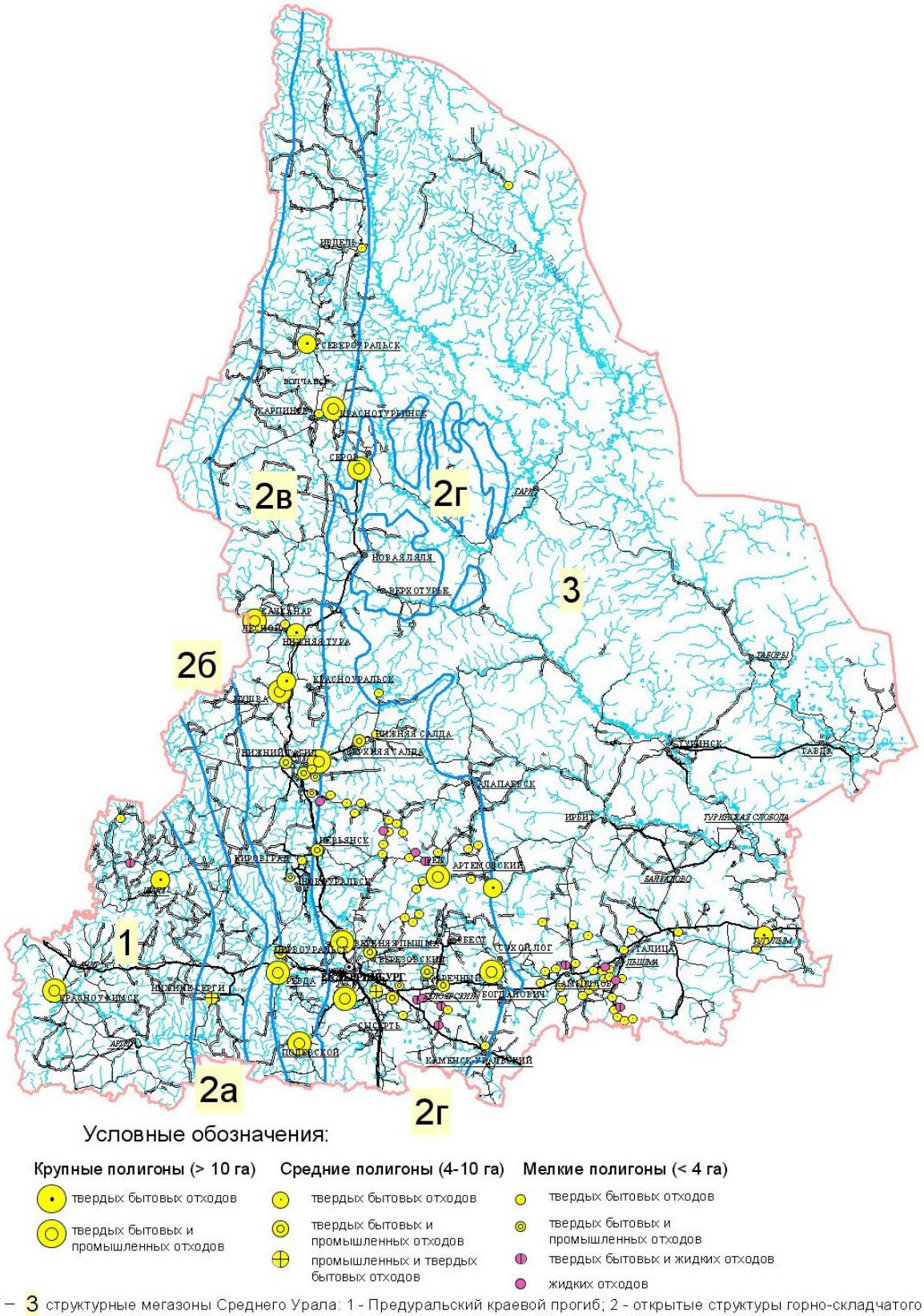



Рис.**24.** Местоположение полигонов ТБО на Среднем Урале [169].

По степени защищенности территория Среднего Урала разделена на несколько структурных мегазон (рис. 24 [169]):

- Предуральский краевой прогиб;
- открытые структуры горно-складчатого Урала, в которые входят:Западно-Уральская зона линейной складчатости, Центрально-Уральское поднятие, Тагило-Магнитогорский прогиб и Восточно-Уральская область поднятий и сопряженных прогибов второго порядка;
- Зауралье.

Особое внимание уделяется изучению водного режима геосистемы, характер которого влияет на процессы разложения отходов и загрязнения окружающей среды.

Прерогатива геологического фактора при выборе полигонов ТБО и ПО очевидна. Стоящие перед исследователями задачи практически аналогичны задачам выбора площадок для строительства приповерхностных ПЗРО. Целесообразно объединить поисково-исследовательские работы в регионах по всему комплексу отходов, радиоактивных и нерадиоактивных. Имеющиеся на местах информация о существующих полигонах и перспективных участках захоронения ТБО и ПО должна быть использована для выбора площадок строительства ПЗРО.

## 5.3. Использование глин для инженерных барьеров

Глины различного минералогического состава используются в качестве инженерных барьеров ПЗРО, буферных материалов, а также для получения керамик, фиксирующих и иммобилизирующих радионуклиды. В последнем случае геологическое направление исследований является ограниченным и касается лишь структурно-минералогических свойств глин – сырья для керамических матриц. Главная роль принадлежит технологическим проблемам получения радиоактивных керамик и разработкам аппаратуры [170].

В качестве инженерных барьеров используются глины, которые имеют максимальную способность удерживать и поглощать радионуклиды. К ним относятся глинистые минералы группы монтмориллонита или бентонитовые глины.

На территории РФ находятся несколько геологических провинций с перспективными источниками бентонитовых глин [59]:

- Центральная провинция расположена в юго-восточной части Русской платформы в пределах Воронежской антеклизы, Доно-Медведицкого вала и Пачелмского прогиба.
- Поволжская провинция расположена на территории Волго-Камской антеклизы Русской платформы.
- Уральская провинция расположена в субмеридианальном поясе в пределах Уральской складчатой области, в которой по территориальному и генетическому признаку выделяют несколько районов. В частности, в Челябинской области в 50 км на юго-восток от г. Магнитогорска расположено крупное Сахаринское месторождение.
- Западно-Сибирская провинция находится в пределах Западно-Сибирской равнины. Наиболее крупные месторождения – Любинское в Омской области

и Зыряновское в Курганской области. Для Зыряновского месторождения утверждены запасы по категориям $A+B+C_1$ – 27 960 тыс. т, добыча – 40 тыс. т в год, для Березовского месторождения (Свердловская область) утверждены запасы 6 000 тыс. т, добыча =- 10 тыс. т.

- Алтае-Саянская провинция включает территорию юга Красноярского края, Республику Хакасия и Кемеровскую область. Здесь находятся несколько крупных месторождений, в том числе объединение ОАО «Хакасский бентонит», образованное на базе месторождений «Десятый Хутор» и «Черногорское».
- Приморская провинция расположена в южной части Хабаровского края, включает Приморский край и Сахалинскую область. Несколько месторождений расположены в пределах Сихотэ-Алиньской складчатой области, на о. Сахалин – Вахрушевское месторождение.
- Северо-Восточная провинция включает обширную территорию, в которую входят Магаданская и Камчатская области, Чукотский и Корякский автономные округа, часть Хабаровского края и Якутии. Геологическое строение провинции сложное. В мезо-кайнозое здесь существовали морские бассейны, в которых накапливались вулканические материалы. Район недостаточно изучен, и в нём выявлены лишь три месторождения вулканогенно-осадочного типа: Первомайское, Тал-Юрахское и Камчатское.

Ранее в разделе 3.2 были приведены данные об отдельных месторождениях бентонитов, наиболее перспективных и эксплуатирующихся в наше время. Там же отмечалось, что мощность пластов глин этого типа, как правило, незначительная, и даже крупные месторождения не могут обеспечить размещение полномасштабного хранилища РАО. Однако высокие барьерные свойства глинистых минералов группы монтмориллонита делают практически незаменимым этот природный долговечный материал для изоляции радионуклидов и создания инженерной защиты ПЗРО.

При этом специалисты отмечают, что, несмотря на большие проблемы регионов в области охраны окружающей среды, в частности, рекультивацию загрязненных земель Челябинской области, исследования бентонитовых глин встречают организационные и финансовые затруднения [168].

## 6. Критериальный анализ выбора перспективных площадок

Начальная оценка безопасности подземной изоляции РАО проводится с использованием базовых геологических критериев выбора площадок, разработанных Международным агентством по атомной энергии [18]. В рекомендациях МАГАТЭ для оптимизации выбора выделен системный подход, руководствующийся принципом:

«требования, которые определены свойствами радиоактивных отходов, должны соответствовать природным изолирующим возможностям вмещающей геологической среды в сочетании с технологическими параметрами инженерных барьеров хранилища».

В соответствии с руководящим принципом в документе Агентства вместе с геологическими критериями рассматривается весь комплекс подземной изоляции: критерии хранилища (могильника) и радиоактивных отходов. Отдель-

ный критерий является составляющим компонентом, обеспечивающим эффективность всей системы критериев.

Термин «критерий» в контексте МАГАТЭ следует интерпретировать как необходимые условия. При этом сами критерии носят характер общих методических указаний, поскольку в них нет количественных оценок и конкретных параметров каких-либо технологий подземной изоляции РАО. Тем не менее, даже в рекомендательной форме они дают направление для выбора методов, нормативов, стандартов и регламентов, необходимых для решения проектных и эксплуатационных задач.

В документе МАГАТЭ однозначно определена прерогатива геологических факторов выбора площадок с требованием наличия такого объема данных, который бы позволил обосновать соответствие (или несоответствие) природной среды для сооружения ПЗРО и размещения в нём определенного количества конкретных радиоактивных отходов.

Требования базовых критериев обоснованы существующим уровнем научных знаний, а также пониманием общих законов развития литосферных структур, образования и изменения геологических формаций. Универсальный характер критериев позволяет использовать их для различных типов горных пород, которые рекомендуются для строительства ПЗРО, но существенно различаются по своим свойствам и положению в геологических структурах.

В таблице 34 дана сравнительная характеристика различных горных пород, определяемая в соответствии с базовыми критериями МАГАТЭ [18]. Исходные данные получены специалистами Радиевого института им. В. Г. Хлопина в процессе изучения нижнекембрийских глин Ленинградской области [22, 142], солянокупольных структур Прикаспийской низменности [21, 103] и Нижнеканского гранитоидного массива Южно-Енисейского кряжа [23].

Оценка конкретного участка не может ограничиваться базовыми критериями, и в процессе его изучения, как правило, разрабатываются дополнительные критерии, создаваемые в связи со специфическими особенностями геологической формации, региона или типа горных пород.

Для нижнекембрийских глин Ленинградской области, входящих в двухъярусную структуру Русской платформы, основной и, по-видимому, единственной причиной, способной нарушить изоляцию и обводнить ПЗРО, будет вертикальная подвижка блоков кристаллического щита. Очевидно, что при выборе площадок необходимо однозначное доказательство отсутствия в местах их размещения каких-либо разрывных нарушений пород фундамента и последующая разработка научно обоснованного прогноза сейсмо-тектонического развития региона [146].

Дополнительные геологические критерии разработаны для солянокупольных структур. Один из них требует при выборе соляного массива учитывать степень закрытости радиоактивно-радиогенной системы $^{40}K \rightarrow {}^{40}Ar$, используемой для определения абсолютного возраста пород. Другие дополнительные критерии были сформулированы после определения причин крайне быстрой конвергенции полостей (20–30 тыс. $м^3$), созданных подземными ядерными взрывами в Сеитовской солянокупольной структуре (Астраханское газоконденсатное месторождение). Критерии исключали использование для сооружения подземных ПЗРО купола с аномально высокими геотермическими условиями и

участков развития в каменной соли межкристаллических газово-жидких включений [103].

На начальном этапе исследований Нижнеканского массива был сформулирован поисковый критерий:

«В докембрийских гранитоидных массивах с разломно-блоковой структурой условно однородные монолитные части выделяются в физических полях (гравитационных, магнитных, электромагнитных) по предельно малым коэффициентам неоднородности, а в рельефе – выравненными водоразделами, разделенными крутоврезанными речными долинами» [23].

Позднее в связи с переносом перспективной площадки ПЗРО к зоне сочленения Южно–Енисейского кряжа с Западно-Сибирской плитой (Муратовский разлом) возникли вопросы, связанные с учетом планетарной дегазации [127]. Для разработки долгосрочных прогнозов условий безопасности и оценки природных рисков захоронения РАО требуется изучение возможных источников, путей поступления, накопления и разрядки флюидной энергии Земли, выявление закономерностей пространственно-временного размещения флюидной активности в крупных литосферных структурах.

Таблица 34

Характеристика различных типов пород
в соответствии с базовыми геологическими критериями МАГАТЭ

| **Требования критерия** | | |
|---|---|---|
| **Глины** | **Каменная соль** | **Гранитоиды** |
| **G 1 – конфигурация площадки** | | |
| Площадка ~30 га в Предглинтовой зоне у п. Копорье. Мощность пласта глин ~100 м | Площадки в пустынно-степной зоне Прикаспия. Мощность структуры 5–6 км | Площадь блоков 1,5–9 км$^2$ при мощности массива ~3 км |
| **G 2 – геологические условия** | | |
| Пласт нижнекембрийских иллит-каолинитовых глин входит в состав осадочного чехла Русской платформы | Солянокупольная структура нижнепермской каменной соли, перекрытая осадочными породами верхнего неогена | Северная часть крупного массива протерозойских гранитоидов, частично перекрытая юрскими осадками |
| **G 3 –гидрогеологические условия** | | |
| Нижнекембрийские глины являются региональным водоупором, разделяющим водоносные горизонты на значительной территории | Каменная соль перекрыта гравитационно-устойчивой водной системой минерализованных вод | За счет инфильтрации подземных вод формируются трещинные воды массива с преимущественно нисходящим направлением движения |
| **G 4 – миграция радионуклидов** | | |
| Глины обладают высокими удерживающими свойствами по отношению к радионуклидам, $K_d$ для $^{90}Sr$ ~80; $^{137}Cs$ ~$10^2$;$^{239}Pu$ ~$10^4$;$^{241}Am$ ~$10^3$ г/см$^3$ | Удерживающие свойства солей весьма малы, $K_d$ для радионуклидов не превышает единицы | За счет наложенной минерализации гранитоиды обладают высокими удерживающими свойствами, скорость миграции радионуклидов в пределах $10^{-5}$–$10^{-10}$ м/год |

| | | |
|---|---|---|
| **G 5 – тектоника и сейсмичность** | | |
| Для региона характерна низкая сейсмическая и тектоническая активность. Существует вероятность движения блоков кристаллического фундамента | Регион с низкой сейсмической активностью. Продолжается рост соляных куполов в геологических масштабах времени | Массив является стабильной тектонической структурой с воздыманием 0,5– 0,9 мм/год. Сейсмичность территории (карта С) составляет 7 баллов |
| **G 6 – потенциальные ресурсы полезных ископаемых** | | |
| Выделение горного отвода для ПЗРО не нанесет ущерба обширным сырьевым запасам глин | Использование соляных куполов для изоляции РАО не повлияет на сырьевые запасы каменной соли | Породы массива неперспективны для промышленного оруденения |
| **G 7 – поверхностные условия и экстремальные природные факторы** | | |
| При эволюционном развитии региона в нем сохранятся существующие орографические и климатические условия. Максимальное природное воздействие – оледенение | В интервале от 120 до 6–4 тыс. лет назад на рассматриваемой территории последовательно развиваются трансгрессии Каспия – хазарская, хвалынская, новокаспийская | Палеогеографические и палеоклиматические реконструкции исключают на ближайшие десятки тысяч лет экстремальные природные явления, включая оледенение |
| **G 8 – техногенное вмешательство** | | |
| Предлагаемый участок расположен в промышленно развивающемся регионе, с возможностями контроля или маркировки горного отвода на требуемое время подземной изоляции РАО | Подземная изоляция долгоживущих радионуклидов требует учета и специальной маркировки горного отвода | Подземная изоляция долгоживущих радионуклидов требует учета и специальной маркировки горного отвода |

Геологические критерии МАГАТЭ явились основанием для дальнейшего развития комплексного подхода к оценкам приемлемости площадок для строительства ПЗРО, расширения и конкретизации критериев (необходимых условий) для перехода к последующим проектным этапам работ.

В 1985–1987 гг. специалистами ВНИПИпромтехнологии, Радиевого института им. В.Г.Хлопина, Института физической химии АН СССР и др. разрабатывались предложения для составления основных технических требований (ОТТ) к подземным могильникам отвержденных радиоактивных отходов в слабопроницаемых геологических формациях.

Требования опирались на отечественные и международные правовые, нормативные и научно-технические документы. В полной мере были использованы опубликованные к тому времени рекомендации Технического комитета МАГАТЭ по подземному захоронению РАО. Предлагаемые в ОТТ критерии руководствовались рекомендациями Международного Агентства [18, 27, 171-173].

Отдельные положения Требований были обоснованы экспериментальными исследованиями, выполненными отечественными научно-исследовательскими и проектными организациями в области обращения и удаления РАО.

В проекте требований в геотехнологическую систему подземной изоляции предлагалось включить:

- транспортно-технологические горные выработки для перемещения отходов к месту захоронения, размещения отходов, безопасного выполнения технологических операций;
- камеры (выработки) для размещения отходов;
- зону санитарного отчуждения, назначаемую вокруг камер (выработок, скважин и т.п.), в которых размещены отходы, являющуюся частью горного отвода и имеющую пространственную форму и размеры, зависящие от прогнозируемого ореола рассеяния радионуклидов в конкретных горно-технологических условиях;
- горный отвод – часть недр (литосферного пространства), представляемых для сооружения могильника и обеспечивающих его надёжную изоляцию;
- герметизирующие системы для изоляции камер захоронения и транспортно-технологических выработок;
- комплекс наземных сооружений, обеспечивающих безопасность доставки, размещения отходов и герметизацию могильника;
- контрольно-измерительные системы для наблюдений и мониторинга.

Особое внимание обращалось на то, что принятие технических решений, качественная и количественная оценка альтернативных вариантов должны осуществляться на основе системы критериев, в которую входили:

1) Критерии приемлемости геологической формации, которые определяют возможность использования конкретного участка для размещения необходимого комплекса выработок, охранных целиков, буферной зоны и для удержания захораниваемых радионуклидов в пределах зоны санитарного отчуждения при установленных структурных особенностях участка, его проницаемости, сорбционных способностях и гидрогеологической деятельности. Количественной характеристикой данного критерия является величина допустимой концентрации радионуклидов на внешней границе зоны санитарного отчуждения;

2) Строительно-технологические критерии, определяющие оптимальные условия размещения отходов в недрах земли. Их главным содержанием являются качественные и количественные характеристики и параметры подземных сооружений и элементов их конструкций, обеспечивающие размещение планируемого объема отходов и их надежную изоляцию в последующем. Определяющей количественной характеристикой является вероятность выхода допустимой концентрации радионуклидов за границы зоны санитарного отчуждения и за пределы горного отвода;

3) Критерии оптимальных свойств и качеств захораниваемых отходов определяют возможность размещения данного типа, состояния и объема отходов в конкретных горно-геологических условиях и подземном могильнике. Свойства и качества захораниваемых отходов должны быть таковыми, чтобы в результате накопления их в подземных условиях не возникало физических и химических процессов, способных вызвать непредусмотренные ранее изменения изолирующих способностей массива горных пород и инженерных конструкций, в том числе и в аварийных условиях;

4) Географические (геоморфологические) критерии, которые определяют возможность создания и безопасного функционирования могильника в развивающейся эколого-экономической системе региона. Могильник должен обладать таки-

ми качествами и свойствами, чтобы ни в ближайшие годы, ни в будущем его наличие не мешало экономическому, сельскохозяйственному и демографическому развитию района и региона. Географический (геоморфологический) критерий определяет условия размещения могильника на местности, при которых не создаются дополнительные трудности при существующих гидрологических, климатических, сейсмических и др. условиях;

5) Санитарно-экологические (радиоэкологические) критерии определяют качество принятых технических решений в целом. Критерий не допускает влияние захораниваемых РАО на экологическую систему, изменения и нарушения в биологических цепочках. Устанавливаются необходимые и достаточные условия реализации технических решений для достижения приемлемых уровней надежности на основе установленных правил, норм и стандартов;

6) Экономические критерии регламентируют оптимизацию технических решений. Конструкция могильника должна быть такой, чтобы при требуемом уровне надёжности и безопасности сооружения, затраты на его строительство, эксплуатацию, консервацию и герметизацию были бы минимальными. Данные критерии влияют на выбор необходимых и достаточных мер для достижения требуемой надёжности (безопасности) и сводятся к оценке различных вариантов;

7) Организационные критерии определяют условия, гарантии и меры, препятствующие непреднамеренной разгерметизации могильника или нарушения недр в пределах горного отвода. Для обеспечения выполнения этих условий должны быть предусмотрены мероприятия по четкому и долговечному обозначению положения могильника на местности и сохранению документации.

Захораниваемые отходы, упаковочные материалы и конструкции могильника должны отвечать следующим требованиям:

- подземному захоронению подлежат отвержденные и твердые радиоактивные отходы;
- состав отходов и содержания в них радионуклидов должны быть точно известны и отвечать нормативам технологических процессов;
- химический состав отходов должен быть таким, чтобы не возникало возможности образования вредных химических и микробиологических процессов. Вредными факторами являются:
  - образование газов в результате радиолиза;
  - химические реакции между продуктами захоронения и горными породами;
  - возникновение биологических процессов;
  - наличие в составе отходов взрывоопасных продуктов и смесей;
  - наличие пожароопасных продуктов и смесей;
  - наличие свободных растворов;
  - наличие в отходах реагентов, влияющих на подвижность радионуклидов;
- свойства отходов должны быть такими, чтобы изменения первоначальных свойств и состояния горного массива, вызванные воздействием отходов, были минимальными и не ухудшали изолирующие свойства горных пород;
- отвержденные отходы должны иметь долговременную физическую устойчивость к термическому и радиационному воздействию;
- материалы и конструкции упаковок отходов должны обладать механической прочностью, достаточной для гарантии сохранности РАО во время их транспортировки, размещения в камерах и герметизации могильника;

- для упаковок отходов должны использоваться материалы, которые не будут представлять в будущем ценности в качестве полезного сырья;
- инженерно-технические конструкции и искусственные барьеры должны обеспечивать безопасное обращение с отходами при оптимальных затратах.

Перечисленные выше требования определяют по существу приемлемость РАО для подземной изоляции в геологических формациях.

Требования по своему содержанию являлись промежуточным руководящим документом, разграничивающим переход от научно-исследовательского этапа работ по выбору площадок к проектно-изыскательскому этапу. Геологические критерии дополнялись другими требованиями, использовались нормативно-правовые документы, правила и ГОСТы.

Проект ОТТ-87 (3-я редакция 1987 г.) по ряду причин не был доведен до статуса нормативного документа.

В 1990 г. МАГАТЭ разработало технические критерии для подземного захоронения высокоактивных отходов (ВАО), в которых были развернуты и конкретизированы исходные базовые правила [20]. Эти технические критерии (без количественных оценок) остаются до нашего времени наиболее полным базовым вариантом требований для захоронения ВАО в глубоких геологических формациях.
Технические критерии имеют следующие формулировки:

- долгосрочная безопасность захоронения ВАО основывается на многобарьерной концепции и должна основываться на характеристике системы захоронения в целом. Признается, что геологические барьеры играют главную роль для обеспечения долгосрочной безопасности;
- необходимо устанавливать критерии приемлемости содержания радионуклидов в отходах, согласующиеся с возможностями проектируемого могильника;
- ВАО, которые будут помещены в могильник, должны быть в твердой форме с физическими и химическими свойствами, удерживающими радионуклиды в конкретной системе захоронения;
- система захоронения ВАО должна быть спроектирована так, чтобы обеспечить полную изоляцию радионуклидов на начальный период времени;
- могильник ВАО должен быть спроектирован, построен, заполнен и герметизирован так, чтобы все защитные функции горного массива были сохранены после его герметизации;
- могильник ВАО должен быть спроектирован и заполнен отходами так, чтобы любой делящийся материал оставался в подкритичной геометрии;
- могильник должен быть размещен на достаточной глубине, исключающей влияние внешних воздействий и процессов, а геологическая среда будет препятствовать повреждению физических барьеров и ограничивать перенос радионуклидов в окружающую среду;
- место для могильника должно быть выбрано таким образом, чтобы отчуждаемый горный отвод не находился в непосредственной близости к природным ресурсам и ископаемым, которые менее доступны в других метах;
- радиационная безопасность системы захоронения должна быть убедительно продемонстрирована на предельно адекватных моделях оценки безопасности;

- для всех компонентов системы захоронения и всех операций проектирования, сооружения, эксплуатации и герметизации могильника, должна быть установлена программа оценки качества, соответствующая стандартам и критериям.

В 1992 г. состоялась Международная конференция «Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики», в докладах которой получили развитие критерии выбора геологической среды для строительства хранилищ [174, 175]. В докладе Радиевого института [175] рассмотрены направления исследований, обеспечивающие выполнение требований геохимических критериев и необходимые для обоснования и проектирования подземных объектов. В их число вошли:

- номенклатура РАО, радионуклидный состав, химические формы, формы стабилизации;
- проницаемость инженерных барьеров;
- проницаемость горного массива относительно флюидов и растворов;
- поведение радионуклидов на геохимических барьерах по путям их миграции, в том числе миграция в окружающей среде;
- коэффициенты перехода дозообразующих радионуклидов в цепочке «порода–вода–почва–растение–животное–человек» применительно к местным условиям;
- внешнее облучение человека радионуклидами из верхних слоев почвы.

В этом же докладе обращено внимание на трудности долгосрочного прогнозирования (10 000 лет и более). Для этого кроме анализа изменений климата и ландшафта, приводящих к перестройке водного режима, необходимо привлечение данных по природным аналогам и изотопной геохронологии, в конечном итоге – требуется разработка критериев прогнозирования условий изоляции РАО.

До настоящего времени при выборе геологических формаций и площадок для строительства ПЗРО в зарубежных и отечественных исследованиях в качестве базовой составляющей широко используются критерии МАГАТЭ, дополняемые критериями, учитывающими специфику горных пород и геологических структур конкретного региона.

Мировой опыт подтверждает обоснованность использования комплексных критериев в качестве необходимых условий обеспечения безопасности изоляции РАО. Для оценки перспективных площадок проводятся комплексные геологические, геофизические, гидрогеологические, геохимические и другие исследования, по результатам которых создается начальная база данных, характеризующих вмещающую геологическую среду.

Дополнительная информация становится необходимой после утвержденного выбора площадки строительства, которая соответствует базовым критериям вмещающей среды. Приоритет и определяющее значение геологического фактора на первом этапе поисково-аналитических работ очевиден.

Постоянно растущий объем знаний о геологических формациях как среды для подземной изоляции РАО выдвигает всё новые и новые критерии, выполнение которых обеспечивает безопасность ПЗРО. Возрастает значение радиоэкологических требований. Разрабатываются методы ранжировки, в том числе формальные с

произвольным распределением «положительных» и «отрицательных» баллов для различных по содержанию критериев.

В сложившейся ситуации целесообразно определять пригодность участка или площадки, используя критериальный анализ, для которого производят ранжировку самих критериев, выбирая из множества требований ключевые условия стабильности (или дестабилизации) подземной изоляции для конкретных геологических условий. Обоснование оптимизации критериев будет существенно зависеть от детальности и достоверности исходных данных, достаточности и представительности проведенных натурных испытаний.

Оптимизация критериев позволяет сосредоточить исследования на тех свойствах геологической среды, которые являются определяющими для оценки безопасности ПЗРО. В первую очередь – барьерные возможности относительно радионуклидов и вероятность изменения тектонического и гидрогеологического режимов.

Дальнейшее развитие критериального анализа переводит исследования на решение следующей проблемы оценки безопасности ПЗРО – разработки долгосрочного прогноза условий подземной изоляции.

Критериальный анализ показал, что для верхневендских и нижнекембрийских глин Ленинградской области основным фактором дестабилизации и нарушения изоляции ПЗРО могут быть существенные подвижки блоков кристаллического фундамента с последующими разрывными дислокациями пласта глин и обводнением подземных выработок хранилища. Этот маловероятный сценарий убедительно компенсируется условиями нормального эволюционного развития региона, при котором само наличие мощных пластов водонепроницаемых глин, обладающих удерживающими свойствами по отношению к радионуклидам, является достаточным для принятия решения о размещении в них ПЗРО.

## 7. Оценки риска для геотехнологической системы изоляции РАО

К началу нового тысячелетия уровень развития научных исследований и накопленный практический опыт по обращению с РАО позволили сформировать общепринятую концепцию изоляции отходов в геологических формациях и сделать заключение о безопасности принятой многобарьерной системы защиты [176–180]. На основании разработанных критериев и оценок пригодности горных пород возможно строительство геологических хранилищ, способных изолировать радионуклиды на десятки и сотни тысяч лет.

В концепции принимается, что геологическое захоронение является геотехнологической системой, в функции которой входят:

- изоляция РАО от биосферы на чрезвычайно длительные периоды времени;
- обеспечение низких по сравнению с уровнями естественной радиоактивности, концентраций захораниваемых радионуклидов, которые могут достигнуть биосферы;
- доказательства малых рисков подземной изоляции радионуклидов.

Геотехнологическая система представлена двумя подсистемами:

◊ Инженерно-технологической, в которую входят:

1) Радиоактивные отходы:
   - ⊂ состав и количества присутствующих радионуклидов;
   - ⊂ формы стабилизации РАО;
   - ⊂ вид упаковок.

2) Строительно-технологический (горно-инженерный) комплекс:
   - ⊂ параметры и конструкционные характеристики наземных и подземных сооружений;
   - ⊂ инженерные барьеры;
   - ⊂ формы и аппаратура контроля;
   - ⊂ противоаварийная защита.

◊ Природной подсистемы, в которую входят:
   - ⊂ наземные компоненты площадок (рельеф, гидросеть, грунт, подземные воды, коренные горные породы);
   - ⊂ элементы подземной части строительства (горные породы, гидрогеологические, геохимические и прочие характеристики геологической среды);
   - ⊂ изменяющиеся природные факторы, влияющие на условия изоляции РАО, – климат, тектоника, водный режим и др.

Анализ всех сложных геотехнологических систем, в том числе и систем подземной изоляции РАО, проводится по двум направлениям [181]:

- функциональному, который в первую очередь относится к составу, структуре и задачам инженерно-технологической подсистемы;
- генетическому, рассматривающему систему в развитии и разрабатывающему последствия техногенного воздействия и условия стабильности системы в будущем, т.е. разработку долгосрочного прогноза.

При анализе геотехнологической системы необходимо оценивать корректность используемых количественных параметров. Для принятия решений используются, как правило, количественные оценки, и научная обоснованность последних будет определять успех или неудачу реализации принятых проектов.

Для инженерно-технологической подсистемы существуют правила, нормы и стандарты, соблюдение которых дает гарантии безопасности в пределах используемых научно-технических документов.

Для природной подсистемы получение корректных количественных параметров существенным образом затруднено. В 1990 г. специалисты Национальной Академии США отмечали [2] следующее.

«Само существование больших баз данных и сложных компьютерных моделей ошибочно предполагает, что можно спроектировать геологическое хранилище, как в случае АЭС или ракетного авианосца, параметры которых могут быть рассчитаны с учетом их непродолжительного срока службы. Такая концепция точной предсказуемости будет продолжать приводить к срывам и неудачам».

Математическое описание геологических объектов и геохимических процессов затруднено по ряду объективных причин. В основном это связано с тем, что сам объект исследований предельно сложен и специфичен.

Разнородность геологических направлений, которые необходимо привлечь для решения проблемы захоронения радиоактивных отходов в геологических формациях, делает бесперспективным поиски общих законов и теорий, тем более «типовых» ситуаций или площадок. В большей степени «обеспечены» научными законами и теориями кристаллография, минералогия, геохимия, петрология. В меньшей степени обеспечены, или практически не обеспечены такие направления, как стратиграфия и тектоника [1]. В одной и той же модели прогноза условий подземной изоляции могут присутствовать составные элементы с различными уровнями «доверия». Например, достаточно корректные результаты определения коэффициентов распределения и в большей степени произвольное допущение развития какого-либо тектонического процесса.

При анализе природных геологических и геохимических систем методы математической формализации до настоящего времени имеют ограниченное практическое использование [9]. Введение понятий «верификация, векторизация, индексация» в модель или базу данных геологических условий площадок ПЗРО [182] не исключают получаемые в конечных результатах неопределенности, обусловленные «упрощенной дискретизацией параметров, неточностями входных параметров, погрешностями измерений и прочими причинами» [183].

Существенно, что «Любая математическая модель, претендующая на роль достоверной, должна базироваться на значениях определенных параметров, которые не могут быть получены иначе, чем в полевых условиях» [184]. Математическая формализация должна быть обоснована большим объемом комплексных натурных исследований, получаемых, как правило, в подземных лабораториях.

В настоящее время нельзя составить точный прогноз поведения сложных природных систем (геологических, геохимических, экологических и пр.) под воздействием возмущающих факторов техногенного внедрения – создания подземных хранилищ РАО. Получаемые оценки имеют неопределенность, которая сохраняется независимо от того, сколько дополнительной информации будет получено. Изменчивость ряда параметров природной системы определяется не флуктуациями, а самой структурой системы. Дополнительные осложнения вызывает зависимость состояния и поведения геологических формаций от истории их формирования и последующего развития.

Всё это требует исключительно строгого и объективного контроля принимаемых количественных параметров, как для отдельных критериев, так и для других количественных оценок. Особого внимания при анализе геотехнологических систем требует широко распространенный количественный параметр – радиационный риск.

Анализ безопасности удаления РАО в геологические формации базируется на рекомендациях Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ), рассматривая различные модели выхода радионуклидов в биосферу и варианты формирования дозовых нагрузок – уровней риска для различных объектов [27, 185]. Методология анализа риска используется при анализе безопасности производственных объектов, обследованиях радиоактивного загрязнения, для контроля фонового содержания химических веществ и т.д. [186, 187].

В настоящее время накоплен опыт радиационного мониторинга, исследований аварий, усовершенствованы методики, разработаны нормативы и прочие документы, позволяющие оценивать риски для населения и окружающей среды при эксплуатации радиационно-опасных объектов и производств [188].

Для оценки безопасности хранения и удаления РАО составляются различные модели, которые включают основные компоненты геотехнологической системы изоляции:

- изолируемые радионуклиды (состав, количества);
- устойчивые матрицы, включающие радионуклиды (стеклomассы, кристаллические керамики и пр.);
- контейнеры физической защиты (металлические, смешанного состава);
- буферные материалы, выполняющие гидроизолирующие, сорбционные, стабилизирующие и прочие функции (бентонитовые глины и их смеси);
- вмещающие горные породы, имеющие низкую проницаемость, малую обводненность и высокие барьерные свойства по отношению к изолируемым радионуклидам;
- стабильные геологические формации района размещения хранилища с предсказуемыми условиями своего развития.

Условия безопасности геотехнологической системы изоляции определяются вероятностью выхода радионуклидов за установленные границы горного отвода и попадания в сферу обитания человека в количествах свыше установленных норм.

Расчетными моделями определяются возможность и наиболее вероятные параметры миграционных процессов, которые со временем могут произойти в хранилище и его геологическом окружении – в ближней и дальней зонах миграции. В моделях прослеживается весь путь движения какого-либо радионуклида: выход из матрицы, проникновение через контейнер и буферную защиту в геологическое окружение, миграция с подземными водами до открытых вод и источников водоснабжения, распределение по пищевым цепочкам. Проводится анализ и даются количественные параметры основных компонентов природной миграционной системы: каналов миграции, подвижной миграционной среды; структурно-минералогического окружения (геологической среды). Модельные расчеты завершаются оценками радиационного риска по определению индивидуальных доз для всего времени изоляции РАО.

За последние десять лет по результатам крупных международных программ подтверждена возможность создания подземного горнотехнического комплекса, инженерные барьеры которого полностью обеспечивают безопасное хранение РАО в течение, как минимум, 300 лет. При благоприятных геологических условиях конструкции хранилища могут обеспечить необходимый уровень безопасности на протяжении десятков и даже сотен тысяч лет [26, 177-179, 189, 190].

Адекватность полученных данных для системы искусственных инженерных барьеров не вызывает сомнений, поскольку все они получены и воспроизведены как в лабораторных экспериментах, так и в результате многочисленных натурных испытаний.

Проблемы возникают при моделировании и долгосрочном прогнозировании природных миграционно-барьерных процессов, требующих формализации для предельно сложной системы – геологической среды. Современный уровень науки не всегда может дать точный прогноз поведения во времени природных геохими-

ческих, гидрогеологических, геоэкологических и прочих систем под воздействием возмущающих факторов техногенного внедрения (подземного комплекса изоляции РАО). Во всех случаях количественные оценки опираются на многие предпосылки и вероятностные события.

Серьезные возражения вызывает противоречие изначального подхода к оценкам безопасности подземной изоляции РАО, поскольку:

- объектом изучения является геохимическая система миграции, состояние и развитие которой подчиняются природным законам;
- конечный результат исследований – дозы излучения и риск – являются искусственно вводимыми социально-техническими понятиями с изменяющимися количественными оценками.

Ситуация осложнена тем, что проблема удаления РАО, решение которой прежде считалось прерогативой государства и специалистов, стала теперь достоянием широкой общественности. При этом никакие современные расчетные модели не могут полностью доказать и тем более прогнозировать на длительные сроки безопасность какой-либо человеческой деятельности, поскольку признание допустимого риска остается вопросом не объективных аргументаций, а эмоций [191].

В 2002 Комитет МАГАТЭ по разработке норм безопасности по обращению с радиоактивными отходами (Waste Safety Standards Committee – WASSC), а также аналогичные комитеты стран–членов Агентства по атомной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (ААЭ/ОЭСР) рассмотрели первый проект норм. Эксперты признают, что наряду с разработкой научно-технических требований необходимо учитывать общественное мнение, которое в настоящее время является критическим фактором при принятии решений, связанных с риском для населения. Многие вопросы согласовать не удалось, в том числе по оценкам безопасности хранилищ. Экспертами и специалистами 13 стран сделан вывод, что в ряде случаев показатели «дозы излучения» и «риск» необходимо заменить более определенно прогнозируемыми количественными характеристиками, например, концентрациями радионуклидов в окружающей среде [192].

Одновременно в области исследований безопасности любого вида деятельности произошел переход от концепции «нулевого риска», или «абсолютной безопасности», к концепции «приемлемого риска». Несколько ранее была переработана геологическая концепция: переход от «хранения и удержания» РАО к «контролируемому высвобождению и дисперсии» в пределах заранее ограниченного объема окружающих горных пород [193].

В начале века произошли изменения по отношению к проблеме удаления отходов на правительственных уровнях. В 2003 г. Европейская комиссия потребовала от правительств стран-членов Европейского союза ускорить принятие национальных программ по удалению ВАО, ОЯТ и долгоживущих среднеактивных отходов, сделать выбор площадок не позднее 2008 г. и начать эксплуатацию хранилищ к 2018 г. [194].

Новые требования изменили содержание и направленность научных исследований по оценкам безопасности. Традиционные работы 80-90-х годов с количественными определениями дозовых нагрузок (уровней риска) для интервалов времени в сотни тысяч или миллионы лет дополнились (или сменились) детальными исследованиями геотехнологических систем изоляции, направленными на обеспечение их долгосрочной безопасности и уменьшение риска. Несмотря на новые

научно-технические возможности и длящиеся десятилетиями исследования вариантов обращения с РАО, оптимальных решений пока не найдено.

Использование количественных значений риска для оценок безопасности подземной изоляции РАО или проведение эколого-экономической оценки хранилища с использованием риска в качестве критерия – это возврат к пройденным ошибкам. Техногенный риск, вычисленный как вероятность потенциально возможных негативных последствий, остается «виртуальным» показателем, не влияющим на конечную целевую оценку – медицинские показатели [195].

Оценка дозы как основного показателя безопасности при прогнозировании не корректна. Влияние на дозовые нагрузки жизнедеятельности человека и окружающей среды в будущем достоверно не определено. Поэтому более целесообразно оценивать безопасность значениями концентраций техногенных радионуклидов в реках и подземных водах и сравнивать их с концентрациями природных радионуклидов [179]. Заключение о том, что вклад проектируемого ПЗРО в суммарную радиоактивность поверхностных вод не превысит 1 % от уже существующего природного уровня, будет восприниматься населением с большим пониманием, чем заявление о низких значениях риска, равных $10^{-6}$ или $10^{-7}$.

В сложившейся достаточно сложной ситуации для выбора научно-обоснованных количественных оценок, определяющих степень безопасности (или опасности) подземных хранилищ РАО, наиболее целесообразно разделить проблему по уровням достоверности количественных оценок.

1) Количественные данные, полученные опытным путем для инженерно-технологических характеристик устойчивости матриц, сохранности контейнеров и оценки длительности функционирования буферных материалов. Эти параметры определяют количества вышедших за пределы искусственных барьеров радионуклидов при отсутствии внешнего вмешательства, нарушающего горнотехническую систему изоляции. Безопасность хранилища (300–10 000 лет) обеспечивается контролем качества выполнения технических сооружений и инженерных барьеров, соблюдением инженерно-технологических нормативов, законодательно-правовых актов.
2) Оценки возможности миграции радионуклидов за пределы расчетного ореола рассеяния и выхода в зоны активного водообмена в количествах, превышающих установленные нормы. Радиационные риски рассчитываются для различных радионуклидов, различных сценариев развития миграционных процессов и математических моделей. Безопасность подземной изоляции (более 10 000 лет) обеспечивается:
   - степенью соответствия вмещающей среды хранилища геологическим критериям выбора площадок;
   - возможностью моделировать миграцию радионуклидов на основе известных закономерностей природных геохимических процессов.
3) При долгосрочном прогнозировании рассчитывается риск негативных последствий вероятностных случайных событий или процессов с вероятностными характеристиками. При анализе безопасности рассматриваются и достаточно маловероятные природные события, что соответствует общепринятому принципу для радиационно-опасных объектов: «вероятность существует, как бы мала она не была». Безопасность долгосрочной

изоляции обеспечивается совершенствованием горно-технологических разработок в процессе эксплуатации хранилища и достигнутым ко времени его закрытия научно-техническим уровнем, позволяющим уточнять вероятность прогнозируемых событий и необходимость принятия превентивных мер защиты.

Принимая вышесказанное, геотехническую систему подземной изоляции РАО следует характеризовать по трём различным уровням безопасности:

- инженерно-технологическому;
- геолого-аналитическому;
- по оценкам вероятностных событий.

Достоверность количественных оценок трёх уровней изменяется от экспериментально полученных значений с расчетными статистическими ошибками до случайных событий, имеющих вероятностный характер своей реализации.

## 8. Проблемы долгосрочного прогнозирования условий подземной изоляции РАО

Долгосрочное прогнозирование остается наиболее сложной и одновременно наиболее уязвимой со стороны критики проблемой изоляции РАО, в состав которых входят долгоживущие радионуклиды с периодами полураспада более 100 лет (табл. 35).

Принципы безопасности и технические критерии МАГАТЭ, связанные с захоронением радиоактивных отходов, распространялись на события и процессы, которые могут произойти в ПЗРО в отдаленном будущем [20]. При этом авторы документа понимали, что через длительные промежутки времени будет невозможно предсказать ни места, ни характеристики жизни людей. Оценки доз и риска «могут оказаться бессмысленными для периодов, превышающих несколько тысяч лет». Для подтверждения безопасности кроме понятия «доза – риск» понадобятся другие независимые оценки.

Таблица 35

Долгоживущие радионуклиды, присутствующие в радиоактивных отходах

| Радионуклид | Период полураспада, лет |
|---|---|
| Технеций-99 | $2{,}13 \cdot 10^5$ |
| Иод-129 | $1{,}67 \cdot 10^7$ |
| Цезий-135 | $3 \cdot 10^6$ |
| Нептуний-237 | $2{,}14 \cdot 10^6$ |
| Уран-234 | $2{,}45 \cdot 10^5$ |
| Уран-235 | $7{,}04 \cdot 10^8$ |
| Уран-236 | $2{,}34 \cdot 10^7$ |
| Уран-238 | $4{,}46 \cdot 10^9$ |
| Плутоний-239 | 24 110 |
| Плутоний-242 | $3{,}76 \cdot 10^5$ |
| Америций-241 | 432,2 |
| Америций-243 | $7{,}37 \cdot 10^3$ |

Проблемы прогнозирования относятся не только к долгоживущим радионуклидам, требующим оценки условий безопасности на сотни тысяч лет и более, но и к отходам, содержащим сравнительно короткоживущие радионуклиды, для которых необходима изоляция на 300–500 лет. Безопасность на несколько сотен лет должны обеспечивать инженерные барьеры, сроки функционирования которых установлены рамками соответствующих правил и стандартов.

Однако полная локализация РАО в пределах инженерных барьеров не всегда может быть гарантирована. Приповерхностные хранилища представляют опасность в первую очередь для подземных вод [196]. Влияние неучтенных природных факторов, способных изменить гидрогеологический или рельефообразующий режим на участке расположения хранилища, переводят потенциальную опасность в реальное загрязнение объектов внешней среды. Неопределенность краткосрочного прогноза возрастает для регионов с развивающейся экономикой и инфраструктурой. В этом случае хранилище РАО является объектом, который необходимо защищать от негативного воздействия внешних факторов не только природного, но и техногенного происхождения [197]. При этом защита кроме системы физических барьеров должна включать надёжную информационную составляющую – систему радиационного мониторинга, контроля и сигнализации.

Для прогнозирования состояния изоляции долгоживущих РАО необходимо привлекать комплексные геологические методы, поскольку за сотни тысяч лет могут произойти достаточно существенные проявления эволюционных циклов развития литосферы, затрагивающих перемены гидрогеологического и рельефообразующего режимов. Однако невозможно точно определить, какие изменения и в какое время произойдут в системе захоронения, в окружающей её структурно-геологической, гидрогеологической среде и пр. В результате при оценках безопасности возникают неопределенности различных категорий [198]:

- неопределенности системы захоронения, связанные с недостатком знаний о взаимосвязи между природными процессами и о самих процессах;
- неопределенности сценариев, связанных с трудностью предсказания изменений системы захоронения в будущем в результате природных явлений или человеческой деятельности;
- неопределенности концептуальных моделей, связанных со сложностью моделирования долгосрочных эволюционных процессов, особенно если имеются несколько альтернативных путей эволюции;
- неопределенности математических моделей, связанных с корректностью учета многих факторов при различных расчетах;
- неопределенности параметров, связанных с неточным знанием отдельных величин или их границ в модельных расчетах.

В случае долгосрочного прогнозирования значительные неопределенности возникают для критерия доза – риск. В оценки этого критерия закладываются сегодняшние условия быта и поведения человека. Такая оценка некорректна, поскольку даже элементарный анализ изменений, произошедших в жизни человека за прошедшие 10 000 лет, дает все основания для невозможности их предсказаний на последующие 10 000 лет. Поэтому в прогнозных разработках критерий «доза – риск» необходимо дополнить, а в некоторых случаях заменить другими показателями, например, такими как естественные индикаторы безопасности [199]. Естественный

(природный) индикатор представляет результат сравнения концентрации радионуклидов из состава РАО и естественных радионуклидов в объектах окружающей среды. Такое сравнение даёт наиболее приемлемое заключение об эффективности изоляции геотехнологической системы [200].

За прошедшие 30 лет в ходе выполнения международных и национальных программ разработаны многочисленные варианты прогнозных сценариев поведения радионуклидов, изолируемых в различных геологических формациях [27, 201].

Согласно рекомендации МКРЗ, для каждого могильника разрабатываются два различных сценария:

- сценарий, описывающий прогноз радиологических последствий вследствие естественного (со временем) разрушения или трансформации искусственных инженерных барьеров;
- сценарии, связанные с аварийным разрушением могильника.

Защитные эффекты отдельных барьеров объединяются в единую систему взаимосвязанных и взаимовлияющих процессов, происходящих в различных зонах литосферного пространства в различные интервалы времени. Для проверки теоретических расчетов используются природные аналоги [202]. Было показано, что единого универсального аналога не существует. Достаточно полную и доказательную информацию может дать лишь изучение разнотипных аналогов, которые можно использовать как в научных прогнозах, так и для демонстрации общественности [203].

Сложность долгосрочного прогнозирования потребовала составления методической структуры и последовательности анализа прогнозируемых событий. В Радиевом институте для этого использовался имеющийся опыт изучения развития геологических и климатических событий во времени для различных регионов: Прикаспийской низменности, Средней Сибири и Ленинградской области, а также при анализе природных аналогов [12, 14, 21, 23, 103, 146, 168, 204].

Следует отметить, что для долгосрочного прогнозирования структурно-минералогические различия горных пород (глины, каменная соль, гранитоиды) сказываются в меньшей степени, чем, например, при разработках геологической концепции или критериев. Прогноз рассматривает крупные, часто глобальные природные явления, такие как климат, движение литосферных блоков, проявляющееся на значительных территориях и включающее разнообразные геологические структуры. Специфические особенности различных пород, естественно, остаются, но проявляются они в основном для вторичных процессов, например миграционных, возникающих под влиянием первичных побуждающих факторов - тектонических и климатических.

Для составления долгосрочного прогноза предложены критерии, которые содержали следующие исходные положения [204]:

- в сценариях прогноза необходимо соблюдать взаимосвязь с геологическими критериями и результатами изучения глобальных изменений;
- нарушение изоляции ПЗРО может произойти как за счет природных факторов, так и при воздействии технических средств;
- критерии должны быть обоснованы научным анализом последствий длительного воздействия подземного технологического объекта на конкретный участок горного массива, горных пород;

- основой прогноза может быть реконструкция геохимической обстановки недавнего прошлого, включая антропогенную составляющую;
- нарушение изоляции ПЗРО наиболее вероятно в случае изменения трёх взаимосвязанных природных факторов: мигрирующих растворов, тепловых потоков, разрывных нарушений в геологической среде;
- для критериев прогноза пространственно-временной изоляции радионуклидов в геологических формациях необходимо использовать наиболее близкие природные и техногенные аналоги.

Научные и методические направления разработки долгосрочного прогноза были составлены по результатам изучения гранитоидов Нижнеканского массива[14, 23]. В качестве основы для прогноза рекомендуется использовать палеореконструкции эволюционных, циклических и вероятностных процессов и событий.

Критерий, объединяющий выбор площадок и полноту их изучения, сформулирован как «стабильность и предсказуемость». Комплексная геологическая информация, полученная к моменту строительства ПЗРО, должна быть в таком объеме, который бы обеспечил составление прогноза безопасности и возможность внесения корректировок в конструкцию подземного комплекса и в систему его инженерных барьеров.

В процессе проведенных исследований [23, 168] определились основные методы составления прогноза, включающие:

- дифференциальный анализ объектов по различным пространственным и временным параметрам (прогноз – глобальный, региональный, локальный; прогноз на различные интервалы времени – 500 лет, 100 000 лет, 1 миллион лет);
- итеративный анализ прогнозируемых процессов всего иерархического ряда геологических объектов – от глобальных структур до отдельных минералов;
- использование в качестве базовой характеристики изучаемого района геоинформационной системы (ГИС) с оценками экстремальных ситуаций;
- для прогностической экстраполяции используются палеореконструкции развития геологических структур, рельефа и климата; хроностратиграфические, палеогидрогеологические, палеосейсмологические и прочие исследования;
- для решения ключевого вопроса безопасности – прогнозирования миграционных процессов – выделяются два основных фактора, определяющие миграцию и изменяющиеся во времени – тектонический и климатический;
- для количественных оценок используются методы изотопной геохимии и геохронологии;
- для подтверждения научного обоснования долгосрочного прогноза используются природные и техногенные аналоги;
- надёжность долгосрочного прогноза повышается в случае выбора площадок не только по критерию стабильности, но и по критерию предсказуемости развития геологических формаций региона;
- в локальных структурах неоднородности более контрастны, чем в крупномасштабных;
- степень определенности и достоверности прогноза уменьшается по мере ограничения размеров структуры: от глобальных до локальных.

**8.1.Глобальное прогнозирование.**

Границы долгосрочного прогноза удалены от наших дней на сотни тысяч или миллион лет. Предсказание, даже научно обоснованное, на столь далёкое будущее неспециалистами не воспринимается. Для геологии один миллион лет – сравнительно небольшой отрезок истории Земли, но одновременно достаточный для проявления эволюционных циклов литосферы, гидросферы и биосферы: морские трансгрессии и регрессии, оледенения, изменения расположения климатических зон и пр.

За всю историю человечества накоплены обширные знания по использованию недр, от примитивных выработок по добыче кремния в палеолите до современного спутникового зондирования Земли. Вскрыты фундаментальные свойства литосферы, установлены законы формирования и развития геологических тел, взаимосвязь различных оболочек планеты. Вскрытые закономерности позволяют научно обосновать влияние геологических и климатических факторов на ПЗРО, дать прогноз условиям подземной изоляции, разработанный на основании реставрации достаточно детально изученных событий сравнительно недавнего геологического прошлого.

В Российской Федерации проводятся исследования глобальных изменений природной среды и климата, разрабатываются прогнозные модели развития и изменения литосферы, гидросферы, атмосферы [205, 206]. Реализуется ряд целевых проектов, связанных с удалением радиоактивных отходов: «Разработка методов прогнозной оценки изменений природной среды и климата на территориях захоронения радиоактивных отходов», «Долгосрочный прогноз климатических и геокриологических условий на территории размещения проектируемых хранилищ РАО (архипелаг Новая Земля)».

Для полноты охвата геологических и климатических процессов целесообразно кратко рассмотреть события, произошедшие на нашей планете за последние миллионы лет.

В кайнозое (последние 60 млн. лет) завершается Альпийский тектономагматический цикл развития литосферы. В палеогене (65–23,3 млн. лет) столкновение двух литосферных плит – Индостанской и Евразийской привело к образованию крупнейшего современного горного пояса – Гималайского. В неогене (23,3–1,64 млн. лет) преобразования на материках связано с завершением формирования структур альпийской тектонической эпохи, образованием к концу неогена пояса молодых складчатых структур Пиренеев, Альп, Апеннин, Карпат, Кавказа, Гиндукуша, Памира, Гималаев, гор Малой Азии, Ирана, Мьянмы и Индонезии. Поднятия и последующие блоковые смещения охватили различные структуры более раннего возраста в Сибири, Центральной Азии, на Скандинавском полуострове и Урале. В кайнозое была заложена Восточно-Африканская зона разломов, Байкальская система рифтов. Для Евразии были характерны трансгрессии и регрессии моря [207–209].

Ближе к нашему времени интенсивность горообразовательных процессов снижается, сохраняя медленные трансформационные процессы на границах литосферных плит и вулканическую активность по активным разломам тихоокеанского пояса, Средиземноморской зоны. Это свидетельствует о том, что альпийский орогенез еще не закончился. Однако в основном на поверхности Земли преобладают

стабильные платформенные структуры, происходит эволюционное сравнительно медленное развитие геологических процессов.

Наиболее существенные изменения в кайнозое происходят в связи с оледенениями, покрывшими большие территории материков (более 27 %) Северного полушария (рис. 25). Глобальное похолодание началось 2,5 млн. лет назад, когда завершился тектонический подъем Тибета и Гималаев. В результате чего:

- изменилась циркуляция воздушных потоков в системе океан – суша;
- на поверхность выведено большое количество пород, выветривание которых с поглощением из атмосферы $CO_2$ привело к похолоданию;
- начавшееся похолодание привело к появлению покровных ледников в различных регионах Северного полушария.

Около 1,6 млн. лет назад, в начале плейстоцена, климатические изменения приобрели ритмический характер. На рубеже 1 млн. лет происходит переход 41-тысячелетней цикличности изменения объема льдов к 100-тысячелетней. Цикличность климатических изменений обусловлена изменениями орбитальных параметров Земли. Одновременно сказывается влияние изменения конфигурации континентов, перестройка их поверхности, изменение циркуляции воздушных потоков в системе океан – суша.

В Северной Европе наблюдалась следующая последовательность наиболее поздних, приближающихся к нашему времени климатических фаз:

| | | |
|---|---|---|
| 350–225 тыс. лет | - | рисский межледниковый теплый период; |
| 225–105 тыс. лет | - | последняя стадия рисского оледенения; |
| 105–65 тыс. лет | - | рисс–вюрмское межледниковье; |
| 65–32 тыс. лет | - | две стадии вюрмского оледенения; |
| 30–20 тыс. лет | - | последний теплый межстадиальный период верхнего плейстоцена; |
| 12–10 тыс. лет | - | последнее похолодание верхнего плейстоцена; |
| 12–9 тыс. лет | - | начало современного потепления в голоцене. |

С изменением термических условий на поверхности Земли была связана последняя регрессия океана на 80–140 м в интервале 15–20 тыс. лет назад. Сокращение ледников происходило быстро, и 6–7 тыс. лет назад уровень мирового океана вышел на современные отметки. До настоящего времени уровень остается сравнительно устойчивым [206].

**Рис. 25**. Ледниковые покровы и морские льды северного полушария в последний ледниковый период (по данным работы [210]).

Современный уровень знаний о Земле позволяет разработать основные методы прогноза основных процессов, происходящих в недрах и на поверхности площадок размещения РАО [178]. При этом предвидение тенденций и перспектив развития тех или иных объектов строится на основе знания закономерностей изменения в прошлом [1]. Фундаментальный принцип геологического прогнозирования – «настоящее – ключ к прошлому, и, как следствие – будущее уже было в прошлом» [88].

Например, если район ПЗРО «расположен в пределах древней платформы, то совершенно определенно можно говорить о том, что и через сто тысяч лет, и через миллион лет на этой территории будет сохраняться платформенный режим, характеризующийся такой же минимальной сейсмичностью и плавными вертикальными движениями» [4]. Экстраполируя данные о прошлых колебаниях отдельных блоков конкретного региона, можно прогнозировать характер таких колебаний на сотни тысяч лет вперед [179, 211]. При этом изначальным условием безопасности долгосрочной изоляции РАО является соблюдение базовых и технических критериев [18, 20] или соответствующих государственных правил. Например, федеральных правил США, в которых требуется, чтобы «Природа и темпы тектонических, гидрогеологических, геохимических и геоморфологических процессов, действующих в геологической среде могильника в течение четвертичного периода, не нарушат или будут способствовать изоляции отходов в могильнике» [212].

В будущем наряду с геологическими факторами на условия изоляции ПЗРО будут оказывать влияние внешние факторы – эрозия поверхности, оледенения и пр.

Проведенный анализ позволяет принять в качестве основы следующие средние количественные оценки процессов выветривания и эрозии [88]:
- средние величины химической эрозии – 24 т/км$^2$; физической – 150–200 т/км$^2$;
- абляция (поверхностная механическая) – 5–8 см за 100 000 лет;
- выветривание кристаллических пород – 0,3–3 см за 100 000 лет.

Обоснованная глубина ПЗРО может полностью исключить его вскрытие процессами выветривания. При этом необходимо рассматривать суммарный эффект денудации и вертикальных движений поверхности региона, массива, отдельных структурно-тектонических блоков.

Например, для водораздела рек Кан – Енисей (Южно-Енисейский кряж) были сделаны оценки денудации гранитоидов Нижнеканского массива по количеству твердого вещества, выносимого основной дренирующей системой района – рекой Большая Тель [213]. За пределы водосборного бассейна рекой выносится 3,5 тыс.т/год (средний модуль стока 9,5 т/км$^2$). При средней плотности гранитоидов 2,62 г/см$^3$ скорость физической денудации оценивается в 0,0036 мм/год, что почти в 300 раз меньше максимальной скорости современного тектонического воздымания территории – 1 мм/год.

Химический вынос вещества за пределы эрозионного бассейна, а значит, и химическое выветривание происходят более интенсивно. При среднем годовом расходе воды 2,06 м3/с и средневзвешенной величине её минерализации 200 мг/дм$^3$ средний годовой химический сток составит 13,0 тыс.т или 35,4 т/км$^2$. Такой масштаб химического выноса эквивалентен скорости эрозии 0,0171 мм/год. Но и эта величина остается несопоставимо малой по сравнению со скоростью тектонического подъема.

При разломно-блоковой структуре массива комплекс подземных сооружений ПЗРО будет перемещаться вместе с вмещающим блоком без нарушения целостности хранилища (могильника).

Количественные оценки распространения долгоживущих радионуклидов из могильника под влиянием прогнозируемых эрозионных процессов и климатических изменений были сделаны для участка распространения формации Mol Clay (Бельгия) (табл. 36) [88]. Показано, что для хранилищ глубокого заложения (100 м и более) механические нагрузки и температурный режим ледниковых циклов не вызовут серьёзных изменений.

Оледенение является наиболее вероятным фактором, воздействие которого может в будущем привести к нарушению условий изоляции ПЗРО. Основной причиной такого нарушения будет усиление водообмена на участках размещения РАО за счет обильного поступления с поверхности талых ледниковых вод.

Рассмотрены различные прогнозные модели ледниковых и постледниковых процессов, базирующиеся на принципе: вариации климата в будущем будут аналогичны вариациям климата в прошлом [88]. С использованием в качестве аналога условия последнего оледенения было показано, что на различных этапах развития и разрушения ледниковых покровов окислительно-восстановительная характеристика трещинных вод будет сохраняться. Свободный кислород из кислородосодержащих ледниковых вод поглощается присутствующими в горных породах микроорганизмами.

Таблиц 36

Максимальные величины активности Mol Clay и просачивающихся подземных вод при изменении геологических условий в будущем (geoprospective situations) (Бк/м$^3$) [88]

| Нуклид | Окружающая среда | Современные условия | После речной эрозии | После климатических изменений |
|---|---|---|---|---|
| $^{237}$Np | Вмещающие глины (50 м от источника) | $4{,}4\cdot10^{-1}$ | $2{,}8\cdot10^{-1}$ | $8{,}4\cdot10^{-1}$ |
| | Водные потоки на расстоянии 15 км | $2{,}4\cdot10^{-19}$ | $2{,}4\cdot10^{-19}$ | |
| $^{129}$I | Вмещающие глины (50 м от источника) | $7{,}1\cdot10^{3}$ | $3{,}7\cdot10^{3}$ | $1{,}4\cdot10^{4}$ |
| | Водные потоки на расстоянии 15км | $1{,}2\cdot10^{2}$ | $1{,}3\cdot10^{1}$ | |
| | 30 км | $7{,}8\cdot10^{-2}$ | $9{,}0\cdot10^{-3}$ | |
| | 45 км | $1{,}1\cdot10^{-6}$ | $1{,}5\cdot10^{-5}$ | |

Для составления прогноза безопасности хранилища Yucca Mountain принималось, что в течение следующего миллиона лет следует ожидать 10 оледенений, после активной фазы которых в процессе таяния ледовых масс возможно увеличение выноса долгоживущих радионуклидов: $^{237}$Np, $^{242}$Pu, $^{234}$U, $^{239}$Pu, $^{99}$Tc,$^{129}$I. Расчеты показали, что при этом средняя индивидуальная доза для проживающего вблизи хранилища населения увеличивается незначительно примерно на 0,01 мЗв/год [214]. Не вдаваясь в суть проделанных расчетов, следует отметить предельно упрощенный вариант продолжительности и количества оледенений.

В качестве примера целесообразно привести климатический прогноз, разработанный в конце прошлого столетия Б. Л. Барри (Канада) [210, 215]. Автор обращает внимание на тесную взаимосвязь и взаимозависимость космогонических, планетарных и климатических процессов. В частности, одной из важнейших величин, от которой в той или иной мере зависят земные процессы, является скорость вращения планеты.

Понижение температуры увеличивает площадь снежного покрова, рост которого продолжает охлаждать поверхность планеты за счет большого отражения солнечной радиации. Массы накопленного снега и льда увеличивают момент инерции Земли, способствуя тем самым замедлению скорости её вращения. По этой причине в тысячелетних циклах тёплые периоды составляют около 10 %, а холодные – около 90 %. По имеющимся прогнозам современное потепление 1920–2035 гг. (рис. 26) – это результат сложения теплых фаз климатических колебаний с периодами 230, 500 и 1000 лет. Начиная с 2035 г. произойдет похолодание, сходное с климатическими условиями начала XX века: закроется Северный морской путь, изменятся условия добычи нефти и газа на шельфе, упадет средняя урожайность территорий Северного полушария. С 2035 по 2150 гг. пройдёт холодный этап 230-летней волны общего похолодания, на которую будут накладываться 500- и 1000-летние волны похолодания (рис. 26). В 2300 году сложение всех климатических

колебаний дает минимум температур, подобный средневековому в 1250 г. В ближайшие 100 лет будет наблюдаться устойчивый тренд похолодания с локальными потеплениями продолжительностью около 11 лет.

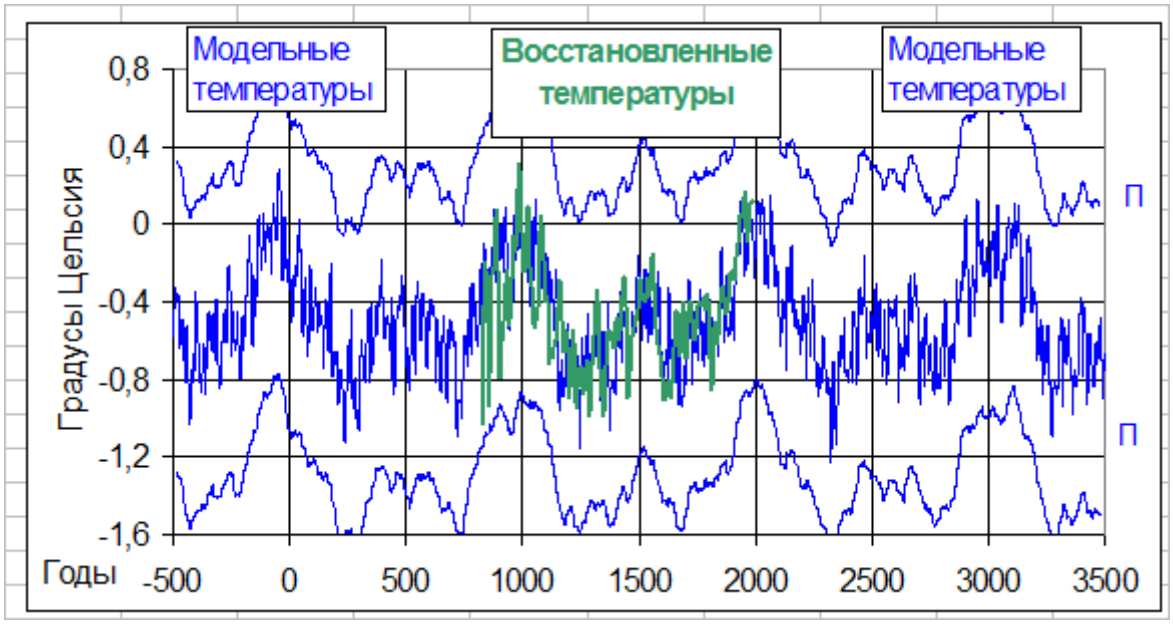



**Рис. 26**. Температуры Северного полушария (СП), показанные в отклонениях от средней годовой температуры за период 1951-1975 гг. Зеленая линия – температуры СП, восстановленные по приросту древесных колец. Голубая линия – модельные температуры СП. Погрешности модели составляют ± 0,8°С. Они даны в 50-летних осреднениях. (По данным работы [215]).

По мнению специалистов-климатологов, вероятность нового оледенения чрезвычайно велика. Появлением ледовых покровов Земля обязана сочетанию нескольких разномасштабных причин, различающихся по источникам, характеру, масштабам воздействия, а также по формам развития самих воздействующих процессов. Основные причины связаны с особенностями развития сложнейших ядерно-радиационных, электромагнитных и гравитационных процессов нашей ближайшей звезды – Солнца [216]. При этом имеющиеся данные о закономерностях в повторяемости оледенений еще недостаточно точны, и в настоящее время для предсказания сроков наступления холодов и характере оледенения нет достоверных научных обоснований [207].

При разработках глобального прогноза и выборе перспективных площадок для строительства ПЗРО должен учитываться глобальный процесс дегазации Земли [217]. Бурное развитие знаний о глубинной геодинамике в последнее десятилетие обязано появлению сейсмотомографии, в связи с чем произошел переход от теории тектоники литосферных плит к плюмтектонике. Плюмы, представляющие собой продукт глобальной дегазации Земли, в качестве крупных порций углеводородно-неорганического флюида (УНФ) всплывают к верхним геосферам. Энергия суперплюмов и конвекция в верхней мантии приводят в движение литосферные плиты. Однако роль УНФ не ограничивается только формированием и закономерной сменой геодинамических обстановок, с ним ассоциируются многие другие процессы. Глубинная дегазация Земли, при которой через литосферу проходят гигантские количества УНФ на пути в гидросферу и атмосферу, активизирует магматизм, вулканизм, сейсмические явления, приводит к формированию гидротермальных месторождений, пополнению гидросферы ювенильным подтоком и др. В процессе

дегазации на основе закономерностей эндогенной активности Земли от архея до кайнозоя выделяются две ветви: монотонно угасающая общепланетарная дегазация, характерной чертой которой является постепенная локализация ее «очагов» от площадных в архее, ареальных в протерозое, до линейных в фанерозое и дискретных в кайнозое; импульсная интенсивная дегазация (плюмы). Источниками поступления мантийных флюидов могут служить не только плюмы. Так, предполагается существование также интенсивных флюидных потоков, поднимающихся вдоль зон разломов или региональных линейных метасоматических зон под избыточным флюидным давлением из астеносферы или нижних горизонтов литосферы. Эти флюидные потоки создают напряженные системы, которые могут функционировать длительное время – десятки и сотни миллионов лет [218].

В этой связи особую остроту приобретают вопросы влияния глубинных процессов на поведение приповерхностных разломно-блоковых структур. В частности, Нижнеканский гранитоидный массив расположен непосредственно на сочленении Западно-Сибирской плиты, Сибирского кратона и Алтае-Саянской орогенической области в пределах влияния функционирующего мезо-кайнозойского Центрально-Азиатского суперплюма в координатах 44-66° северной широты и 84-126° восточной долготы. Участок для строительства хранилища для ВАО и ОЯТ в районе Нижнеканского массива должен быть выбран с учетом современных данных о флюидодинамической деятельности и плюмтектонике [127].

В последнее время предметом подробного изучения стали падения на Землю крупных небесных тел – астероидов, комет и их обломков [219]. В Солнечной системе столкновения небесных тел – естественное явление. Они были в прошлом в качестве основного механизма образования планет, наблюдаются в настоящем и будут в будущем. Столкновения с катастрофическими последствиями были и в наше время: 1908 г. – Тунгусский феномен; 1930 г. – катастрофа в верховьях Амазонки; 1947 г. – падение Сихоте-Алинского метеорита. Падение крупного метеорита на поверхность Земли в условиях современной насыщенности территорий опасными производствами может привести к миллионным человеческим жертвам. В зависимости от размеров астероида его столкновение может привести как к локальным, так и к глобальным катастрофическим явлениям. Столкновение с астероидом крупных размеров – диаметром порядка 1 км – угрожает существованию цивилизации в целом.

Заключение специалистов было сформулировано предельно ясно: «никакие усилия и затраты не должны казаться чрезмерными и преждевременными при решении каких бы то ни было задач в рамках проблемы космической охраны планеты» [220]. В марте 1996 г. на парламентской ассамблее Совета Европы было принято решение создать международную ассоциацию “Space Guard” («Космическая стража») – службы наблюдения, слежения и определения орбит астероидов и комет, сближающихся с Землей. В настоящее время наиболее масштабные исследования по нескольким программам проводятся в США под руководством Национального агентства по исследованию космического пространства (NASA) и Министерства обороны США. Основные задачи программ – раннее обнаружение потенциальных носителей космических катастроф и способы их уничтожения ядерно-ракетными средствами [221].

## 8.2.Региональное прогнозирование

Региональный прогноз основывается на глобальном, но учитывает характерные геологические, морфотектонические и климатические особенности рассматриваемого региона. Очевидны различия условий для пород Балтийского кристаллического щита на территории Кольского полуострова, осадочного чехла Русской платформы или геологических формаций Южно-Енисейского кряжа. На практике производится анализ данных дальней зоны ПЗРО – породы горного отвода и окружающих геологических формаций. Основной задачей регионального прогноза является выявление условий нарушения подземной изоляции на дальних подступах к ПЗРО. Первоначально анализируются два основных фактора: возможность появления новых каналов миграции в результате сейсмо-тектонических подвижек и вероятность активизации гидрогеологического режима с последующим выходом радионуклидов в водоносные горизонты.

Основная часть научных исследований направлена на решение ключевой проблемы безопасности – сохранения минимальной миграционной подвижности изолируемых радионуклидов на требуемое время их изоляции. Долговременный прогноз основывается на возможности предсказания поведения искусственных и природных барьеров на путях возможного распространения радионуклидов в окружающую среду.

Для регионального прогнозирования необходимо отметить следующее:

- задача прогноза состоит не столько в предсказании эволюционных тенденций, сколько в определении сроков и последствий перестройки окружающей среды ( т.е. изменения начально выбранных стабильных условий изоляции);
- за длительные интервалы времени (сотни тысяч лет) может измениться не только геологическая среда, но и процессы, реализующие эти изменения;
- вместе с процессами и явлениями, имеющими надёжно установленный эволюционный или циклический режим развития, необходимо рассматривать события с крайне малой вероятностью (астероидная опасность, наведенные землетрясения и пр.).

Для регионального прогнозирования наиболее доказательным методом научного обоснования безопасности подземного захоронения являются природные аналоги. В 1982 г. Комиссия европейских сообществ утверждает проект по изучению миграции радионуклидов в геосфере (“MIRAGE”), в который включена программа по изучению природных аналогов. В 1985 г Комиссия по природным аналогам сформулировала основные возможности использования получаемых данных [222]:

- в качестве природного эксперимента, воспроизводящего процессы, заложенные в математических моделях;
- для установления полуколичественных граничных значений параметров геологических, гидрогеологических и геохимических систем;
- для выявления направления или наличия/отсутствия длительных природных процессов;
- для оценки безопасности хранилищ на примерах истории развития конкретного участка литосферы, например, проявления и влияния глубокозалегающих урановых руд на подземные и поверхностные воды и т. п.

В качестве одного из объектов детальных исследований выбрана группа урановых месторождений Alligator rivers в Австралии [223].

В 1989 г. разработан документ МАГАТЭ, оценивающий применимость природных аналогов для хранилищ РАО [202].

В 1998 г. специалисты Радиевого института представили доклад «Изучение природных аналогов для захоронения долгоживущих радиоактивных отходов» на совещании экспертов Atomic Industrial Forum Японии и Минатома Российской Федерации [224]. Выбор аналогов руководствовался следующими принципами:

- адекватностью аналога и техногенной системы изоляции, её компонентов и процессов;
- уровнями использования: качественная оценка, оценка «да–нет», установление предельных значений;
- количественным использованием и степенью надежности доверительных пределов;
- возможностью использования экстраполяции, составление прогнозной модели.

Природные аналоги делятся на две функционально-целевые группы:

- представленные предметными понятиями: минералами, горными породами, геологическими формациями;
- представленные хорошо изученными природными процессами: миграция, геохимические барьеры, рудообразование, метаморфизм и пр.

В качестве природных аналогов рассмотрены:

1) месторождения урана (аналоги могильников РАО);
2) минералы–природные сорбенты (аналоги инженерных барьеров);
3) минералы–концентраторы природных радионуклидов (аналоги матриц для иммобилизации долгоживущих РАО);
4) состояния природных изотопных систем (аналоги геохимических систем могильников РАО);
5) природный метасоматоз и миграция радионуклидов в толщах горных пород;
6) крупномасштабные техногенные аналоги: подземные ядерные взрывы, радиационные аварии.

Приведем несколько примеров природных аналогов, характеризующих барьерные свойства глин и глинистые породы.

Многие залежи урановых руд, перекрытые глинистыми осадками с мощность 20-30 м, а иногда и несколько метров, не имеют хорошо выраженных ореолов рассеяния радиоактивных элементов. Одно из крупнейших урановых месторождений Северо-Казахстанской урановой провинции – Грачевское – было открыто случайно при каротаже скважины, пробуренной для водоснабжения. Гидротермальное месторождение в девонских гранитах и дислоцированных породах венда было перекрыто в кайнозое 50–100-метровым чехлом известковых глин и суглинков, заполнивших также основные разломы и разрывные дислокации (рис. 27) [225]. Руды месторождения представлены неустойчивыми, способными к миграции формами урановых минералов.

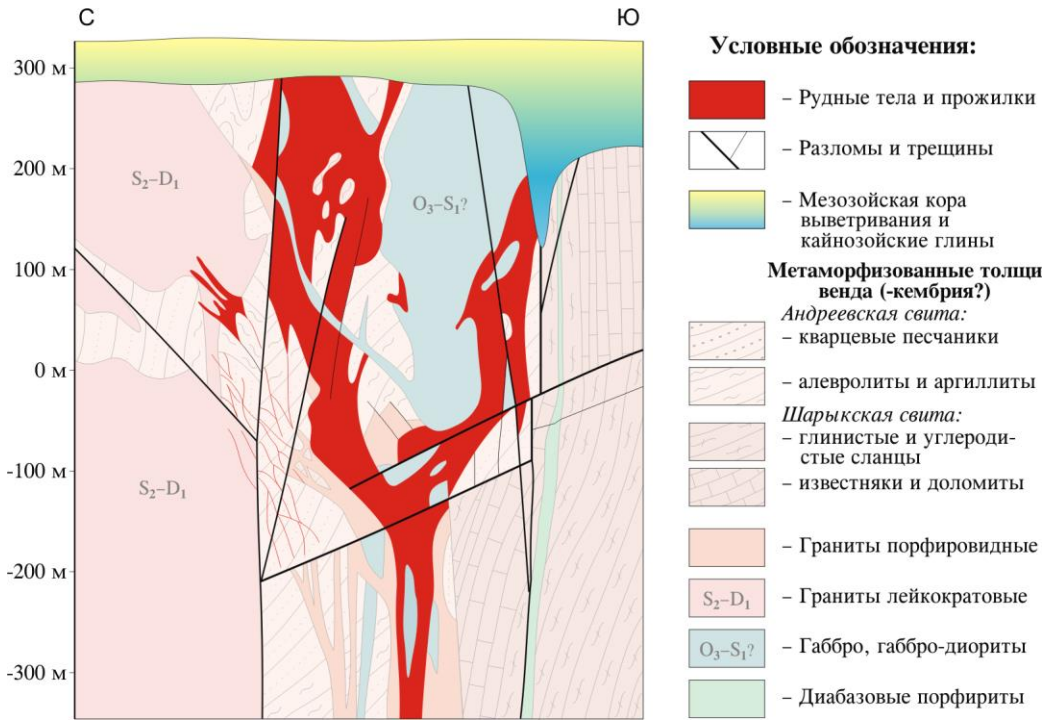



**Рис. 27**. Геологический разрез уранового месторождения Грачевское (Северный Казахстан) [225].

Основную функцию удержания на геохимических барьерах выполняют минералы – природные сорбенты.

Природные сорбенты распространены достаточно широко и представлены несколькими различными по составу и кристаллической структуре группами минералов [36, 226]:

- оксиды и гидроксиды железа, марганца, алюминия, а также скрытокристаллические разновидности кварца, нераскристаллизовавшиеся алюмосиликаты и водные соединения кремния;
- слоистые алюмосиликаты – смектиты, вермикулиты, глауконит, палыгорскиты, сепиолиты, хлориты, смешанные силикаты, апофиллит, тальк и пр.;
- фосфаты, ванадаты, арсенаты и др.;
- графит и органическое вещество.

Установлено, что многие гранитоидные формации испытали воздействие наложенных метаморфических процессов, сопровождающихся появлением вторичных минералов – природных сорбентов. Эта благоприятная для изолирующей среды особенность отмечена в ранних (1977–1983 гг.) документах МАГАТЭ при оценках геохимических свойств пород гранит-сиенит-тоналит-диоритового ряда [27]. Особое внимание обращалось на то, что вторичные мелкодисперсные минералы-сорбенты (группы хлорита, иллита, смектита и пр.) развиваются на стенках поровых пространств и трещин в зонах с повышенной водной фильтрацией. Общее количество вторичных минералов может быть небольшим, но их присутствие на стенках миграционных каналов создает минералого-геохимические барьеры или залечивает трещины.

Существуют примеры заполнения и кальматации открытых трещин глинистыми и железистыми минералами, образование которых связано с деятельностью

плейстоценового оледенения Канадского кристаллического щита 51–21 тыс. лет назад (верхнеархейский плутон озера Eye Dashva).

В качестве природных аналогов широко используются изотопно-геохимические и изотопно-геохронологические данные.

Используется, например, калийсодержащий минерал глауконит, который сравнительно легко теряет при метаморфизме накопившийся радиогенный аргон. Однако, в нижнекембрийских глинах Русской платформы система $^{40}K \rightarrow {}^{40}Ar$ за всё время существования глинистой толщи оставалась закрытой, дав значение возраста в интервале 530-590 млн. лет (нижний кембрий).

При разработке глины в одном из карьеров Центральной Италии (Dunarobba) было обнаружено несколько десятков стволов деревьев (рис. 28) [96]. Вмещающими породами являются озерные глины плиоцен-плейстоценового возраста– ~1,5 млн. лет. Это открытие крайне важно, потому что:

- деревья сохранили свое первоначальное положение;
- в мировой литературе нет примеров такого количества ископаемых деревьев в своем физиологическом положении;
- несмотря на столь длительный срок захоронения, деревья все еще состоят из древесины;
- первоначальная структура древесины хорошо сохранена.

Ботаническая классификация «законсервированных» деревьев указала на тропические виды, в настоящее время не существующие в Европе. Необходимо отметить, что залежи озерных глин перекрыты песками, в которых длительное время свободно циркулировала вода, содержащая кислород, способный окислить и разрушить древесину. Однако было достаточно нескольких или десятка метров глин, чтобы надежно изолировать древесные стволы от кислородсодержащих вод в течение 1,5 млн. лет.

**Рис. 28**. Законсервированный глинами ископаемый лес [96].

Изучение геотермальных участков показало, что ореолы миграции гидротермальных и геотермальных продуктов распространяются исключительно по нарушениям на контактах залежей глин, пары геотермальных флюидов не проникают в плиоценовые глины. В краевых частях глинистых залежей миграционные процессы происходят преимущественно по слоям, обогащенным песчаным материалом.

На участках распространения глин (долина Argi и др.) проведена гелиевая съемка, которая показала низкую проницаемость или отсутствие таковой на площадках, не имеющих разрывных нарушений. В то же время, повышенные концентрации гелия наблюдаются под монолитными пластами глин, способными удержать мобильный инертный газ.

Экранирующие свойства глинистых пород изучались в процессе создания парка емкостей-хранилищ ядерно-взрывной технологией на Сеитовской соляно-купольной структуре в 1980–1983 гг. [103]. Соляной купол расположен в узле глубинных региональных разломов в западной прибортовой части Прикаспийской низменности (Астраханская область). На участке исследований пермская каменная соль перекрыта ~500-метровой толщей суглинков, глин и песков верхнего плиоцена (апшеронский ярус). На глубине 200–250 м проходит водоносный горизонт песков, который и явился объектом гелиевых исследований. Измерения концентраций гелия в подземных водах проводилось до, и после проведения в течение получаса 6 подземных ядерных взрывов мощностью 8,5 кт на глубине 920 – 1050 м [227]. Локальное сейсмовоздействие должно было способствовать миграции гелия с последующим его выходом в перекрывающий водоносный горизонт. Это должно фиксироваться по повышенным концентрациям гелия после проведения серии ядерных взрывов.

Измерения показали:

- до проведения серии взрывов в водах апшеронского горизонта установлены крайне низкие и стабильные для всех 13 скважин концентрации гелия – $(6{,}0 \pm 0{,}6)\cdot 10^{-5}$ об. %;
- после проведения 6 взрывов концентрации гелия практически не изменились – $(5{,}9 \pm 1{,}6)\cdot 10^{-5}$ об. %, при некотором увеличении разброса данных для отдельных скважин.

Таким образом, гелиометрические исследования не выявили повышенной миграции гелия через отложения глинистых пород при стимулировании подвижности инертного газа сейсмическим воздействием подземных ядерных взрывов.

В глинах и суглинках не возникли проницаемые зоны, по которым в условиях взрывного сжатия гелий мог бы мигрировать в вышележащий водоносный горизонт [103].

В 70-х годах особое внимание привлек к себе уникальный природный аналог – природный реактор Окло, «феномен Окло» [228]. Урановое месторождение Окло (Окло-Окелобондо) расположено в Франсвильском рудном районе Габонской Республики (Центральная Африка). Месторождение осадочно-эпигенетического генезиса. Рудные тела приурочены к полого падающему пласту нижнепротерозойских песчаников (2,3–2,15 млрд. лет).

Накопление урана началось около 2,1 млрд. лет назад в песчано-глинистых отложениях на геохимических барьерах дельты рек, образуя линзы, содержащие до 0,5 % урана. Впоследствии обогащенные ураном осадочные отложения вместе с кристаллическим фундаментом опустились на глубину около 4 км. В процессе диагенеза происходило образование рудных линз мощностью около 1 м и длиной 10–20 м, в которых содержание урана достигало 20-60 %. Последующее поднятие геологических структур вывело месторождение на поверхность, где оно стало доступно для разработки.

Следы работы природного реактора были обнаружены в 1972 г. при масс-спектрометрическом анализе гексафторида урана, полученного из руды месторождения Окло. В смеси изотопов урана этих руд доля $^{235}$U составила 0,717 %, а не 0,720 %, как в литосфере Земли, метеоритах и лунном грунте. «Феномен Окло» привлек к себе внимание многочисленных исследовательских групп. Образцы руды и вмещающих пород изучались во многих лабораториях мира.

Проведенные исследования подтвердили обеднение урановых руд месторождения ураном-235 до 0,64 %. По сделанным расчетам в добытых 700 т урана, дефицит $^{235}$U составил около 200 кг. За 100 тыс. лет в природном реакторе могло сгореть не менее 5-6 т $^{235}$U. Процесс происходил на глубине 3-5 км, температура в зоне развития реакции достигала 400ºС. При этом мощность интегрального потока составила $1{,}0\text{-}1{,}6 \cdot 10^{21}$ нейтронов на см$^2$.

Были выявлены отклонения от природного соотношения распределения изотопов редкоземельных элементов, являющихся продуктами деления, а позднее – обнаружены характерные изотопы неодима, самария, плутония.

Полученные данные позволили доказать, что 1,8 млрд. лет назад на участке месторождения Окло работал природный реактор. В это время обогащение урана изотопом с массой 235 составило 3,1 % – такое же, как в отечественных реакторах ВВЭР. Продолжительность работы природного реактора составила 600 000 лет, мощность – всего 25 кВт. Общее количество выработанной энергии оценивается

$1{,}5 \cdot 10^4$МВт год. Два блока РБМК-1000 Ленинградской АЭС при 100 %-ной загрузке вырабатывают столько энергии за 2,3 года [229].

Феномен Окло широко используется в качестве природного аналога захоронения в геологических формациях облученного ядерного топлива (ОЯТ) для сравнения распределения в техногенных и природных матрицах продуктов деления и, что особенно важно, для оценки способности вмещающих горных пород длительное время изолировать радионуклиды природного реактора на месторождении Окло.

Активной зоной природного реактора являются наиболее богатые рудные линзы, содержащие до 20–60% диоксидов урана – уранинита и настурана. Одна из наиболее детально изученных активных зон представлена прямоугольной пластиной с размерами 19-20 м на 11-12 м и толщиной около одного метра, залегающей под углом 45º на кристаллическом основании.

Роль замедлителя выполняли подземные воды. Всего на месторождении были идентифицированы остатки 17 активных зон. Рудные линзы залегают в глинистых иллит-хлоритовых сланцах, постоянно присутствует органический материал – битум, а также сульфиды.

Анализ аномалий изотопного состава определенных элементов (Ru, Zr, Sm, Gd, Eu, Nd и другие) позволил выделить процессы перераспредления и миграции, происходящие в природном ядерном реакторе (230, 231):

- из активной зоны урановых руд наиболее интенсивно мигрировали изотопы криптона, ксенона, йода, цезия и в меньшей степени теллура;
- из рудных тел вынесены структурно несовместимые и нерастворимые в уранинитовой матрице элементы: рубидий, цезий, стронций, молибден, кадмий, барий и частично рутений, олово;
- металлические включения технеция, рутения, родия и палладия приурочены к граничным зонам урановых минералов, где находятся в устойчивых немигрирующих формах;
- в уранинитовой матрице локализуются и удерживаются оксиды редкоземельных элементов, иттрий, цирконий, ниобий, а также трансурановые элементы: нептуний, америций;
- вмещающими породами удерживаются продукты ядерных реакций: молибден, рутений, палладий, серебро, теллур, сурьма, технеций.

Поведение и распределение продуктов деления в природном и техническом ядерном топливе различается, поскольку трудно сопоставить условия и режим реализации ядерных реакций в твэлах и в урановой руде. Однако, общие физико-химические закономерности, естественно, сохраняются.

Наибольший интерес при изучении феномена Окло привлекли оценки изолирующих свойств геологической среды, в которой природное ядерное топливо находилось в течение почти 2-х миллиардов лет. За это время происходили серьезные геологические изменения пород, вмещающих рудные линзы. В осадочные толщи месторождения внедрялись дайки долеритов, изменялся гидрогеологический режим и пр.

Главным изолирующим барьером природного ОЯТ являются битумы, которые при повышении температуры заполняли миграционные каналы – трещины в уранинитовой руде, предотвращая распространение продуктов деления за пределы активных зон. ОЯТ природного реактора было включено в массу гидрофобного битума, что исключало вынос радионуклидов природными водами. Частичная потеря

продуктов деления битумами могла происходить лишь до момента их затвердевания.

Барьерную функцию выполняли также глинистые породы, изолирующие свойства которых для урановых месторождений хорошо известны. Однако в условиях месторождения Окло часть продуктов деления могла выноситься из иллит-хлоритовых пород за счет десорбции с последующей миграцией в подземных водах.

Существенное значение для сохранности урановых рудных тел имеет геохимическая обстановка и, в первую очередь, окислительно-восстановительные условия. В рудных линзах месторождения Окло на глубине 250 м существует восстановительная гидрогеохимическая среда, в которой урановые минералы практически не затронуты процессами вторичного изменения. Изотопно-геохимические исследования показали высокую степень закрытости структур, сохраняющих все компоненты радиоактивных рядов.

На месторождении Окло была осуществлена самоподдерживающаяся цепная реакция деления с последующей самоизоляцией облученного природного урана во вмещающих горных породах. Уранинитовая матрица в течение длительного, даже по геологическим масштабам, времени удерживала актиниды и ограничивала вынос за пределы рудных тел радионуклидов – продуктов деления. Вмещающая геологическая среда, битумы и глинистые породы ограничивали размеры ореолов распространения наиболее миграционноспособных радионуклидов. Полученные данные свидетельствуют о способности геологической среды обеспечить длительную изоляцию ОЯТ, а феномен Окло рассматривается как наиболее представительный природный аналог [228].

Однако, статус «феномена» – необычного, исключительного явления, существенно ограничивает его использование, поскольку Окло является пока еще единственным примером природного реактора. По-видимому, на ранних этапах развития литосферы в скоплениях урановых руд достаточно часто создавались условия для цепных реакций. Большая часть мировых запасов урана (около 31 %) связана с докембрийскими эпохами рудообразования [232], со временем, когда обогащение урана изотопом $^{235}U$ было значительно выше современного.

Даже как исключительное явление природный реактор месторождения Окло подтвердил:

- высокие барьерные возможности горных пород, барьерные функции которых практически неограничены во времени;
- длительную стабильность геологических структур древних кристаллических щитов, состояние которых способно сохранять закрытость сложных геохимических систем в течение почти 2 миллиардов лет.

### 8.3. Локальное прогнозирование

Локальные прогнозы составляются для площадок, выбранных для строительства ПЗРО. Разработка прогноза может быть осуществлена при наличии достаточного объема информации, характеризующей детально и достаточно полно свойства геологической среды. Такая информация может быть получена на первых поисково-аналитических этапах исследований перспективных площадок, при их разведке, а также в подземных исследовательских лабораториях.

Ключевыми вопросами локального прогнозирования являются определения условий миграции радионуклидов для конкретного геотехнологического комплекса ПЗРО и возможностей её ограничения инженерными и природными барьерами.

В начале 80-х годов эксперты МАГАТЭ обобщили результаты моделирования миграционных процессов для шести перспективных площадок различных стран, геологическая среда которых была представлена каменной солью, гранитами и глинами [27]. Рассмотрены различные сценарии событий и модели оценки безопасности для хранилища, геологической среды и биосферы. В математических моделях миграции радионуклидов широко использовались коэффициенты распределения $K_d$ и коэффициенты задержки R для радионуклидов в природных водных системах. Глины представлены формацией Boom Clay, свойства которой и прогноз безопасности на участке Mol приведены в разделе 4.1.

Позднее аналогичные модели миграции радионуклидов представлены в рамках программы PAGIS (Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste) Европейской комиссии [78]. Вероятные дозовые нагрузки рассчитывались на значительные интервалы времени – до $10^7$ лет. Глинистые породы представлены площадками Mol (Бельгия) и Harwell (Великобритания).

В Российской Федерации в конце 90-х годов локальный прогноз безопасности разработан для площадок Нижнеканского массива [23, 233], в котором для изучения миграции выделены зоны малопроницаемых массивных пород и ослабленные участки межблочных зон трещиноватости (табл. 37).

Таблица 37

Характерные свойства различных зон гранитоидов Нижнеканского массива [23]

| Свойство | Монолитная порода | Ослабленная зона |
|---|---|---|
| Пористость | $5 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-2}$ |
| Коэффициент фильтрации | $3 \cdot 10^{-7}$ м/сут | $3 \cdot 10^{-5}$ м/сут |
| Гидравлический градиент | $1 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-2}$ |
| Действительная линейная скорость миграции воды | $2 \cdot 10^{-4}$ м/год | $2 \cdot 10^{-2}$ м/год |

Как следует из представленных в таблице 38 данных, расчетные скорости миграции радионуклидов малы даже для ослабленных зон. При скорости миграции нептуния $2 \cdot 10^{-5}$ м/год ореол его распространения по межблочным трещиноватым участкам за 50 000 лет составит около 1 м.

Таблица 38

Сравнительная оценка миграции радионуклидов для различных зон массива [23]

| Радионуклиды | $K_d$, $см^3/г$ | Скорость миграции, м/год | |
|---|---|---|---|
| | | Монолитная порода | Ослабленная зона |
| Цезий | $(5–9) \cdot 10^2$ | $(4–8) \cdot 10^{-10}$ | $(0{,}8–1{,}3) \cdot 10^{-7}$ |
| Плутоний | $(7–9) \cdot 10^2$ | $(6–8) \cdot 10^{-10}$ | $(0{,}8–1) \cdot 10^{-7}$ |
| Америций | $(1{,}3–3{,}4) \cdot 10^3$ | $(1–3) \cdot 10^{-10}$ | $(2–5) \cdot 10^{-8}$ |
| Нептуний | 4–28 | $(0{,}1–1) \cdot 10^{-8}$ | $(0{,}2–2) \cdot 10^{-5}$ |

В геологических формациях Кольского полуострова были выбраны 6 площадок, для которых рассмотрены сценарии нормальной эволюции и альтернативные сценарии миграции радионуклидов[160, 161]. Для расчетов моделей миграции радионуклидов в биосфере используются « факторы разбавления, вычисляемые в условиях равновесия в контрольных точках» - река, озеро, почва, скважина. В биосферной модели были определены параметры наземных цепочек, поверхностных вод, дозовые коэффициенты, региональные почвенно-растительные параметры, параметры поверхностных вод, а также параметры потребления пищи человеком и животными [160]. Суммарная мощность дозы рассчитывалась для группы радионуклидов ($^{14}C$, $^{241}Am$, $^{129}I$, $^{94}Nb$, $^{59}Ni$, $^{239}Pu$, $^{79}Se$, $^{99}Tc$) по трем путям поступления : скважина, почва, река.

Авторы отмечают, что проведенный анализ представляет собой лишь предварительную оценку безопасности отдельных площадок, поскольку для получения недостающей информации «пришлось сделать ряд предположений». Кроме того, используемые в моделях свойства РАО ограничены только Кольской АЭС, поскольку состав и количества «других потоков региональных отходов» отсутствуют. В рассмотренных проектах отсутствуют данные о свойствах инженерных барьеров и зонах нарушений вмещающих пород. Для восполнения недостачи этих параметров использованы литературные источники.

Полученные модельные расчеты показали безопасность всех площадок. При этом авторы отмечают, что необходимо крайне осторожно интерпретировать рассчитанные значения мощности доз, поскольку они могут лишь указывать на «целесообразность изучения предлагаемых площадок» для захоронения РАО [161].

Японская концепция подземной изоляции предусматривает создание искусственных барьеров, которые обладают запасом технических возможностей и отвечают широкому диапазону геологических сред [179]. Реализация мер безопасности происходит на всех этапах создания ПЗРО:

- на этапах выбора площадок;
- при проведении расчетов и строительстве хранилища с искусственными барьерами, соответствующими выбранной геологической среде (этап инженерных решений);
- при разработке долгосрочного прогноза и моделировании системы захоронения (этап оценки безопасности).

Принимается, что, экстраполируя данные о прошлых колебаниях отдельных блоков конкретного региона, можно прогнозировать характер таких колебаний на сотни тысяч лет вперед. Прогноз климата должен учитывать, что в течение нескольких сотен тысяч лет при оледенениях уровень моря по сравнению с современным колебался от плюс нескольких метров до минус 130 метров. В целом, разработанные в Японии методы предварительной оценки безопасности на длительные промежутки времени позволяют захоранивать радиоактивные отходы в глубоко залегающих горных породах.

В начале 2000-х гг. определилась единая методология оценки безопасности. Рассматривались два основных сценария развития событий и явлений в будущем, которые могли бы повлиять на условия подземной изоляции [198, 234]:

- эволюционный, при котором разрабатывается прогноз радиологических последствий вследствие естественного разрушения и трансформации инженерных барьеров, а вмещающая ПЗРО геологическая среда изменяется в соот-

ветствии с известными закономерностями развития литосферы и геологических тел;

- сценарий, связанный с аварийным разрушением ПЗРО вследствие неучтенных маловероятных природных воздействий или техногенного внедрения.

Обоснования эволюционного сценария определялись выполнением требований критериев выбора геологической формации и конкретных площадок [18, 20]. Предлагаемая для строительства ПЗРО площадка должна иметь:

- долговременную геологическую стабильность (миллионы лет);
- слабые потоки грунтовых вод в интервале строительства ПЗРО; эти потоки должны быть стабильными в течение длительного периода времени;
- стабильные геохимические и гидрогеологические условия;
- физико-химические свойства пород должны обеспечивать задержку движения радионуклидов;
- минимальный риск вторжения человека в будущем, например, с целью добычи полезных ископаемых;
- хорошие инженерные характеристики, позволяющие легко построить и эксплуатировать ПЗРО.

Для аварийного сценария допускаются серьезные недостатки при создании инженерных барьеров и ошибки при выборе геологических условий площадки (таблица 39) [235].

Таблица 39

Примеры сценариев с нарушением принятых свойств барьеров [235]

| Барьер | Сценарий |
|---|---|
| Матрица отходов | Разрушение защитных оболочек ОЯТ.<br>Рост количества способных к миграции радионуклидов. |
| Канистры/контейнеры | Первоначальные дефекты.<br>Сплошные недостатки. |
| Буферные материалы | Искаженная оценка удерживающих свойств.<br>Повышенная растворимость.<br>Уменьшение толщины буфера.<br>Буфер исполняет роль резервуара для водных потоков. |
| Изолирующий слой | Возрастание проницаемости. |
| Геологическое окружение | Размещение отходов вблизи от зон трещиноватости.<br>Возрастание проницаемости пород.<br>Рост скорости миграции.<br>Интенсификация потоков подземных вод.<br>Крупные негативные изменения в геосфере: подвижки горных пород через 30 000 лет, после будущего оледенения; разрушение канистр, перемещение засыпок бентонита, увеличение водной миграции, наличие окислительных условий в зоне размещения отходов.<br>Полное исчезновение геосферных барьеров в результате эрозии или деятельности человека. |

Для проверки надёжности первоначальной геологической информации, характеризующей перспективные площадки, используются трёхмерные компьютерные модели. Разнообразные блок-диаграммы и объемные модели (рельефные, скульптурные, прозрачные, скелетные) в течение многих лет широко используются в геологической практике, особенно при поисках и разведке рудных месторождений [236]. Использование компьютера и математических программ значительно расширило возможности этого традиционного метода графического изображения геологических структур.

Трёхмерное моделирование является наиболее эффективным методом детального анализа и интерпретации результатов разведки перспективных площадок. Трёхмерные модели представляют исходную информацию для оценки её пригодности, а также для последующих математических расчетов процессов деформации горных пород, теплопереноса и миграции радионуклидов, т.е. основу для прогнозной оценки безопасности подземной изоляции на длительные периоды времени [237].

Для трехмерного моделирования немецкими специалистами составлена программа «openGEOS», в которую вводятся разнообразные исходные данные:

- топография поверхности территории;
- результаты топопривязки горных выработок, скважин и точек геофизических замеров;
- данные каротажа скважин;
- результаты картирования подземных выработок с указанием зон нарушения, трещин и их пространственного положения;
- имеющиеся геологические и геофизические разрезы (вертикальные и горизонтальные);
- геологические и гидрогеологические карты в цифровой форме;
- тектонические карты в цифровой форме или схемы (положение и распределение зон нарушения), а также результаты дешифровки авиационной и спутниковой фотосъемок;
- карты распространения элементов, как, например, распространение урана и радия в почве или гелия в зоне аэрации;
- результаты геофизической вертолетной разведки;
- отображения карт и профилей в цифровой форме, в которых результаты геофизических измерений могут быть преобразованы в геологические данные.

В программе “ASTER” [237] отмечается особая сложность составления климатического прогноза, предсказуемости влияния климата на интенсивность процессов денудации и эрозии. Наряду с применением принципа актуализма (прогноз будущего на основании анализа прошлого) необходимо учитывать влияние антропогенного фактора, а также зависимость климата Земли от планетарных, т.е. космических ритмов. Возникающая проблема может быть решена увеличением глубины размещения ПЗРО. При этом достигаются:

- увеличение ресурса геологического барьера для случаев развития процессов эрозии и денудации;
- увеличиние длины пути фильтрации подземных вод, а, следовательно, замедление переноса радионуклидов и снижение их концентраций;

- снижение с глубиной трещиноватости пород (каналов миграции);
- уменьшение содержания кислорода, снижающее растворимость радионуклидов;
- защита геологических и инженерных барьеров от ледниковой эрозии, а также уменьшение риска случайного или умышленного доступа для людей.

Наряду с климатическим прогнозом крайне важен геологический прогноз долгосрочного тектонического развития, пространственно-временное распределение тектонических напряжений и опасности землетрясений на участке расположения ПЗРО. На основании данных о характере и частоте тектонических движений в прошлом составляется прогноз будущих деформационных процессов и дается оценка вероятности активизации зон нарушений и трещиноватости.

Для составления трехмерных моделей, определяющих в совокупности локальный прогноз безопасности конкретного участка, требуется значительный объем разнообразных поисково-разведочных и аналитических данных. Сбор информации и разработка отдельных компонентов совокупной аналитической модели имеют следующую последовательность [237]:

Концептуальная формулировка

⬇

Подготовка данных

⬇

Выбор модели

⬇

Геологическая модель
(схематизация гидрогеологических условий)

⬇

Модель движения грунтовых вод (FEFLOW)

⬇

Модель массопереноса:
- Ближнее поле (GRAPOS)
- Геосфера (CHETMAD)
- Биосфера (EXMAS)

⬇

Описание результата

Не меньший объем информации требуется для составления базы данных стандартизации геологических объектов и моделирования идущих в них процессов [182]. При этом база данных «должна содержать верифицированные разведочные данные модели миграции для выбранного участка и площадки, а также все собранные геомеханические характеристики вмещающих пород» для проектирования ПЗРО.

Созданная база данных для РАО исторического наследия позволяет, по мнению авторов:

«- хранить структурированные расчетные данные и результаты исследований геологической среды;

- свести в единое информационное пространство множество результатов натурных и камеральных исследований площадок и механизмов их аналитической обработки;

- осуществлять информационный обмен с системой эколого-экономической оптимизации размещения объектов окончательной изоляции РАО».

При этом остаются неизвестными источники и возможности получения многочисленных результатов натурных и камеральных исследований.

Методы математической формализации природных объектов достаточно сложны, поэтому авторы упрощают понятие геологическое тело «как пространственную конфигурацию, геометрический объект, обладающий набором свойств и показателей, его характеризующих» [182].

Очевидно, что такое представление о геологической среде противоречит общеизвестным понятиям и базовым законам образования и развития геологических тел, о которых сказано во введении настоящей работы [1-7]. Следует напомнить основные положения:

1. Каждое геологическое тело является частью более крупного геологического тела и участвует вместе с ним в геологических процессах высших рангов.
2. Геологические тела неоднородны по вещественному составу и строению.
3. Всякое геологическое тело имеет множество связей с другими геологическими телами и участвует во множестве геологических процессов различных рангов.
4. Геологические процессы происходят циклично, ускоряясь, затухая и возрождаясь во времени.
5. Фундаментальным свойством геологической среды (геологических тел) является движение блочных структур на различных иерархических уровнях.

Сложность разработки долгосрочного локального прогноза связана в первую очередь с необходимостью количественных оценок сложнейшей природной системы – миграции. Параметры составляющих её подсистем (каналы миграции, среда миграции, минералого-структурное окружение) со временем могут существенным образом меняться и трансформироваться. Весьма существенно, что первоначально малозначимый фактор может со временем перейти в разряд причин, определяющих безопасность. Фактор времени может перевести второстепенное явление в решающую причину значительных изменений в будущем.

При описании природных геологических процессов подчеркивается, что «последующие явления не всегда вытекают из предыдущих, так как существуют множественные ансамбли процессов, действующих одновременно и суммарно» [238].

Калибровка моделей миграции имеет ограничения в связи с недостаточностью натурных наблюдений, неопределенностью и масштабной зависимостью гидрогеологических параметров и основополагающих соотношений для сложной неоднородной среды. Несмотря на сложность миграционных моделей, используемых в радиоэкологическом мониторинге, остается неуверенность в отношении их концептуальной обоснованности и адекватности [239].

Приведенные варианты разработки локального прогноза свидетельствуют о многообразии концепций и различий предлагаемых методов для оценки ключевой проблемы безопасности – миграционных процессов. В то же время существует и объединяющий фактор, постоянно присутствующий как в экспериментальных, так и в расчетных моделях.

Таким постоянным фактором является неопределенность оценок долгосрочной безопасности конкретных участков размещения ПЗРО [198].

Сложность природных систем потребовала разработки новых методов локального прогнозирования, которые выделяют и обосновывают основные геологические факторы, влияющие на безопасность подземной изоляции РАО.

## 9. Геологические факторы, определяющие безопасность изоляции РАО в коренных отложениях глин Ленинградской области

При сопоставлении разномасштабных прогнозов можно выделить их различия по основным природным закономерностям, предъявляемым в качестве научного обоснования реальности будущих изменений условий подземной изоляции РАО (табл. 40). Знание закономерностей проявления и развития тех или иных природных процессов позволяет разработать многоступенчатый долгосрочный прогноз. При этом каждый последующий прогноз базируется на предыдущем, более крупном по территориальному охвату, прогнозе.

Таблица 40

Основания для разработки разномасштабного прогнозирования.

| Масштаб прогноза | Основание для разработки долгосрочного прогноза |
|---|---|
| Глобальный | Закономерности эволюционно-циклического развития литосферы, плюмтектоники литосферных плит и формирования геологических тел.<br>Закономерности циклических изменений климата. |
| Региональный | Закономерности развития процессов и явлений для природных и техногенных аналогов. |
| Локальный | Закономерности процессов миграции, условий изменения миграционного режима в геологической среде, барьерных свойств минералов и горных пород.<br>Оценки проявления вероятностных процессов и явлений. |

Для анализа геологических факторов безопасности ПЗРО рассматривается вариант подземной изоляции РАО в пластах верхневендских (участок ЛСК «Радон») и нижнекембрийских (площадка «Копорье») глин, расположенных в 7 км друг от друга (рис. 19) [146]. Изоляции подлежат отходы низкого и среднего уровня активности, в которых кроме сравнительно короткоживущих $^{90}Sr$ и $^{137}Cs$ присутствуют долгоживущие радионуклиды. Последнее, естественно, требует разработки долгосрочного прогноза.

Оценка и прогноз безопасности окончательной изоляции РАО базируются на геологическом обосновании создания объекта захоронения и существенно зависят от детальности и уровня достоверности данных по характеристикам геологической среды.

Долгосрочная безопасность удаления РАО в геологические формации зависит от полноты решения двух главных задач:

- соответствия выбранной геологической среды требованиям базовых критериев;
- научного обоснования долгосрочного прогноза развития геотехнологической системы подземной изоляции.

Прерогатива геологических факторов определяется тем, что только природные геохимические барьеры могут длительное время ограничивать миграцию радионуклидов и только геологическими методами можно обосновать долгосрочный прогноз состояния пункта подземной изоляции радиоактивных отходов.

При этом необходимо отметить, что в природе не существует «типовых» геологических формаций и тем более «типовых» площадок для строительства ПЗРО [100]. Существуют многочисленные геологические формации с характерными генетическими и структурно-минералогическими особенностями. Горные породы, выбранные для подземной изоляции РАО, несут все характерные признаки своей формации, но одновременно имеют характерные особенности, присущие региону или только выбранному участку.

В работе [146] рассмотрены два основных варианта развития подземной системы изоляции во времени:

- эволюционный вариант, в котором радиоэкологическое влияние хранилища ограничено многобарьерной системой защиты при условии стабильности вмещающей геологической среды – сохранения соответствия с требованиями критериев выбора площадок;
- аварийный вариант, рассматривающий радикальное изменение тектоно-гидрогеологических условий участка с последующим обводнением ПЗРО и поступлением радионуклидов в водоносные горизонты.

## 9.1. Эволюционный вариант.

Для приповерхностных (наземных и подземных) ПЗРО, сооружаемых для захоронения низко- и среднеактивных отходов со сроками потенциальной опасности, сопоставимыми с продолжительностью функционирования системы инженерных барьеров (300–500 лет), основной гарантией безопасности является соблюдение принципов, критериев и требований безопасности, выполнение федеральных норм и правил [13, 18, 20, 240].

Оценки безопасности проводятся путем многовариантных расчетов, использующих параметры компонентов системы инженерных барьеров (матрицы РАО, упаковок, защитных контейнеров, уплотнительных засыпок, стенок подземных выработок) и барьерных свойств вмещающих пород приконтурной ближней зоны. Расчеты используют программы, описывающие диффузию радионуклидов в водонасыщенных многобарьерных системах. Для сценариев нормальной (наиболее вероятной) эволюции хранилищ РАО время диффузионного переноса через систему инженерных барьеров перекрывает сроки потенциальной опасности таких радионуклидов, как $^{90}Sr$ и $^{137}Cs$. Вмещающая геологическая формация для нормального сценария является дополнительным барьером.

Проведенные расчеты показали, что контейнерная система защиты в полной мере обеспечит локализацию таких радионуклидов, как $^{90}Sr$ и $^{137}Cs$ [16, 150, 153-156, 159]. В случае разрушения контейнеров максимальное развитие ореола диффузионного переноса в верхневендских или нижнекембрийских глинах за всё время необходимой изоляции будет в пределах приконтурной зоны горных выработок (не более 1 м) [17, 22, 122, 139, 142, 145, 147, 148, 151, 175].

Эволюционный вариант обосновывается доказательствами сохранения в течение 500 лет многобарьерной системы защиты при отсутствии серьезных изменений сейсмо-тектонического и гидрогеологического режимов. Прогноз на такие сравнительно небольшие сроки для региона с хорошо изученным геологическим прошлым имеет высокую достоверность.

Наиболее вероятно, что и через 500 лет пласты глин будут сохранять свои гидроизолирующие и барьерные свойства, а сооруженный за пределами влияния тектонических разломов ПЗРО за время своей эксплуатации и консервации не будет разрушен и заполнен водой.

500 лет для развития геологических событий является незначительным, непредставительным отрезком времени. Однако для исторических событий это достаточно продолжительный временной интервал.

Например, в конце XV века на месте старой деревянной крепости у п.Копорье была построена каменная цитадель. Крепостная площадка расположена в 12 км от южного побережья Финского залива и 23 км к югу от г. Сосновый Бор.

Геологический разрез этого района представлен преимущественно кембрием (глины, песчаники) и ордовиком (пески, сланцы, известняки), перекрытыми четвертичными ледниковыми суглинками, супесями и валунными песками. Различие физико-химических свойств горных пород определило строение ландшафта. Рыхлые породы кембрия и нижнего ордовика были интенсивно эродированы и вынесены за пределы территории. Плотные известняки ордовика создавали отвесные уступы и речные долины с крутыми бортами. Естественно, что формы рельефа были использованы при строительстве крепости Копорье. Использовались как особенности форм рельефа, так и местный строительный материал – плиты известняка и валуны.

Исторический памятник «Копорская крепость» следует рассматривать в качестве материально-исторического аналога, достаточно сложного строительного объекта, существующего в определенной сейсмо-тектонической и климатической зоне более 500 лет. Уровень его сохранности дает основание для прогнозирования сравнительно стабильных ландшафтно-климатических условий в регионе на ближайшие 300–500 лет (рис. 29).

**Рис. 29**. Копорская крепость – материально-исторический аналог для оценки ландшафтно-климатических условий на участке «Копорье» за последние 500 лет (из http://volkhov.ru/prosmotr.php?n=4).

## 9.2. Аварийный вариант

Аварийный вариант по своему содержанию представляет собой прогноз неблагоприятных событий, которые могут реализоваться в будущем. Для составления такого прогноза требуется соблюдение общепринятых «геоперспективных» детерминистических методов [88]. Все прогнозируемые процессы и явления должны быть закономерно связаны и причинно-обусловлены. Создающие аварийную ситуацию процессы взаимосвязаны и взаимозависимы, при этом следственный процесс может оказывать обратное воздействие на причину его проявления. Необходимо отметить, что события (тектонические разломы, обводнение, растворение матриц РАО и пр.) должны происходить в заранее выделенном ограниченном объеме геологического пространства – в подземных горных выработках ПЗРО. Более того, аварийная ситуация природного происхождения должна возникнуть в определенное время – непосредственно после консервации хранилища. Осложнение обстановки в процессе заполнения подземных камер РАО может быть ликвидировано существующими горно-техническими методами. Возникновение аварийной ситуации через 300 лет после консервации ПЗРО исключает такие радионуклиды, как $^{90}Sr$ и $^{137}Cs$, из анализа безопасности геотехнологического комплекса.

Какое-либо нарушение или выпадение из всего ряда событий какого-то компонента или процесса может прервать аварийную ситуацию в целом.

Наиболее серьезная авария может возникнуть в результате существенного изменения геологических условий, вследствие чего изоляция ПЗРО будет нарушена и проникшие в него подземные воды стимулируют миграцию радионуклидов в водоносные горизонты. Для реализации этого аварийного варианта на участке хранилища в пластах глин необходимо последовательное проявление и взаимосвязанное развитие нескольких природно-техногенных событий и процессов.

1) В результате тектонических напряжений в кристаллическом фундаменте под участком ПЗРО возникают новые или активизируются ранее существующие разломы.
2) По разломам в архей-протерозойских породах происходят существенные вертикальные подвижки, затронувшие вышележащие пласты глин, в которых образуются протяженные вертикальные или наклонные разрывы и зоны трещиноватости.
3) По образовавшимся в пластах глин разрывным нарушениям из водоносных горизонтов (ломоносовского, гдовского) происходит проникновение вод в подземные выработки ПЗРО.
4) Обводнение ПЗРО сопровождается переводом в растворенное состояние изолируемых радионуклидов.
5) Радиоактивные растворы распространяются за пределы геотехнологической системы подземной изоляции вплоть до первоначальных источников поступления вод – водоносных горизонтов.

Для анализа реализации аварийного варианта необходимо рассмотреть все составляющие компоненты геотехнологической системы подземной изоляции и оценить вероятность проявления отдельных процессов и их взаимосвязи. При анализе сохраняется последовательность перечисленных ранее событий, но выделяется требуемая целевая характеристика компонента всей аварийной системы – геологической формации, породы, водоносного горизонта, ПЗРО и пр.

1) Архей-протерозойский кристаллический фундамент.

Рассматриваемый район по своему геологическому строению является плитой – тектонической структурой с двухъярусным строением (табл. 19). Нижний этаж представлен жесткими блоками древних архей-протерозойских гнейсов и гранитоидов (1600–2500 млн. лет), верхний – чехлом более молодых и пластичных осадочных пород.

Кристаллический фундамент является южным окончанием Балтийского щита, глубоко погружающимся далее на юг под геологические формации Русской плиты.

В архее геодинамическая обстановка кристаллического щита определялась взаимодействием двух крупных литосферных блоков, субдукцией плиты раскрывающегося Палеоатлантического океана под соседнюю палеоконтинентальную плиту. В архее формировалась «нуклеарная», купольно-поясная структура, характерная для древнейшего развития земной коры [105].

В раннем протерозое в северо-восточной части Балтийского щита устанавливается внутриплитный тип тектоно-магматической активности. Одним из ведущих механизмов формирования геологических и тектонических структур был подъем мантийного плюма и его активное взаимодействие с породами литосферы [241].

В протерозойское время территория щита и его обрамление вступает в платформенный тип эволюционного развития, для которого характерен спокойный тектонический режим. Рассматриваемый район представляет южную оконечность региональной структуры щита – Свекофенский мегаблок.

В конце рифея (~650 млн. лет) происходит подъем территории и пенепленизация её поверхности. В современном разрезе верхняя часть кристаллического фундамента представлена породами древней коры выветривания. Это легко разрушающийся песчано-галечный материал, дресьва гнейсов, гранитоидов, мигматитов [106]. В районе площадки «ЛСК «Радон» мощность коры выветривания крупнозер-

нистых порфировидных гранодиоритов кристаллического фундамента составляет 5,5 м.

На территории южного побережья Финского залива архей-протерозойские породы разделены разрывными нарушениями на отдельные блоки, различающиеся по составу и структуре. Кроме того, структура кристаллического фундамента осложнена различно ориентированными региональными и локальными зонами разломов и системами линеаментов [126].

Линейные размеры блоков 40–60 км соответствуют оптимальным размерам элементов литосферы при их эволюционном тектоническом развитии [242].

Сосновоборский блок, в пределах которого расположены перспективные площадки ПЗРО, отделен от расположенного восточнее Ижорского блока зоной разломов. При этом динамическое влияние и оперяющие структуры распространены преимущественно в сторону Сосновоборского блока.

К долгоживущим глубинным разломам или другим активным структурам тяготеют зоны новейших тектонических движений. На новейшие тектонические процессы оказали влияние наложенные гляциоизостатические компенсационные движения, которые после деградации ледников в неоплейстоцене и начале голоцена усложнили ритмику собственно тектонических движений.

Изучение новейшей тектоники Ленинградской области структурно-геоморфологическими, геологическими, геодезическими и дистанционными методами показало, что их активизацию можно разделить на три временных интервала: олигоцен-неогеновый (~25–20 млн. лет), позднеледниковый-голоценовый (~25–20 тыс. лет) и современный.

Вся северная часть предглинтовой низменности в настоящее время является зоной умеренного поднятия, характеризующейся большим количеством максимумов плотности гидросети и преимущественно положительными значениями скоростей современных вертикальных движений – 0,2–0,3 мм/год. Зона современной активизации расположена восточнее Сосновоборского блока и проходит от г. Ломоносов до Санкт-Петербурга [126].

Российская часть Балтийского щита относится к областям со слабой сейсмичностью [243, 244]. В его южной части на территории Ленинградской области наиболее активным сейсмическим районом является котловина Ладожского озера (Ладожский грабен).

В Южном Приладожье и в центральной части Карельского перешейка буровыми работами установлены малоамплитудные смещения фундамента. Одновременно происходят смещения вышележащих глинистых пород венда. Аргиллиты венда над разломами кристаллического фундамента «претерпели переработку и уже не являются водоупорами» [106].

Таким образом, существующий достаточно детальный уровень изученности кристаллического фундамента западной части Ленинградской области не дает оснований для доказательства тектонической активизации этой территории в ближайшем геологическом будущем. Высокоамплитудные подвижки с существенным разнознаковым смещением разделенных разрывом пород, образование сбросов или взбросов в пределах сформировавшихся устойчивых блоков маловероятны.

2) Пласты глинистых пород осадочного чехла.

Для анализа следующих прогнозируемых процессов необходимо допустить реализацию маловероятных тектонических процессов. При этом разрывные нарушения должны распространиться в вышележащие пласты глинистых пород.

Непосредственно над зоной выветривания кристаллического фундамента залегают осадки вендского времени. Глубина залегания пород фундамента 158,5 м вблизи площадки «ЛСК «Радон» и 340 м вблизи площадки «Копорье». Далее для этих двух площадок будут даны цифры мощности свит и горизонтов. Выше архей-протерозойских пород по разрезу расположены:

- переслаивающиеся нижнекотлинские глины и песчаники (венд) с гдовским водоносным горизонтом мощностью 63,5–78,6 м ;
- глины котлинской свиты мощностью 78,0–89,5 м;
- песчаники, алевролиты и глины нижнего кембрия мощностью 15–16,1 м с ломоносовским водоносным горизонтом;
- нижнекембрийские глины лонтоваского горизонта с мощностью у площадки «Копорье» около 108 м (в полосе вдоль южного берега Финского залива, в том числе и на площадке «ЛСК «Радон» отложения нижнекембрийских глин размыты и эродированы).

Генерируемое из кристаллического фундамента разрывное нарушение должно распространиться выше по разрезу на 100–200 м, сохраняя свой импульс в различных по плотности («демпфирующих») породах:

- прослоях коры выветривания кристаллического фундамента,
- песчано-глинистых породах нижнекотлинского горизонта,
- для условий площадки «Копорье» в песчано-глинистом горизонте нижнего кембрия.

Кроме того, верхняя часть разреза верхневендских глин (площадка «ЛСК «Радон») характеризуется разуплотненностью пород [151], т.е. сами пласты глин не являются равномерно жесткими структурами.

Дополнительно необходимо привести известные доводы в сохранности пластами глин своих изолирующих свойств в течение длительных промежутков времени (глава 4.1.):

- глинистые отложения Ленинградской области являются региональными водоупорами, разделяющими или изолирующими водоносные горизонты с различным составом и свойствами подземных вод;
- проведенные исследования новейших процессов геодинамики показали, что гляциоизостатические компенсационные движения оставляют в пластах глин преимущественно пликативные, а не разрывные изменения сплошности пород [130].

3. Проникновение подземных вод по разрывным нарушениям в пластах глин

Допуская маловероятный процесс образования в пластах глин «наведенных» разрывных нарушений, необходимо определить источники поступающих в ослабленные зоны вод, а также характер продвижения подземных растворов в глинистых породах.

Для пласта вендских глин (площадка «ЛСК «Радон») основным источником поступления подземных вод является нижележащий вендский водоносный комплекс (стрельнинский и гдовский горизонты). На южном побережье Финского залива вендские минерализованные воды не эксплуатируются.

Для площадки «Копорье» к потенциальному глубоколежащему источнику вендских вод присоединяется Ломоносовский водоносный горизонт, расположенный в основании пласта нижнекембрийских глин (рис. 11). В северной части Ломоносовского района (промплощадки ЛАЭС, «Экомет-С», хранилище РосРАО и пр.) ломоносовский горизонт выклинивается, оставляя небольшие изолированные линзы. На площадке ЛАЭС дебит скважины этого горизонта составляет 0,2–0,4 $дм^3$/сек.

Не вдаваясь в сам механизм проникновения подземных вод в новообразованные разрывные нарушения, необходимо отметить специфическую особенность глин – способность к набуханию. Даже сравнительно небольшие величины этого параметра 5–15 % будут со временем уменьшать сечение водоподводящих каналов. В итоге продвижение вод по пласту глин на расстояния в десятки метров будет затруднено, а затем может прекратиться. С процессами набухания связаны изолирующие свойства глинистых пород, их способность залечивать трещины и ослабленные зоны пласта.

4.Образование радиоактивных растворов.

Для образования заметных количеств радиоактивных растворов при сооружении ПЗРО должны быть допущены серьёзные нарушения требований к форме отходов и консервации хранилища. Ранее такая ситуация рассматривалась как сценарий с нарушением принятых свойств барьеров (табл. 38) [235]. Матрицы и упаковки разрушены и не выполняют своих защитно-изолирующих функций, в подземных выработках осталось много свободных пространств, незаполненных сорбционно-изолирующими материалами. В случае обводнения происходит растворение РАО и образование радиоактивных растворов.

Заполненный водой ПЗРО представляет собой систему, в которой наряду с процессами растворения, происходят задержка и осаждение радионуклидов на продуктах трансформации матриц, коррозии упаковок и на глинах в приконтурной зоне горных выработок. Многообразие подвижных форм различных радионуклидов – ионных, комплексных, коллоидных и пр.– позволяет рассматривать возможность миграции наиболее подвижных, например, коллоидных, за пределы границ ПЗРО. Немаловажным фактором является химический состав проникающих вод, активно влияющий как на миграционные, так и на барьерные процессы. Вендский водоносный комплекс представлен минерализованными водами (~5 г/л), а ломоносовский – практически пресными водами (табл. 22). Для аварийного варианта необходимо принять, что пустые пространства ПЗРО заполнены радиоактивными растворами.

5. Распространение радиоактивных ореолов за пределы горного отвода ПЗРО.

Соединение разрывных нарушений в глинах с водоносными горизонтами и подземными выработками ПЗРО создает сложную геотехнологическую водную систему, в пределах которой образуются пространственно-временные радиоактивные ореолы, различающихся своими свойствам радионуклидов.

При этом прогнозные расчеты показывают, что выход радиоактивных вод за пределы инженерных барьеров хранилища и горного отвода не всегда может создать аварийную ситуацию, связанную с превышением уровней вмешательства для природных объектов [245]. В качестве примера целесообразно рассмотреть приповерхностное хранилище низкоактивных отходов в обводненных песчано-глинистых отложениях с разгрузкой грунтовых вод в речную сеть (р. Томь). При аварийном сценарии железобетонные конструкции теряют свои гидроизолирую-

щие свойства, и дождевые воды фильтруются через хранилище, растворяя при этом радионуклиды и перенося их в грунтовые воды и далее в речную сеть. Предполагается, что через 300 лет коэффициент фильтрация воды через разрушенный бетон будет близок к коэффициенту фильтрации для песков – ~1 м/сут.

Для выбранных наиболее реалистических прогнозных сценариев составлены модели миграции радионуклидов с применением программы Amber 4.4. Расчеты показали:

- не прогнозируется превышения уровня вмешательства для вод верховодки от хранилища до р. Томь для $^{14}C$, $^{90}Sr$, $^{137}Cs$ в течение 50 лет;
- не прогнозируется миграция $^{137}Cs$ с верховодкой на такое же расстояние за всё время прогноза – 10 000 лет;
- превышение уровня вмешательства возможно для $^{14}C$ через 700 лет после консервации хранилища;
- при нарушении гидроизоляционных свойств железобетонного основания ранее 100–200 лет возможно превышение уровня вмешательства для $^{14}C$ и $^{90}Sr$ через 100 и 180 лет после консервации;
- повешение уровня вмешательства для $^{14}C$ может возникнуть в случае повышения уровня верховодки через 220 лет после консервации хранилища.

Анализ чувствительности метода (взаимосвязь между входными данными и результатами расчетов) показал:

- на конечный результат не влияют изменения пористости и коэффициента фильтрации грунтов;
- значительные изменения конечных результатов вызывает изменение коэффициента распределения радионуклидов.

Величины коэффициентов распределения $^{137}Cs$ для различных типов суглинков площадки ГУП МосНПО «Радон» приведены в табл. 41 [246].

Таблица 41

Интегральные характеристики суглинков [246]

| Тип суглинков | Глинистые минералы | % фракции <0,005 мм | Средний радиус пор, Å | $K_d$, $см^3/г$ |
|---|---|---|---|---|
| Покровные | Смектит, иллит, каолинит | 30 | 25,4 | 753 |
| Болотные | Хлорит, вермикулит, каолинит, иллит | 12 | 89,2 | 432 |
| Моренные | Смектит, иллит, каолинит, хлорит | 24 | 51,1 | 685 |

Проведенными расчетами показано, что на конечный результат долгосрочного прогноза в первую очередь влияет коэффициент распределения, поскольку именно этот параметр (или коэффициент задержки) определяет скорость миграции радионуклидов в минеральной среде [245]. От величин этого параметра зависят размеры и конфигурация ореольной радиоактивной зоны распространения радионуклидов, вышедших за пределы ПЗРО.

Для условий размещения ПЗРО в пластах коренных отложений вендских или кембрийских глин с высокими значениями $K_d$ для $^{90}Sr$, $^{137}Cs$, $^{239}Pu$, $^{241}Am$, $^{60}Co$, $^{36}Cl$

было показано, что диффузионные ореолы рассеяния этих радионуклидов не выйдут за пределы приконтурной зоны горных выработок [17, 22, 109, 122, 139, 142, 148]. Даже при отсутствии сорбционных процессов при низкие значения коэффициентов фильтрации ($1 \cdot 10^{-6}$–$1 \cdot 10^{-7}$ м/сут) и малом вертикальном градиенте напора распространение радиоактивного ореола за 10 000 лет составит первые метры [122].

Гипотетический случай полного затопления ПЗРО рассматривался ранее, на начальных этапах оценки глин в качестве изолирующей среды для РАО [22]. Сделанные оценки показали, что время насыщения подстилающих хранилище глинистых пород мощностью 10 м по направлению к ломоносовскому водоносному горизонту может составить несколько тысяч лет после затопления. Это время значительно превышает десятикратные периоды полураспада таких радионуклидов, как $^{90}Sr$ и $^{137}Cs$.

Было показано, что время задержки диффузионного переноса через слой нижнекембрийской глины мощностью 1 м с учетом коэффициентов распределения составит для цезия 5 000 лет, стронция – 300 лет, плутония – 50 000 лет.

Для маловероятного случая возникновения направленного водного потока через ПЗРО в глинах дальность распространения радионуклидов ограничится ближней зоной хранилища. Например, если скорость потока составит 0,7 м/год, а гидравлический градиент – $(1{,}5–3{,}0) \cdot 10^{-3}$ м/м, то максимальное распространение радиоактивного ореола не превысит 3,3 м от места локализации к 600-му году после начала миграционного процесса [22].

Для рассматриваемого нами аварийного варианта предполагается наличие вертикальных или круто наклоненных разрывных нарушений, проходящих через весь пласт глин и через горные выработки ПЗРО. Как было показано выше, можно допустить ситуацию, при которой кроме молекулярно диффузионного механизма формирования ореола произойдет более интенсивное распространение радионуклидов по пласту глин. В этом случае направление миграции и форма ореола будут зависеть не только от размеров и ориентации трещин, но и от структурно-минералогических особенностей вмещающей геологической среды.

Верхневендские и нижнекембрийские глины Ленинградской области являются анизотропными средами, что обусловлено присутствием в толще аргиллитовых глинистых пород прослоев алевролитов, обогащенных более крупными минеральными частицами. Естественно, что проницаемость последних будет выше, чем для прослоев микродисперсных глинистых минералов.

В водонасыщенной среде со слоистой структурой массоперенос вдоль алевролитовых прослоев будет более интенсивным, чем в направлении, перпендикулярном слоистости. Явление неоднородного распространения миграционных потоков в слоистых средах с различной проницаемостью хорошо известно в геологической поисково-разведочной практике [236].

При оценках нижнекембрийских глин как среды для подземной изоляции РАО их анизотропия рассматривалась как недостаток [142]. Однако именно это свойство может изменить направление миграции, «перехватить» распространение радионуклидов по трещинам к ниже- или вышележащим водоносным горизонтам и направить их в горизонтальном направлении по наиболее проницаемым алевролитовым прослоям. При этом между ПЗРО и водоносными горизонтами создается слоистая ореольная зона, «демпфирующая» и задерживающая радионуклиды в пределах пласта глин, вмещающих ПЗРО (рис. 30) [146]. Потенциальная емкость

пласта глин увеличивается, что необходимо учитывать в миграционных моделях, а также при оценках вместимости ПЗРО.

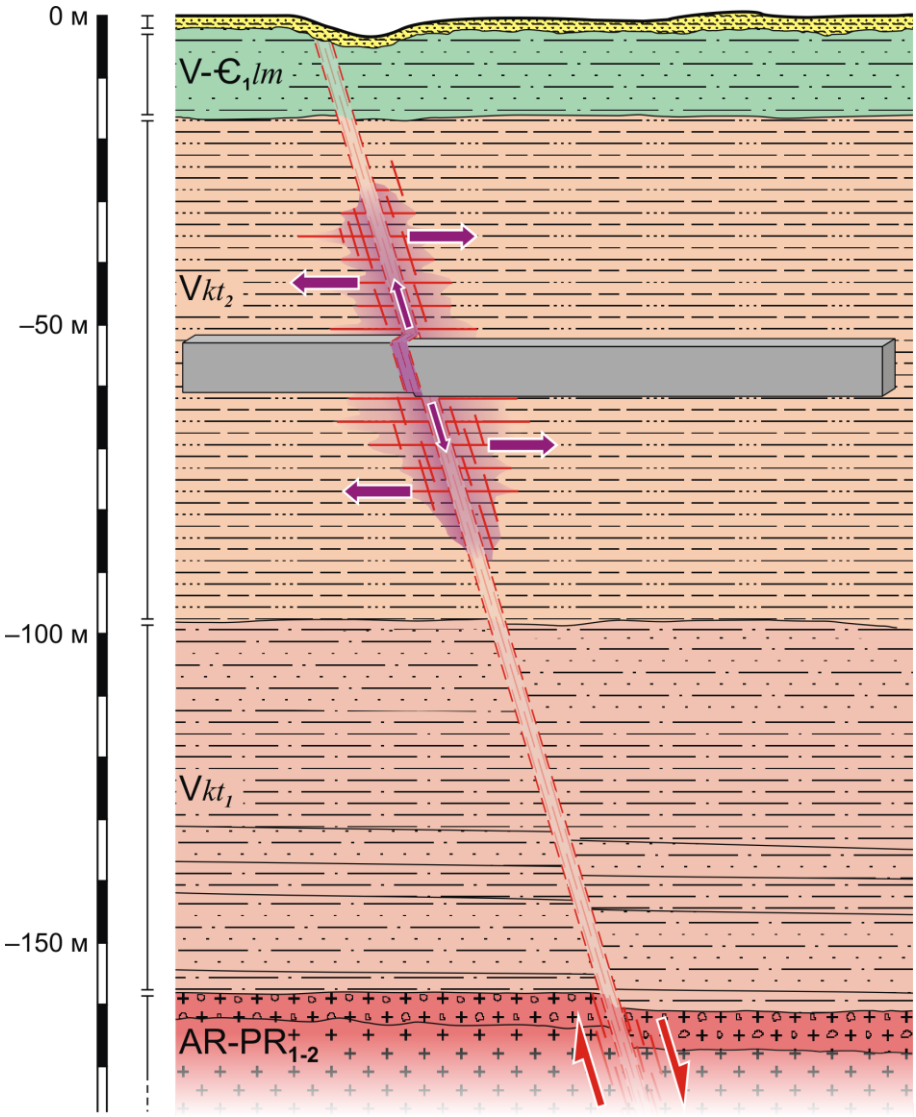



**Рис. 30.** Возможное развитие ореола рассеяния радионуклидов в верхневендских глинах по разнонаправленной системе каналов миграции, образовавшимися после предполагаемого крупного тектонического разлома пород кристаллического фундамента [15].Условные обозначения**:** **$Є_1$**- осадочные породы нижнего кембрия; V$kt_2$ – пласт вендских глин котлинского горизонта; V$kt_1$ – глины, водоносные песчаники нижнекотлинского горизонта; AR-$PR_{1-2}$ – архейско-протерозойские породы кристаллического фундамента.

Дальнейшее рассмотрение развития предполагаемых природных миграционных процессов, приводящих к возможной «экологической катастрофе – загрязнению используемых водоносных горизонтов» [40], будет лишь увеличивать число произвольных допущений и не соответствовать реальным условиям.

Для реализации аварийного сценария необходимы существенные подвижки блоков или региональных разломов кристаллического фундамента. Для рассматриваемого района предглинтовой низменности такие явления не характерны и относятся к маловероятным. При этом, принимаемая за основную причину аварийной ситуации вероятностная тектоническая подвижка должна произойти в определенном месте (в пределах выработок ПЗРО) и в определенное время (непосредственно после консервации ПЗРО). Обосновать реализацию такой совокупности событий достаточно сложно, тем более, что вероятностный характер тектонической коллизии будет сохраняться независимо от количества дополнительной информации [1].

Вероятность тектонической подвижки увеличивается, если при выборе площадок не были выявлены существующие неоднородности структуры кристаллического фундамента. Однако такое «упущение» само по себе маловероятно, поскольку современные дистанционные геофизические методы позволяют достаточно детально изучить геологическое строение участков и выявить неоднородности блоковых структур кристаллического фундамента [247]. Упрощает задачу выявления неоднородности геофизических полей небольшая глубина залегания архейско-протерозойских пород, которая на участках «ЛСК «Радон» или «Копорье» составляет 160 и 340 м соответственно.

При рассмотрении локального прогноза развития природных процессов не учтен весьма существенный фактор, который, как правило, не рассматривается при моделировании различных аварийных вариантов и расчетах рисков.

Таковым фактором является возможность техногенного вмешательства в аварийную ситуацию для ликвидации её последствий.

Нормы и правила проектирования и строительства подземных хранилищ и могильников РАО требуют создания системы контроля и инженерной защиты подземных вод от загрязнений радионуклидами [13, 240, 248].

В последнее время во всем мире получили широкое развитие теоретические и практические работы по изучению техногенного загрязнения недр и ликвидации негативных последствий миграции радионуклидов. Разработаны комплексные программы и планы реабилитации территорий крупных ядерно-промышленных центров и радиохимических комбинатов в Российской Федерации, США и других странах [249, 250].

Проведены исследования различных способов задержки, ограничения или замедления миграции загрязняющих веществ в подземных водах. Наиболее распространенными методами являются противофильтрационные и противомиграционные.

Противофильтрационные методы включают создание перехватывающих и преграждающих систем и сооружение водонепроницаемых барьеров.

Перехватывающие системы могут состоять из дренажных канав или водозаборных скважин, с помощью которых осуществляется откачка загрязненных подземных вод. При этом изменяется первоначальное направление движения потока загрязняющих веществ.

Преграждающие системы создаются серией нагнетательных скважин, благодаря которым на пути движения загрязненных вод возникает сдерживающий барьер, изменяющий направление загрязненного потока.

Противофильтрационные барьеры создаются нагнетанием через скважины специальных растворjd, при твердении которых образуется барьер из водонепроницаемого материала. Воздействие на поток загрязненных вод противофильтрационного барьера аналогично воздействию преграждающих систем.

Противомиграционные методы обеспечивают задержку миграции или разложение определенных компонентов загрязненных вод, что достигается, например, сооружением геохимических и биогеохимических барьеров.

Выбор наиболее эффективного метода ограничения распространения техногенных загрязнителей зависит от поставленной задачи, от сложившейся гидрогеологической обстановки и геохимических условий в районе расположения источника техногенного загрязнения, а также физико-химических свойств и поведения загрязняющего вещества.

Разработаны горнотехнические и технологические методы, которые позволяют осуществлять разнообразные операции защиты недр и водоносных горизонтов – подземная кольматация разрывных нарушений, создание искусственных минерально-технологических завес и геохимических барьеров, изоляция подземных выработок от проникновения подземных вод водонабухающими полимерно-минеральными композитами и пр. [251–254].

Представляет особый интерес увеличение поглощающей емкости глинистых минералов при модификации их органическими компонентами, в частности, гуминовыми кислотами, выделенными из торфа [255]. Разность между межплоскостными расстояниями $d_{001}$ модифицированных и исходных минералов составляет:

для монтмориллонита 17–28 и 12,8 Å;

для каолинита 10,8–14 и 7,12 Å.

Внедрение органических катионов изменяет кристаллическую структуру минералов. Значительно увеличивается величина поглощаемых радионуклидов (табл. 42).

Таблица 42

Изменение значения $K_d$ , $см^3/г$ для монтмориллонита Камалинского месторождения Иркутской области (по данным работы [255])

| Радионуклид | До модификации | После модификации |
|---|---|---|
| $^{85}Sr$ | $2{,}1\cdot10^2$ | $6{,}7\cdot10^3$ |
| $^{137}Cs$ | $1{,}5\cdot10^2$ | $2{,}2\cdot10^3$ |

Существует опыт создания защитных барьеров и консервации приповерхностных хранилищ и бассейнов с низко- и среднеактивными отходам, содержащими долгоживущие радионуклиды $^{239}Pu$, $^{241}Am$. В качестве основного инженерного барьера используются глины.

Для повышения надежности долговременного хранения РАО в законсервированном наземном хранилище – бассейне Б-2 Сибирского химического комбината создана дополнительная защитная завеса с использованием нефелина– $KNa_3[AlSiO_4]_4$ [251]. Минерал закачивается в скважины в форме азотнокислого нефелинового раствора. Такой метод позволяет закрепить компоненты отходов в по-

ристых средах, предотвратить или ограничить миграцию радионуклидов.

Один из крупнейших ядерно-промышленных комплексов США находится в Ханфорде, штат Вашингтон. Территория комплекса расположена в излучине р. Колумбия и представляет собой плато, приподнятое над уровнем реки [253]. В основании геологического разреза залегает толща базальтов мощностью более 2 000 м. На участках подземного удаления РАО (область 100-N) кровля базальтов расположена на глубинах 200-270 м. Базальты перекрыты осадочными породами плейстоцена – гравиями, песками и глинами общей мощностью 100–200 м. Плейстоценовые отложения перекрыты флювиогляциальными и аллювиальными отложениями – гальки, гравий, пески, илы, мощность которых на участках подземного удаления жидких отходов в колодцы составляет 70–120 м. При вертикальной фильтрации радиоактивных растворов в проницаемых породах до уровня грунтовых вод происходит очищение стоков вследствие сорбции радионуклидов породами, содержащими глинистые минералы (монтмориллонит). Наблюдениями в контрольных скважинах было установлено, что наряду с вертикальной миграцией жидких РАО происходит их горизонтальное растекание в сторону реки Колумбия. Для её защиты в прибрежной зоне создаются искусственные апатитовые барьеры (рис. 31) [254].

Апатит $Ca_5(F,OH)\ (PO_4)_3$ является стабильным, практически нерастворимым в воде минералом. В апатитах кальций может легко замещаться стронцием (до 11 %).

Создание in situ защитного барьера из апатита включает разбуривание сети скважин с последующей инжекцией в них цитратфосфатного раствора кальция. Относительно медленное биоразложение комплекса кальций–цитрат, происходящее в течение нескольких суток, предоставляет достаточное время для ввода и переноса реагентов в нижние области водоносного горизонта. После разложения цитрата кальция происходит взаимодействие кальция и фосфата с образованием аморфного апатита, который через несколько недель переходит в кристаллическую форму. $^{90}Sr$ сорбируется на апатите, а затем замещает кальций в кристаллической решетке апатита.

Сооружение апатитового барьера предполагают дополнить технологией фитореабилитации. В этой технологии будут использованы местные ивы для извлечения их корневой системой $^{90}Sr$ из прибрежной полосы. Периодически кусты ивы будут обновляться, а использованные растения захораниваться.

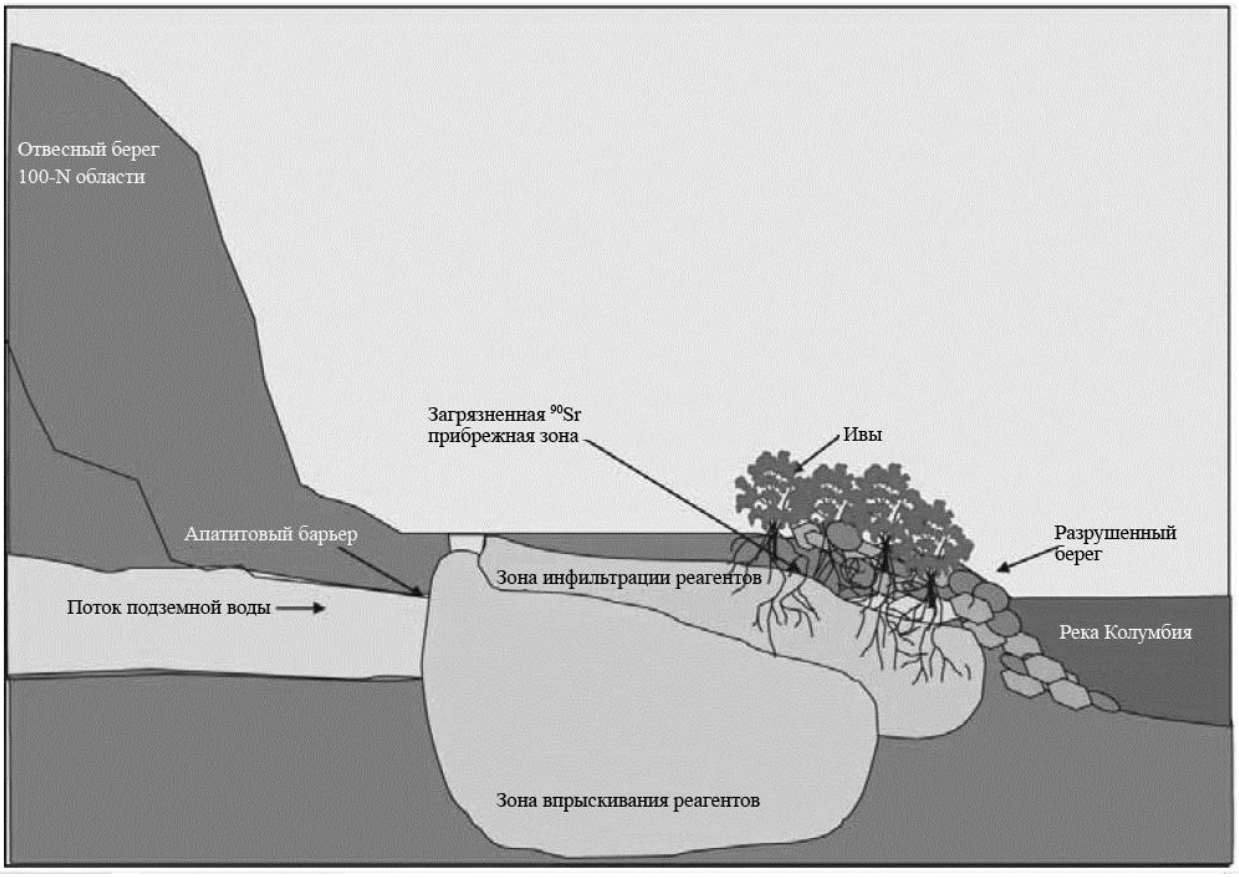



**Рис. 31**. Иллюстрация плана комплексной очистки поступающих в р. Колумбия загрязненных подземных вод [254].

Таким образом, для разработки стратегии защиты р. Колумбия от $^{90}$Sr потребовалось глубокое понимание природной системы циркуляции подземной воды в зоне 100-N. Концептуальная и детерминистская модели помогли выявить области, на которых должны быть сосредоточены меры защиты реки, и подтвердили адсорбционный механизм защиты.

Ближайшие планы включают получение данных, которые помогут определить наиболее экономичный способ создания апатитного барьера с долговечностью в 300 лет.

В этом же районе подземной закачкой полифосфатов стабилизируется распространение миграционного уранового загрязнения (uranium plume) [256].

Горно-технологические методы предотвращения загрязнения поверхностных водоемов, в частности р. Колумбия, могут быть использованы в случае возникновения аварийной ситуации для ПЗРО, построенном на площадке «Копорье». Перехват загрязненных подземных вод, двигающихся по направлению к Финскому заливу, производится на участке предглинтовой низменности между п. Копорье и промзоной г. Сосновый Бор (рис.13). При этом наряду с использованием нефелиновой или апатитовой защиты, следует считать целесообразным закачку в зону инфильтрации растворов модифицированных нижнекембрийских глин [255].

Разработанные в настоящее время разнообразные горно-технологические методы вмешательства в гидрогеологические процессы способны прервать утечку радионуклидов и предотвратить загрязнение подземных и поверхностных вод.

Совокупность проявления природных факторов, приводящих к наиболее «аварийному» сценарию разрушения и обводнения ПЗРО в верхнвендских или нижнекембрийских глинах Ленинградской области, имеет малую вероятность. Кроме того, последствия этих маловероятных процессов или сами процессы могут быть ликвидированы существующими горно-технологическими проивофильтрационными и противомиграционными методами.

## 9.3. Развитие других природных процессов.

При анализе и разработке прогноза состояния геотехнологической системы подземной изоляции необходимо рассматривать две группы природных процессов – эндогенных и экзогенных. К эндогенным процессам рассматриваемого участка следует отнести медленное воздымание территории Балтийского кристаллического щита, которое будет сопровождаться подъемом подземных выработок ПЗРО. Экзогенные процессы (выветривание, денудация и др.) будут направлены на разрушение и снос приповерхностной части горных пород, на приближение ПЗРО к поверхности. Варианты взаимодействия двух разнонаправленных природных процессов рассматривались ранее для глинистых отложений Италии (п. 4.5, рис. 9).
Естественно, что критерии выбора площадок требуют исключения нарушения целостности подземных хранилищ и могильников, включая катастрофический выход изолированных РАО на поверхность.

«Могильник должен быть расположен в районе с низкой тектонической и сейсмической активностью, удаленном от областей с высокой тектонической активностью, чтобы исключить опасность нарушения его целостности» [18].

«Следует учитывать возможность проявления неустойчивых геоморфологических обстановок, экстремальных климатических периодов и других поверхностных процессов, которые могут повлиять на основные функции хранилища» [18].

«Прогноз развития рельефа должен доказать, что в течение сотен тысяч или миллиона лет хранилище не будет выведено на поверхность и не произойдет изменений режима циркуляции подземных вод» [20].

«Могильник должен быть размещен на достаточной глубине, исключающей влияние внешних воздействий и процессов в горных породах, препятствующей повреждению физических барьеров и ограничивающей перенос радионуклидов во внешнюю среду» [20].

Выполнение требований критериев должно гарантировать сохранение целостности ПЗРО, однако природные тектонические и денудационные процессы прекратить нельзя, и они в той или иной степени будут проявлены на всех территориях поверхности Земли.

На территории Фенно-Скандии структуры Балтийского кристаллического щита после освобождения от ледниковой нагрузки около 10–12 тыс. лет назад постоянно поднимаются, восстанавливая свой прежний квазистационарный уровень. Подъем отдельных территорий и ландшафтно-географических зон неравномерный. Так, берег Скандинавского полуострова в Ботническом заливе поднимается со скоростью ~1,2 см в год [257]. В районе Таллина скорость подъема 0,3 см/год. На юге Ленинградской области в зоне перехода структур кристаллического щита к структурам Русской платформы скорость уменьшается до 0,03 см/год. Ранее отмечалось, что для предглинтовой низменности в Ломоносовском районе скорость современных положительных вертикальных движений составляет 0,02–0.03 см/год [126].

Такая скорость подъема за 500 лет приблизит подземные выработки к поверхности на 10–15 метров. На площадке «ЛСК «Радон» при сохранении существующего местного базиса эрозии будут «снесены» четвертичные суглинки и часть песчано-глинистых пород нижнего кембрия, перекрывающих пласт котлинских (верхневендских) глин, вмещающих ПЗРО. На участке «Копорье» это будут моренные отложения и известняки ордовика. Последние, как известно, разрушаются крайне медленно, и их наличием объясняется характерный элемент рельефа – глинт.

В районе Копорье–Глобицы (рис. 13) обрывистый уступ глинта прорезан руслами ручьев, которые начинаются в основании известняков, а заканчиваются по направлению на северо-запад в нижнекембрийских глинах Предглинтовой низменности. Многочисленные ручьи и реки Воронка и Копорка образуют эрозионную сеть территории, на которой расположены перспективные участки.

Процесс разрушения поверхности рельефа водными потоками в значительной степени зависит от целого ряда природных факторов, главными из которых являются геоморфологические и климатические условия.

Природные условия и современный рельеф рассматриваемого района определяются его географическим положением на широте 60° в умеренной климатической зоне с выходом к Финскому заливу Балтийского моря. По специфике форм рельефа он относится к Балтийско-Ладожской области в границах обширного понижения доледниковой поверхности. Высота над уровнем моря не превышает 100 м. Вся территория имеет характерный ледниковый и послеледниковый рельеф, возникший в интервале от 50 до 10 тыс. лет назад во время таяния последнего (валдайского) ледника.

Вдоль побережья Финского залива расположена терраса Литоринового моря (предшественника современного Балтийского). Древняя терраса ограничена абразивными уступами и береговыми валами, местами превращенными в дюны.

Перспективные площадки «ЛСК Радон» и «Копорье» расположены в прибрежной полосе Предглинтовой (Приморской) низменности с плоско-волнистой, местами заболоченной поверхностью с абсолютными отметками 0-20 м. На юге и юго-востоке низменность ограничена Балтийско-Ладожским денудационным выступом – глинтом. Между п. Копорье и Красным Селом наблюдаются максимальные отметки бровки глинта – до 100 м. Западнее и восточнее происходит снижение отметок до 20–40 м с соответствующим понижением относительной высоты глинта от отметок 25–40 м до 5–10 м [258].

Климат Ленинградской области – атлантико-континентальный с умеренно холодной зимой и нежарким влажным летом. Определяющим фактором формирования климата является атмосферная циркуляция. С крупными циклонами и антициклонами на территорию области поступают воздушные массы, образующиеся над различными регионами и имеющие поэтому разные свойства: температуру, влажность, тип облаков и осадков. С запада со стороны Атлантики поступает влажный морской воздух, который вызывает похолодание летом и оттепель зимой, приносит осадки в виде дождя и снега. Поступление арктических воздушных масс с севера и северо-запада приводит к неустойчивому характеру погоды.

Количество дней с преобладанием влажных морских и сухих континентальных приблизительно равны. Среднегодовая температура воздуха составляет +4,5°С на западе области и +2,6°С на востоке [259]. Самый холодный месяц - январь с колебаниями средних температур от –7 до –11°С. Самый теплый месяц – июль с тем-

пературой 16–17°С. В особо теплые дни температура повышается до 32–34°С, однако летом возможны похолодания с понижением температуры до 5–10°С.

Вся территория Ленинградской области находится в зоне избыточного увлажнения при относительной влажности воздуха от 50 до 90 %. Количество осадков колеблется от 550 до 850 мм в год, а испарение составляет всего 300 мм. Следовательно, больше половины осадков впитываются почвой или стекают в водоемы.

Под влиянием физико-географических условий (близость крупных водоемов, разнообразие рельефа, наличие болот и пр.) возникают местные вариации климата. Так, на побережье Финского залива температура воздуха весной на 1° ниже, а осенью – несколько выше, чем в районах, удаленных от берега.

Переход от сезона к сезону постепенный с трудно оцениваемыми границами зимы, весны, лета и осени. Зимой количество осадков невелико – 40-55 мм в месяц, но дожди в начале зимы – обычное явление. Весной возможно вторжение арктических масс воздуха, с которыми связаны похолодания и ночные заморозки. Первая половина лета более теплая и солнечная, вторая – более пасмурная, ветреная и дождливая.

Средняя из наибольших за зиму высот снежного покрова в полях колеблется от 30–40 см в западных районах и до 55 см в восточных.

За весь исторический период времени на рассматриваемой территории не зарегистрированы экстремальные климатические или геоморфологические процессы, которые смогли бы повлиять на безопасность подземных и наземных сооружений будущего регионального ПЗРО.

За более продолжительные отрезки времени весь регион неоднократно испытывал серьёзные геоморфологические и климатические изменения. Только за последние 13 000 лет в дриасовое время на рассматриваемой территории образовались несколько послеледниковых морских бассейнов – Иольдиевое, Анциловое и Литориновое моря (табл. 21).

Очевидно, что, анализируя геологические факторы, определяющие безопасность ПЗРО в будущем, необходимо учитывать вероятность существенного изменения климата и появление ледниковых покровов – вопросы, которые были рассмотрены ранее в главе 8. Следует признать, что до настоящего времени ни прогноз затопления значительных территорий вследствие глобального потепления, ни грядущее покрытие стран северного полушария ледниками из-за глубокого похолодания не могут быть однозначно приняты.

В 1988 году Всемирной метеорологической организацией (ВМО) была учреждена Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК). В 1992 г. опубликован доклад МГЭИК «Оценка экологических и социально-экономических последствий изменений климата». В соответствии с одним из сценариев в период от 2025 и до 2050 гг. в атмосфере должно произойти удвоение концентрации $CO_2$ и других «парниковых» газов, что приведет к увеличению средней годовой температуры на величину в пределах от 1,5 до 4,5°С. Повышение уровня Мирового океана составит при этом примерно один метр. Для более умеренного сценария, при котором к концу XXI века среднегодовое повышение температуры составит 3°С, уровень Мирового океана повысится на 0,65 м. При таком прогнозе изменения природной обстановки в прибрежной зоне Финского залива существенно не скажутся на функционировании промышленных предприятий, в том числе и ПЗРО на площадке «ЛСК «Радон».

Существуют альтернативные точки зрения на причины изменения климата планеты в будущем. Представлены доказательства возможности глобального похолодания, базирующиеся на цикличности природных климатических процессов, управляемых деятельностью Солнца [215, 216, 257]. Относящиеся к этой проблеме вопросы были рассмотрены ранее в главе 8.

Учитывая вышесказанное, предлагается следующая структурно-методическая схема разработки локального прогноза условий подземной изоляции РАО в пластах глин Ломоносовского района Ленинградской области (рис. 32).

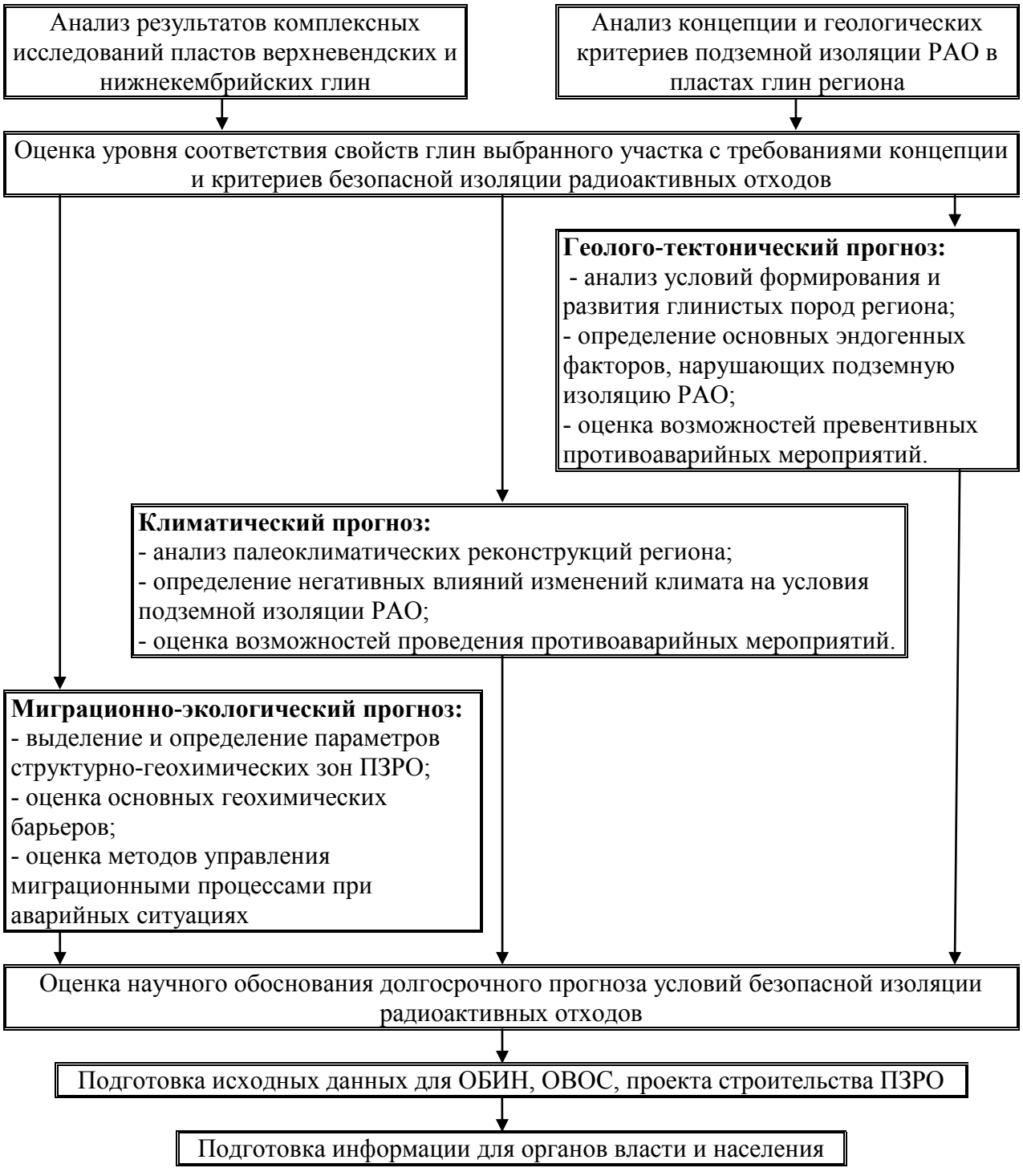



**Рис. 32** . Структурно-методическая схема разработки локального прогноза.

Имеющаяся в настоящее время информация, характеризующая коренные отложения глин в районе г. Сосновый Бор и предварительный локальный прогноз условий подземной изоляции, позволяют сделать заключение о возможности строительства ПЗРО, как минимум, для короткоживущих НАО и САО на сроки 300–500 лет [157, 158]. Однако сроки прогноза должны быть увеличены в связи с неопределенностью состава некоторых видов РАО, накопленных в предшествующие периоды времени. Кроме того, барьерно-изолирующие возможности пластов глин позволяют после проведения натурных испытаний расширить ассортимент РАО, обосновав включение в него долгоживущих радионуклидов.

Существующие научные разработки и технические возможности способны ликвидировать или в значительной мере уменьшить негативные последствия прогнозируемых аварийных ситуаций.

## Заключение

Глинистые формации широко распространены в земной коре и выполняют одну из своих важнейших функций – являются разграничивающей и регулирующей средой гидрогеологического режима в пределах крупных регионов и на локальных участках геологических структур.

Не менее существенное значение приобрели глины в жизни человека. Начало освоению этого природного образования положил комок мягкой глинистой породы, попавший в костер и превратившейся в твердую керамику («keramos» в переводе с греческого «глина»). В археологии керамика является наиболее важным датирующим материалом, поскольку может сохраняться на протяжении многих веков. Керамическим веком можно называть неолит (6–4 тыс. лет до н.э.), эпоху, когда человек создал несвойственный самой природе материал и широко его использовал сначала для изготовления посуды, культовых статуэток, а затем и строительных материалов, табличек для клинописи. Эти первые глиняные изделия начинали всеобщее внедрение глины в быт человека, чтобы в дальнейшем стать необходимой частью его разнообразной осмысленной деятельности.

В настоящее время трудно найти производственную область, в которой прямо или косвенно не использовались глины или технологии с их участием. О широкой и разнообразной «специализации» глин свидетельствуют их многочисленные названия – гончарные, отбеливающие, огнеупорные, пластичные, разбухающие, сухарные (не разбухающие в воде), фарфоровые, цементные.

Возможности и варианты использования глинистых пород чрезвычайно велики и разнообразны:

- в строительстве для производства кирпича, керамзита, керамзитобетона, цемента и пр.;
- в производстве огнеупоров для металлургической промышленности, производстве стекла и пр.
- изготовление изолирующей электрокерамики;
- сорбционно-поглощающие свойства глин широко используются в нефтеперерабатывающей, лесохимической, текстильной, масложировой, винодельческой промышленности, в медицине и парфюмерии;

- в строительстве гидротехнических и горнотехнических сооружений для монтажных и гидроизолирующих работ, защиты от разрывных деформаций и пр.;
- приготовления растворов для бурения скважин;
- изготовление керамических изделий, архитектура малых форм, техническая и художественная керамика.

Со временем существенно изменяются направления и цели использования глин. Если почти 6 тысяч лет назад человек вылепил глиняный кирпич, чтобы построить жилище и защитить себя от природных невзгод, то в наше время глину используют для защиты природы от созданных человеком радиоактивных отходов. Бентонитовой глиной улучшалась гидроизоляция 7 километрового основания Асуанской плотины на реке Нил. В глоссарии МАГАТЭ (1988 г.) тот же тип глин определен как «идеально пригодный для использования в качестве буферного материала, окружающего упаковки отходов в глубоких хранилищах».

Давно известны целебные свойствах глин, и наиболее ценной из них оказалась хорошо известная «голубая» кембрийская (нижнекембрийская) глина, которая по многочисленным рекламным представлениям является не только универсальной целительницей, но и экстрасенсом.

Однако, если рассматривать нижнекембрийские глины по их вкладу и эффективности использования в различных отраслях хозяйства, то оказывается, что эти породы оказывают существенное влияние на социально-экономического развития региона [73].

При этом именно геологическая среда определила решение многих хозяйственных и социальных проблем на территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга.

1) В мощных пластах верхнепротерозойских и нижнекембрийских полиминеральных глин проходят тоннели метрополитена и канализационные коллекторы города. Горнотехнические и изолирующие свойства геологической среды позволяют сооружать крупные подземные выработки и вести их разработку щитовым методом. Метрополитен действует с 1955 года, и до настоящего времени его сеть расширяется.
2) Полиминеральные (в основном иллитовые) глины являются сырьевой базой для расширения в Ленинградской области производства строительных материалов – кирпича, керамического камня и труб, черепицы, кафеля и пр. Некоторые предприятия обеспечены сырьем до 100 и более лет. Наряду с модернизацией предприятий, таких, как завод керамического камня в г. Никольское вблизи Чекаловского месторождения нижнекембрийских глин (рис. 33), в области расширяется их сырьевая база, разведка и добыча (месторождение «Толмачевское» в Лужском районе, «Красный Латыш» в 4 км к северо-востоку от п. Рябово, «Копорское» в Ломоносовском районе в 4 км к западу от п. Копорье и т.д.).
3) Кембрийские глины обладают превосходными для лепки пластичными свойствами, а после вакуумирования легко принимают любую форму, не разрушаясь. Эти свойства позволяют широко использовать глины для изделий народного промысла, малых скульптурных форм, изготовления пластилина.

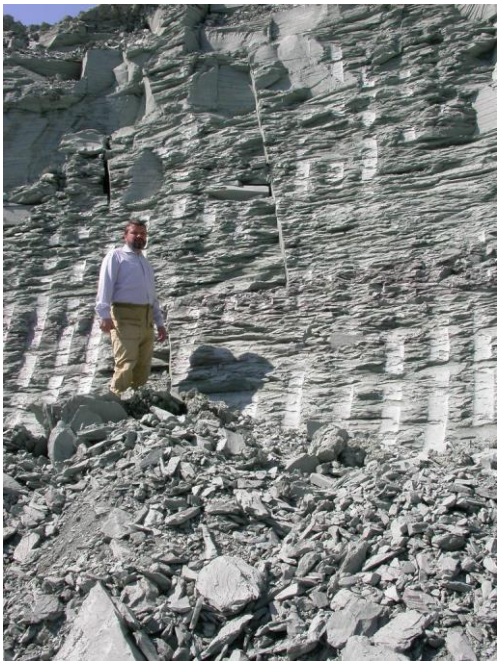


**Рис. 33.** Открытые разработки нижнекембрийских глин Чекаловского месторождения вблизи г. Никольское.
Источники: верхняя фотография - http:www.panoramio.com/photo/20650278; нижняя – [260].

4) В нижнекембрийских иллит-каолинит-хлоритовых глинах с 1970 г. функционирует полигон обезвреживания и захоронения промышленных токсических отходов – ГУПП «Красный Бор», расположенный в 4,5 км к юго-востоку от г. Колпино и 30 км от Санкт-Петербурга. За годы эксплуатации на полигон было вывезено около 2 миллионов тонн отходов. До настоящего времени он остается единственным действующим объектом захоронения промотходов на Северо–Западе [74].
5) Пласты водоупорных нижнекембрийских (лонтоваских) и верхнепротерозойских (котлинских) глин гидравлически полностью изолировали напорный ломоносовско-воронковский водоносный горизонт, обеспечив надежное водоснабжение крупной территории западной части Ленинградской области и приграничных районов Эстонии [75].
6) В течение последних 25 лет ведущие научные и проектные организации Санкт-Петербурга – Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, ОАО ГИ «ВНИПИЭТ», Институт геоэкологии РАН (Санкт-Петербургское отделение) – обосновывают безопасность подземной изоляции РАО в мощных пластах полиминеральных глин Ленинградской области [15–17, 22]. Изоляционно-барьерные свойства иллитовых глин нижнего протерозоя и верхнего кембрия соответствуют требованиям геологических критериев выбора площадок. Создание регионального ПЗРО в значительной степени разрешит сложную проблему РАО в регионе [76].

Можно уверенно прогнозировать расширение использования глин в самых различных отраслях производства. Развитие новых технологий и научно-технических направлений может вскрыть еще неизвестные возможности наноминералов глинистых формаций.

Естественно, что все перспективы теряют свой оптимистический настрой в отдаленном будущем, когда человечеству придется решать проблемы глобального изменения климата. К сожалению, единого научно обоснованного долгосрочного климатического прогноза до настоящего времени нет. Высказана «большая озабоченность продолжающимися антропогенными воздействиями на глобальный климат» Межправительственной группой экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change). За «усилия по сбору, анализу и распространению огромного объема информации о влиянии человека на изменения климата на Земле и обоснования тех мер, которые необходимы для противодействия таким изменениям» Межправительственной группе и бывшему вице-президенту США А. Гору была присуждена Нобелевская премия мира.

Расширение круга специалистов, анализирующих проблему глобального потепления, существенно изменило представленное заключение экспертов. Было показано, что

- изменение климата в течение тысячелетий и сотен тысяч лет всегда являлось естественным циклическим событием;
- антропогенной температурной катастрофы на Земле в обозримом будущем в принципе быть не может.

Человек способен в отдельных регионах изменить в худшую сторону среду своего обитания, уничтожить растительность и животных, исчерпать из недр полезные ископаемые, отравить воздух. Однако человечеству, к счастью, еще не под силу

конкурировать с главным источником энергии, который приводит в действие климатическую систему нашей планеты. Этим источником является Солнце и другие астрономические факторы – положение и движение Земли вокруг Солнца, наклон оси вращения Земли к плоскости орбиты и др.

Более того, в ближайшие 50–100 лет следует ожидать глобального похолодания, со всеми негативными последствиями этого серьезного изменения климата [207, 210, 216] (глава 8). Человечеству следует принять предупредительные меры, чтобы избежать глобального продовольственного и энергетического кризиса.

Похолодание осложнит или сделает недоступными месторождения углеводородов в зоне Арктики, что крайне обострит проблему энергоснабжения за счет сжигания углеводородов. Очевидно, что решить проблему можно за счет увеличения доли атомной энергии, откуда вытекает необходимость строительства в России новых атомных электростанций.

Расширение всей сети предприятий ядерного топливного цикла требует принятия решений по исправлению состояния, сложившегося в стране с радиоактивными отходами. Необходимы радикальные меры по удалению РАО из сферы жизнеобитания человека.

Широко распространенные на территории России глинистые формации являются наиболее перспективной средой для безопасной и длительной изоляции радиоактивных отходов. Строительство ПЗРО в глинах может в полной мере решить проблему ликвидации поверхностных хранилищ и обеспечить нормальный процесс удаления новых эксплуатационных РАО.

Реализация первого проекта подземного хранилища должна быть осуществлена в Ленинградской области в пластах верхневендских или нижнекембрийских глин. Исключительно благоприятное геологическое и экономическое положение предлагаемых участков в полной мере оправдывают отнесение глинистых пород региона в положение национальных ресурсов [22].

Многолетние и всесторонние исследования выделили глинистые формации в число наиболее перспективных геологических сред для подземной изоляции радиоактивных отходов, но сохранили при этом нерешенными не только отдельные вопросы конкретных участков развития глинистых пород, но и крупные общенаучные проблемы. В частности, нет однозначного объяснения для скоротечного изменения напряженно-деформированного состояния водоупорных пластов и связанного с этим явлением увеличения проницаемости глин [46]. Не определены причины образования в глубокозалегающих осадочных толщах полигональной системы разрывов, затрагивающих исключительно тонкодисперсные малопроницаемые пласты глин и отсутствующие в перекрывающих и подстилающих породах другого состава и структуры [261, 262].

Гарантией решения существующих проблем является постоянно растущее внимание к глинистым формациям, к их уникальным изолирующим возможностям формирования бассейнов подземных вод и залежей углеводородного сырья, увеличивающаяся потребность в самих глинах при растущей номенклатуре их использования в самых различных областях хозяйственной деятельности, и, наконец, возможность практически навечно изолировать в природной среде радиоактивные отходы, решив тем самым важнейшую задачу развития ядерного топливного цикла.

Литература


1. Фролов В.Т. Наука геология: философский анализ. М.: Изд-во МГУ. 2004. 128 с.
2. Rethinking High-level Radioactive Waste Disposal. Washington, D.C.: National Academy Press, 1990. 38 p.
3. Disposition of High-level Waste and Spent Nuclear Fuel., Washington, D.C.: National Academy Press. 2001. 198 p.
4. Шарафутдинов Р. Б., Строганов А. А., Левин А. Г. и др. Геолого-геохимические аспекты захоронения радиоактивных отходов // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. ВИНИТИ. 1999. Вып. 5. С. 2–87.
5. Максимов Е.М. О некоторых вопросах теоретической геологии // Изв. вузов. Геология и разведка. 1992. № 4. С. 153–156.
6. Буряковский Л.А., Джафаров И.С., Джеваншир Р.Д. Прогнозирование физических свойств коллекторов и покрышек нефти и газа. М.: Недра. 1982. 199 с.
7. Швецов П.Ф., Зильберброд А.Ф., Паперов М.М. Подземное пространство и его освоение. М.: Наука. 1992. 196 с.
8. Голубев В.М. Основы общей космодинамики геосферы и биосферы // Отечественная геология. 1992. № 9. С. 79–84.
9. Френкель М.Я. О термодинамике, динамике и математическом моделировании геохимических систем // Геохимия. 1992. № 10. С. 1401–1411.
10. Адушкин В. В., Локтев Д. Н., Спивак А. А. и др. Геодинамические факторы при обеспечении долговременной безопасности захоронения радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. 1996. № 3. С. 3–18.
11. Лисицын А.К. Экзогенные урановые месторождения – возможные места захоронения радиоактивных отходов // Литология и полезные ископаемые. 1994. № 6. С. 89–100.
12. Савоненков В.Г., Андерсон Е.Б., Бураков Б.Е. и др. Изучение природных аналогов для захоронения долгоживущих радиоактивных отходов // Вопр. радиац. безопасности. 1998. № 3. С. 23–34.
13. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-04. Федеральные нормы и правила. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2004. Введено с 05.01.2005 г.
14. Андерсон Е.Б., Савоненков В.Г., Шабалев С.И. Разработка геологической концепции и геологических критериев захоронения радиоактивных отходов в гранитоидных формациях (на примере Нижнеканского массива Енисейского кряжа): Препринт РИ-255 М.: ЦНИИатоминформ, 2000. 28 с.
15. Масленников И.А., Андерсон Е.Б., Савоненков В.Г. и др. Геологические факторы, определяющие безопасность ПЗРО в коренных отложениях глин Ленинградской области // V Международный ядерный форум. СПб.: НОУ ИДПО «Атомпроф». 2010. С. 193–199.
16. Сорокин В.Т., Демин А.В., Кащеев В.В. и др. Результаты предпроектной разработки вариантов создания пунктов окончательной изоляции РАО в Северо-Западном регионе РФ // Там же. С. 73–75.
17. Rumynin V.G., Sergeev E.M., Pankina E.B. et al. Geotechnical, Flow and Transport Properties of Kotlin (Vendian age) and Blue (Cambrian age) Clays With Respect to

Design of Underground Storage Facilities for Radioactive Waste Disposal in the North-West Region of Russia // Там же. С. 195–210.
18. Criteria for Underground Disposal of Solid Radioactive Wastes: IAEA Safety Ser. N 60. 1983.
19. Балукова В. Д.. Брежнева Н. Е., Жихарев М. И. и др. Основные направления работ по обращению с радиоактивными отходами в СССР: IAEA-CN-42/100. 1983. p. 167–180.
20. Принципы безопасности и технические критерии для подземного захоронения радиоактивных отходов высокого уровня активности. Серия безопасности МАГАТЭ № 99. 1990.
21. Савоненков В. Г., Кривохатский А. С. Локализация радиоактивных продуктов (отходов) в соляном куполе Азгир: Препринт РИ-235. М.: ЦНИИатоминформ, 1993. 48 с.
22. Кривохатский А.С., Дубровин В.С., Рогозин Ю.М. и др. О возможности создания хранилища радиоактивных отходов в залежах глин ленинградской области // Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики. Апатиты. 1995. Часть 3. С. 34–40.
23. Андерсон Е. Б., Савоненков В. Г., Любцева Е. Ф. и др. Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском гранитоидном массиве (Южно-Енисейский кряж) // Тр. Радиевого ин–та им. В.Г. Хлопина. 2006. Т. XI. С. 8–64.
24. Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А. и др. Вопросы безопасности подземного регионального могильника радиоактивных отходов на Кольском полуострове // Вестник МГТУ. 2006. Т. 9, № 3. С. 418–428.
25. Изоляция радиоактивных отходов в недрах Украины (Проблемы и возможные решения). Киев: НАН Украины. 2006.
26. Progress Towards Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand? An International Assessment NEA OECD. 1999. 27 p.
27. Concepts and Examples of Safety Analyses for Radioactive Waste Repositories in Continental Geological Formations: IAEA Safety Ser. N 58. 1983.
28. Шванов В. Н., Фролов В. Т., Сергеева Э. И. и др. Систематика и классификация осадочных пород и их аналогов. СПб.: Недра. 1998. 352 с.
29. Кашик С.А., Мазилов В.Н. Физико-химические модели новейших процессов выветривания. Новосибирск: Наука,. 1987. 93 с.
30. Фролов В.Т. Литология. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ. 1992. 336 с.
31. Хасанова А. Б., Щербина Н. С., Калмыков С. Н. и др. Сорбция Np(V), Pu(V) и Pu(IV) на коллоидных частицах оксидов и оксигидрооксидов Fe(III) и Mn(IV) // Радиохимия. 2007. Т. 49, № 4. С. 367-372.
32. Андерсон Е.Б., Рогозин Ю.М., Смирнова Е.А. и др. Влияние коллоидной составляющей в растворах на процессы поглощения актинидов [Am(III), Pu(IV)] стеклом и гранодиоритом из модельных грунтовых вод // Радиохимия. 2009. Т. 51, № 5. С. 473-480.
33. Новиков А.П., Калмыков С.Н., Мясоедов Б.Ф. и др. Связь радионуклидов с коллоидным веществом подземных вод в зоне Карачаевского ореола загрязнения // Вопр. Радиац. безопасности. 2009. № 1. С. 12-22.
34. Сауков А.А. Геохимия. М.: Наука. 1966. 487 с.
35. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. СПб.: Наука. 2005. 581 с.

36. Черников А.А. Природные сорбенты, их поисково-оценочное и экологическое значение // Изв. АН, сер. геол. 1992. № 3. С. 118–126.
37. Рыжаков В.Н. Дезактивация радиоактивных нефтешламов. СПб.: Недра. 2003. 280 с.
38. Кузнецов Ю.В., Легин В.К., Новиков А.П. и др. Изучение поведения радионуклидов, включая актиниды, в системе река Енисей – Карское море // Третья Российская конф. по радиохимии «Радиохимия-2000». Тез. Докл.. СПб., 28 ноября –1 декабря 2000 г. СПб.. 2000. С. 185–186.
39. Буршнева С.Г. Проблемы сохранности железных археологических предметов // Вестник молодых ученых. 2001. № 1. С. 74–79.
40. Дашко Р.Э., Еремеева А.А. Инженерно-геологические особенности коренных глин Санкт-Петербурга как среды для размещения подземных сооружений // Мат. междунар. Симпоз. «Инженерно-геологические проблемы урбанизации территорий». Екатеринбург: «Аква-Пресс». 2001. С. 675-682.
41. Рухин Л.Б. Основы литологии. Л.;–М.: Гостоптехиздат. 1961. 780 с.
42. Авидон В.П. Предварительные испытания глин в полевых условиях. М., Госгеолтехиздат.1963. 188 с.
43. Programme on the Underground Disposal of Radioactive Waste. IAEA Advisory Group Meet. AG 146. 1978.
44. Гаев А.Я., Щугорев В.Д., Бутолин А.П. Подземные резервуары: Условия строительства, освоения и технология эксплуатации. Л.: Недра. 1986. 223 с.
45. Кирюхин В. А., Толстихин Н.И. Региональная гидрогеология. М.: Недра. 1987. 383 с.
46. Вартанян Г.С., Гольдберг В.М. Влияние изменчивости проницаемости глин и напряженного состояния пород на условия закрытости водоносных систем // Отечественная геология. 1996. № 8. С. 43-47.
47. СНиП 2.01.28-85: Полигоны по обезвреживанию и захоронению промышленных отходов. Основные положения по проектированию. М.: ЦИТП Госстрой СССР. 1985. 16 с.
48. Грунтоведение / Под ред. Е. М. Сергеева. М.: Изд-во МГУ. 1983. 389 с.
49. Кирсанов Н.В., Ратеев М.А., Сабитов А.А. и др. Генетические типы и закономерности распространения месторождений бентонитов в СССР. М.: Недра. 1981. 214 с.
50. ВСН 126-90: Крепление выработок набрызг-бетоном и анкерами при строительстве транспортных тоннелей и метрополитена. Нормы проектирования и строительных работ.
51. Амфлет Ч. Неорганические иониты. М.: Мир. 1966. 188 с.
52. Ступин Д.Ю. Загрязнение почв и новейшие технологии их восстановления: Учеб. пособие. СПб.: Лань. 2009. 432 с.
53. Мачабели Г.А., Мерабишвили М.С., Квирикадзе Г.А. Генезис, геолого-экономическая и технологическая оценка месторождений бентонитов СССР. Тбилиси: Изд-во Мецниереба. 1981. 305 с.
54. Бетехтин А. Г. Минералогия. М.: Госгеолиздат. 1950. 956 с.
55. Штрюбель Г., Циммер З. Минералогический словарь / Под ред. и с предисл. Д.А. Минеева и Т.Б. Здорик. Пер. с нем. М.: Недра. 1987. 494 с.
56. Петров В.П. Каолиновые месторождения СССР // Каолиновые месторождения и их генезис. М., 1968. С. 7–12.
57. Эмсли Дж. Элементы: Пер. с англ. М.: Мир. 1993. 256 с.

58. Сырьевая база бентонитов СССР и их использование в народном хозяйстве. М.: Недра. 1972. 288 с.
59. Роква М.Л., Мачабели Г.А., Мерабишвили М.С. Поиски, разведка и оценка месторождений бентонитовых глин. М.: Недра. 1971. 75 с.
60. Андреева О.В. Бентонитовые глины Приаргунья, их генезис и возможность использования при захоронении высокоактивных отходов // Докл. РАН. 1992. Т. 326, № 4. С. 683-687.
61. Харлашин А.П., Шатков Н.Г., Уткина Н.Е. Первая находка бентонитов на северо-западе России // Разведка и охрана недр. 1998. № 7–8. С. 23–26.
62. Справочник физических констант горных пород / Под ред. С. Кларка., М.: Мир. 1969. 546 с.
63. Сапрыкин Е.П., Василенко Г.П., Мездрич Б.М. Миграция элементов в искусственном термоградиентном поле // Геохимия. 1976. № 10. С. 1570-1576.
64. Селин А.А., Малов Н.Д., Ефимов А.С. Региональная концепция стабилизации и развития минерально-сырьевого комплекса Северо-Запада // Разведка и охрана недр. 1998. № 7-8. С. 77–78.
65. ООО Компания Бентонит. Месторождения. http://www.bentonit.ru/ru/ production/deposits/
66. Мерабишвили М.С. Бентонитовые глины. Тбилиси. Мецниереба. 1970. 308 с.
67. Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste: IAEA Tech. Rep. Ser. N 319. 1990.
68. Performance of Engineered Barriers in Deep Geological Repositories: IAEA Tech. Rep. Ser. N 342. 1992.
69. Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. Т. 3 Листовые силикаты. Пер. с англ. под ред. и с предисл. В.П.Петрова. М.: Мир. 1966. 318 с.
70. Винчелл А.Н. и Винчелл Г. Оптическая минералогия. М.: Изд-во иностранной литературы. 1953. 561 с.
71. Петтиджон Ф.Дж. Осадочные породы. / Под ред. И.М.Симанович. М.: Недра. 1981. 751 с.
72. Подземное захоронение токсичных твердых промышленных отходов: Докл. Временной научно-технической комиссии Междуведомственного научно-технического совета по комплексным проблемам охраны окружающей природной среды и рациональному использованию природных ресурсов. М.: ГКНТ. 1976.
73. Проскуряков В.В., Николаев Ю.В., Стуккей Г.А. и др. Геологическая среда Ленинградской области и Санкт-Петербурга и её значение в решении хозяйственных и социальных проблем // Разведка и охрана недр. 1998. № 7-8. С. 21-23.
74. Елдина Е.В. Способы переработки и утилизации токсичных отходов на полигоне «Красный Бор» // Зап. СПб. Горного ин–та. 2005. Т.159, ч.1. С.40-42.
75. Миронова А.В., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Трансграничные проблемы при эксплуатации подземных вод в районе государственной границы Россия-Эстония (на примере ломоносовско-воронковского водоносного горизонта) // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33, № 4. С. 1-10.
76. Протокол координационного совещания по итогам выполнения работ по проекту ТАСИС R4.05/04 «Концепция и программа создания хранилища для ко-

роткоживущих отходов низкой и средней активности в Ленинградской области» (LRP-1). СПб.: Филиал СЗТО ФГУП «РосРАО», 5 июня 2009 г.
77. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Third Worldwide Review. Ed: P.A.Witherspoon, G.S. Bodvarsson. USA Berkeley National Laboratory. 2001. 335 p.
78. PAGIS- Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste. Summary., Luxembourg: CEC, 1988. 268 p.
79. Collard G., Andre-Jehan R., Bonne A. et al. The Hades Project: an Underground Demonstration Facility for the Disposal of High-level Waste in Plastic Clay // Radioactive Waste Management and Disposal. Ed. L.Cecille. Elsevier Applied Science, 1991. p. 418-436.
80. Mobbs S., Bonne A., Dalrymple G.J. et al. Assessment of Radioactive Waste Disposal in Clay. Ibidem. p. 636-650.
81. Volckaert G., Gautschi A. Field Tracer Experiment in Clays // Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration. NEA/EC GEOTRAP Workshop. 1996. p. 95-106.
82. Соколова И.Д., Шульга Н.А. Разработка и реализация технологий окончательного захоронения высокоактивных и долгоживущих отходов. Ч. 1. Подземные исследовательские лаборатории // Атом. техника за рубежом. 2004. № 5. С. 12-19.
83. Bonne A., Collard G., Marivoet J. et al. SCK/CEN's Integrated R&D and DT&E Program on Final Nuclear Waste Disposal in Argillaceous Formations // Proc. Int. Conf. "Waste Management'92", Tucson, Arizona, USA, March 1–5, 1992, vol. 1. p. 153–159.
84. Van Geet M., De Grean M., Maes N. et al. R&D Programme in Belgium Clay. R&D studies on Boom Clay. // Матер. Российско-бельгийского совещания по синим глинам, Презентация докладов представителей Центра ядерных исследований Бельгии (SCK/CEN, г. Мол). СПб., ВНИПИЭТ. 2004.
85. Neerdael B., Boyazis J. P. The Belgium Underground Research Facility: Status on the Demonstration Issue for Radioactive Waste Disposal in Clay /. Nucl. Eng. Design. 1997 vol. 176. p. 89–96.
86. Bernier F., Demarche M., Bel J. The Belgian Demonstration Programme for the Disposal of High-Level and Long-Lived Radioactive Waste // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2006. vol. 932. p. 103–110.
87. De Craen M. The Boom Clay Geochemistry: Natural Evidence / Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2006. vol. 932. p. 1033-1040.
88. Ringrose P., Bonne A., Peaudecerf P. et al. Geoforecasting: Assessing the Long-Term Evolution of Geological Confinement Systems // Radioactive Waste Management and Disposal. Ed. L.Cecille. Elsevier Applied Science, 1991. p. 472-487.
89. Ouzounian G., Londe L., Mayer S. et al. Feasibility Study of a Deep Geological Repository in France Dossier 2005 // Tucson, Arizona, USA. Proc. Int. Conf. "Waste Management'07", February 25 – March 1, 2007. CD-ROM.
90. Plas F., Wendling J. The Geological Research in France – The Dossier 2005 Argile // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2007. vol. 985. p. 493-504.
91. Gaussen J.-L. Geological Repository Layout for Radioactive High-Level Long-Lived Waste in Argilite // Proc. Intern. Conf. "Waste Management'06". Tucson, Arizona, USA, February 26 – March 2, 2006. CD-ROM.

92. Landais P., Lebon P., Ouzounian G. French Geological Repository Project for High-Level and Long-Lived Waste: Scientific Programme // Proc. Int. Conf. “Waste Management’08”. Phoenix, Arizona, USA. February 24–28, 2008. CD-ROM.
93. Ouzounian G., Labalett T., Hoorelbeke J. M. et al. The French Programme. A Development Plan for a Geological Repository for High-Level and Long-Lived Waste // Proc. Int. Conf. “Waste Management’08”. Phoenix, Arizona, USA, February 24–28, 2008. CD-ROM.
94. Ozanam O., Hoorelbeke J.-M., Ouzounian G. Progress of the Graphite and Radium-bearing Waste disposal Projection in France // Proc. Int. Conf. “Global’09’’. Paris, France, 2009. p. 736-743.
95. Соколова И.Д., Шульга Н.А. Стратегии в области обращения с радиоактивными отходами и вывода из эксплуатации ядерных объектов в Великобритании // Атомная техника за рубежом. 2008. № 7. С. 3-14.
96. Benvegnu F., Brondi A., Polizzano C. Natural Analogues and Evidence of Long-term Isolation Capacity of Clays Occurring in Italy // CEC, EUR 11896 EN. Luxembourg, 1989. 101 p.
97. Hoth P., Wirth H., Reinhold K. et al. Investigation and Evaluation of Argillaceous Rock Formation. Berlin: Hannover, BGR. April 2007. 120 p.
98. Малышев А.Б., Агапов А.М., Гупало Т.А. Окончательная изоляция - важнейшее звено единой системы обращения с РАО в Российской Федерации // Безопасность окружающей среды. 2007. № 4. С. 117-120.
99. Козырев Д.В., Прозоров Л.Б., Прокопова О.А. и др. Перспективы использования площадок ФГУП «РосРАО» // Безопасность окружающей среды. 2009. № 3. С. 74-77.
100. Коновалов В.Ю. Разработка предложений по категоризации объектов «наследия» с позиции окончательной изоляции заключенных в них РАО // Ядерная и радиационная безопасность России. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. Вып. 4, часть 2. С. 62-72.
101. Евстратов Е.В., Агапов А.М., Дьяков С.В. и др. О проекте Федерального закона «Об обращении с радиоактивными отходами» // Ядерная и радиационная безопасность России. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ». 2008. Вып. 4, часть 1. С. 18-27.
102. Зоммер В.П., Лавренович А.Е. Проблемы выбора площадки для размещения подземной атомной станции // Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики. Апатиты, 1995. Часть 2. С. 61-75.
103. Anderson E.B., Savonenkov V.G., Shabalev S.I. Radioactive Waste Isolation in Salt Formations // “DisTec’98”. Hamburg, Germany, 1998. p. 284-289.
104. Скороспелкин С.А. Геотектоническое развитие и перспективы алмазоносности северной части Восточно-Европейской платформы // Геология и геофизика. 1992. № 10. С. 72-83.
105. Гарбар Д.И., Головизнин С.А., Трофимов О.В. Геодинамика зоны сочленения Балтийского щита и Русской платформы // Советская геология. 1992. № 7. С.42-50.
106. Кабаков Л.Г., Скопенко Н.Ф. Оценка геодинамического состояния территории Ленинградской области // Разведка и охрана недр. 1998. № 7-8. С. 32-35..
107. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Объяснительная записка. Лист О-(35), 36 – Ленинград. Л.: 1989. 212 с.

108. Геология СССР. Т. 1. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Полезные ископаемые. М.: Недра. 1975. 326 с.
109. Технические предложения по созданию региональной системы обращения с радиоактивными отходами. Ленинградское Высшее военно-инженерное строительное училище им. А.Н.Комаровского. Книги I-III. 1992 г.
110. Тихонов М.Н., Муратов О.Э. Регион повышенной радиационной опасности / Атомная стратегия XXI. 2005. № 3. С. 14-16.
111. Харлашин А.П., Шатков Н.Г., Уткина Н.Е. Первая находка бентонитов на северо-западе России // Разведка и охрана недр. 1998. № 7-8. С. 23-27.
112. Калесник С.В. Очерки гляциологии. М.: Географгиз. 1963. 551 с.
113. Серебряный Л.Р. Древнее оледенение и жизнь. М.: Наука. 1980. 127 с.
114. Прокопенко А.А., Карабанов Е.Б., Кузьмин М.И. и др. Причины раннего оледенения Сибири при переходе от Казанцевского климатического оптимума к Зыряновскому ледниковому периоду // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 1-2. С. 64-75.
115. Еремеева А.А. Инженерно-геологическая и геоэкологическая оценка условий захоронения промышленных отходов в нижнекембрийских глинах Ленинградской области: Дис. … канд. геол.-мин. наук. СПб. Гос. горный ин-т им. Г.В.Плеханова, 2002 г.
116. Последний ледниковый покров на северо-западе Европейской части СССР. М.: Наука. 1969. 220 с.
117. Дронов А.В. Балтийско-Ладожский глинт. // Санкт-петербургский университет. 2002. № 2-3. С. 16-17. Journal.spbu.ru/2002/03/16.html.
118. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Исследование влияния физико-химических условий и температур на начальный градиент и режим фильтрации в глинах // Водные ресурсы. 1981. № 6. С. 110-119.
119. Зекцер И.С. Естественные ресурсы пресных подземных вод Прибалтики. М.: Недра. 1968. 105 с.
120. Грейсер Е.Л., Иванова Н.Г. Пресные подземные воды: состояние и перспективы водоснабжения населенных пунктов и промышленных объектов // Разведка и охрана недр. 2005. Вып.№ 5. С. 36-42.
121. Яхнин Э.Я., Томилин А.М., Шелемотов А.С. Оценка качества и химический состав подземных вод дочетвертичных отложений ленинградской области // Разведка и охрана недр. 2005. Вып. № 5. С. 42-48.
122. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты (г. Сосновый Бор Ленинградской области)// Под ред. В.Г.Румынина. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та. 2003. 248 с.
123. Воронов А.Н., Барвиш М.В., Шварц А.А. Особенности микрокомпонентного состава подземных вод нижнекотлинского горизонта // Разведка и охрана недр. 1998. № 7-8. С. 40-41.
124. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Ленинградской области в 2008 году. Государственный доклад Управления Роспотребсоюза по Ленинградской области Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.
125. Гидрогеология СССР. Т.3: Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Под. ред. И.К.Зайцева. М.: Недра. 1967. 328 с.

126. Ядута В.А. Новейшие современные движения земной коры в Санкт-Петербурге и их роль в геологической опасности // Геологи–300-летию Санкт-Петербурга. СПб. 2003. С. 113-124.
127. Хаустов В.В., Савоненков В.Г. К вопросу учета планетарной дегазации в процессе выбора площадки для длительной изоляции РАО // Вест. СПбГУ. Сер.7. 2009. Вып. 4. С. 8-19.
128. Рухина Е.В. О предчетвертичных долинах северо-западной части Русской платформы и их геологическое значение // Труды Ленинградского о-ва естествоиспытателей. Отделение геологии и минералогии. 1957. Т.69, вып. 2.
129. Дашко Р.Э. Инженерно-геологическая и геоэкологическая оценка нижнекембрийских синих глин как среды размещения радиоактивных отходов // Геоэкология. 2006. № 3. С. 235-241.
130. Макаров В.И., Щукин Ю.К. О сейсмотектонике Заонежского полуострова (Карелия) и некоторых общих вопросах новейшей геодинамики области сочленения Балтийского щита и Русской платформы // Матер. Конф. «Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов». КГУ, Петрозаводск: 2007. С. 33-39.
131. Панасенко Г.Д. Сейсмичность восточной части Балтийского щита / Сейсмичность и современные движения земной коры восточной части Балтийского щита. Апатиты, 1980. С. 7-24.
132. Никонов А.А. Макросейсмическая характеристика землетрясений XX века в восточной части Балтийского щита // Белорусский сейсмический бюлл. Минск: ОНТИ. 1992. Вып. 2. С. 96-144.
133. Сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Карта на 4 листах. Масштаб 1:8 000 000. Гл. ред. В.Н.Страхов, В.Н.Уломов. М., 2000.
134. Медведев Н.И. Модель колебаний блоков земной коры после землетрясений // Геология и геофизика. 1986. № 4. С. 76-83.
135. Беклемишев А.Б., Буданов В.Г., Верба М.Л. и др. Изучение активных внутренних разломов земной коры с целью снижения экологических угроз // Разведка и охрана недр. 1998. № 7-8. С. 70-71.
136. Перельман А.И. Геохимия природных вод М.: Наука. 1982. 154 с.
137. Прияткин А.А., Поляков Е.Е. Петрофизические методы исследования горных пород. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 113 с.
138. Шабалин Л.И. Роль пористости и проницаемости пород в формировании метасоматической зональности // Изв. вузов. Геология и разведка. 1992. № 4. С. 62-65.
139. Панкина Е.Б., Румынин В.Г., Никуленков А.М. и др. Анизотропия глин при диффузионном переносе радионуклидов // Радиохимия. 2010. т. 52, № 6. С. 532-538.
140. Simon R. The Qualification of Waste Forms and Engineered Barriers // Radioactive Waste Management and Disposal Ed. L.Cecille. 1990. p. 159-182.
141. Atabek R., Billon A., Brodersen K. et al. Characteristics of the Buffer Materials and Radionuclide Behavior in Cementitious and Clay Barriers // Ibid. p. 364-377.
142. Андерсон Е.Б., Савоненков В.Г., Шабалев С.И. Перспективы создания подземных могильников РАО в нижнекембрийских глинах Ленинградской области // Тр. Радиевого ин-та им.В.Г.Хлопина. 2006. Т.XI. С. 105-132.
143. Сабодина М.Н., Калмыков С.Н., Артемьева К.А. и др. Закономерности поведения радионуклидов при использовании глинистых пород в качестве матери-

ала защитного барьера в хранилищах РАО // Пятая Рос. Конф. по радиохимии. «Радиохимия-2006»: Тез. докл. Озерск: ФГУП «ПО «Маяк». 2006. С. 269-270.
144. Румынин В.Г., Мироненко В.А., Воронина А.В. Оценка наблюдаемого и потенциального воздействия северо-западного центра атомной энергетики на качество подземных вод // Разведка и охрана недр. 1998. № 7-8. С. 65-70.
145. Легин Е.К., Хохлов М.Л., Трифонов Ю.И. и др. Перенос $^{89}Sr$ через компактные образцы кембрийской глины и бентонита //.Шестая Рос. Конф. по радиохимии. Тез. докл. М: 2009. С. 323-324.
146. Андерсон Е.Б., Савоненков В.Г., Шабалев С.И. Геологические формации Северо-Западного региона, перспективные для выбора площадок окончательной изоляции радиоактивных отходов // IV Междунар. ядерный форум. СПб.: НОУ ИДПО «АТОМПРОФ», 2009. С. 21–26.
147. Проблема размещения радиоактивных отходов в геологические формации ленинградского региона: Препринт РИ-230 // Под ред. д.х.н. А.С.Кривохатского. М.: ЦНИИатоминформ, 1991. 26 с.
148. Решетов В.В., Громов Ю.А., Кривохатский А.С. и др. Технико-экономическое обоснование строительства пункта захоронения РАО и объектов, загрязненных в результате чернобыльской аварии. Фонды ВНИПИЭТ, 1993.
149. Якушев М.Ф., Мартынов Е.М. Выбор типа и варианта размещения регионального хранилища для окончательного захоронения радиоактивных отходов на Северо-Западе России // Экология и атомная энергетика. Сосновый Бор: Изд-во ЛАЭС. 1999. вып. 2.
150. Сафутин В.Д., Сорокин В.Т. Вопросы создания регионального пункта захоронения радиоактивных отходов в «синих» глинах на территории Ленинградской области // Безопасность ядерных технологий. Обращение с радиоактивными отходами: VII Междунар. конф. СПб: 2004. С. 407-408.
151. Румынин В.Г., Токарев И.В., Переверзева С.А. и др. Изучение вендских и кембрийских глин как среды для строительства регионального хранилища радиоактивных отходов в Северо-Западном регионе РФ // II Междунар. ядерный форум. СПб.: ФГОУ «ГРОТЦ» 2007. С. 298-305.
152. Обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом. Состояние выполнения ФЦП «Обращение с радиоактивными отходами и отработавшими ядерными материалами, их утилизация и захоронение на 1996-2005 годы»: Информационно-аналитический сб. ЦНИИатоминформ. М. 2000. 104 с.
153. Сорокин В.Т., Калинкин В.И., Демин А.В. Основные положения концепции создания региональных центров по обращению с радиоактивными отходами в Северо-Западном регионе Российской Федерации. // IX Междунар. конф. «Атомтранс-2006». СПб. 2006. С. 172-178.
154. Сорокин В.Т., Демин А.В., Шафрова Н.П. и др. Концепция создания регионального центра обращения с радиоактивными отходами в Ленинградской области. // II Междунар. ядерный форум. СПб.: ФГОУ «ГРОТЦ» 2007. С. 334-335.
155. Демин А.В., Сорокин В.Т., Шидловская Т.В. и др. Концепция создания регионального могильника кондиционированных РАО низкого и среднего уровня активности в Северо-Западном регионе // III Международный ядерный форум, СПб.: НОУ ИДПО «Атомпроф». 2008. С. 52-54.

156. Сорокин В.Т., Рыбальченко И.Л., Демин А.В. и др. Концепция регионального центра обращения с РАО // Безопасность окружающей среды. 2009. № 1. С. 68-71.
157. Региональный объект окончательной изоляции низко и среднеактивных РАО в Ленинградской области на базе филиала СЗТО ФГУП «РосРАО». СПб: Филиал «Северо-Западный территориальный округ «ФГУП «РосРАО». 2009.
158. Создание пункта захоронения низко- и среднеактивных РАО в Ленинградской области. СПб: Филиал «Северо-западный территориальный округ «ФГУП «РосРАО», исполнитель Суханов И.А. 2010.
159. Шафрова Н.П., Сорокин В.Т., Демин А.В. и др. Научно-практические вопросы создания регионального пункта захоронения радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности в районе размещения Ленинградского отделения филиала «Северо-Западный территориальный округ «ФГУП «РосРАО» // V Международный ядерный форум, СПб.: НОУ ИДПО «Атомпроф», 2010. С. 182-187.
160. Комлев В.Н., Бичук Н.И., Зайцев В.Г. Тенденции интеграции и потенциал Мурманской области в проблеме изоляции радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. 2000. № 4. С. 5-16.
161. Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А. и др. Научное обоснование подземного размещения ядерных и радиационно-опасных объектов в геологических формациях европейского Севера России // Тр. Конф. к 75-летию Кольского научно центра РАН. Апатиты. 2006.
162. Саркисов А.А. Проблемы реализации интеграционного подхода к обращению с радиоактивными отходами в Северо-Западном регионе России и окончательной их изоляции // 22-е Пленарное Заседание Контактной Экспертной Группы МАГАТЭ. Париж, 24-26 сентября 2008 г.
163. Государственная геологическая карта Российской федерации. Масштаб 1: 1 000 000 (третье поколение). Лист Q-37 – Архангельск. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2005. 203 с.
164. Отчет о НИР «Анализ существующей транспортно-технологической схемы обращения с РАО и разработка предложений по рационализации размещения элементов её структуры в Северо–Западном, Центральном и Сибирском регионах (заключительный). 2009. Фонды РИ, инв. № 3403-И.
165. Сабанаев К.А., Черкашин В.И. Олигоцен-нижнемиоценовый комплекс – мощный резерв нефтедобычи в восточном Предкавказье // Вестник Дагестанского научного центра. 2009. № 35. С. 5-10.
166. Крылов А.Я. Изотопные методы в морской геологии. М.: Энергоатомиздат, 1984. 120 с.
167. Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. М.: Недра, 1981. 143 с.
168. Солодкий Н.Ф., Шариков А.С., Погребенков В.М. Минерально-сырьевая база Урала для керамической, огнеупорной и стекольной промышленности: Справочное пособие / Под. ред. проф. Г.Н.Масленниковой. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. 332 с.
169. Гуман О.М. Эколого-геологические условия полигонов твердых бытовых отходов Среднего Урала. Автореф. дис. на соиск. уч. степени док. геол.-мин. наук. ГОУ ВПО «Уральский гос. горный ун–т», 2008. 42 с.

170. Алой А.С., Кузнецов Б.С., Кузнецов Ю.В. и др. Кондиционирование радиоактивных отходов путём включения в керамические матрицы на основе глин // Атом. энергия. 1995. Т. 78, вып. 5. С. 305-311
171. Site Investigations for Repositories for Solid Radioactive Wastes in Deep Continental Geological Formations: IAEA Tech. Rep. Ser. N 215. 1982.
172. Performance Assessment for Underground Radioactive Waste Disposal Sistems: IAEA Safety Ser. N 68. 1985.
173. Techniques for Site Investigation for Underground Disposal of Radioactive Wastes: IAEA Tech. Rep. Ser. N 256. 1985.
174. Бартон Н., Юфин С.А. Перспективы развития численных методов для геомеханического обеспечения проектов сооружения ядерной технологии / Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики. Апатиты, 1995. Часть 2. С. 45-60.
175. Кривохатский А.С., Рогозин Ю.М., Савоненков В.Г. Радиохимические проблемы создания подземных хранилищ радиоактивных отходов и подземных атомных станций / Там же, часть 3. С. 27-33.
176. Основные этические и экологические вопросы долгосрочного обращения с радиоактивными отходами // Атом. техника за рубежом. 1996. № 5. С. 19-24.
177. Гонсалес Абель Х. Безопасное обращение с радиоактивными отходами // Бюл. МАГАТЭ 2000. Т 42, № 3. С . 5-18.
178. Кедровский О.Л. Безопасная изоляция радиоактивных отходов от биосферы // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. ВИНИТИ, 2001. № 1. С. 27-31.
179. Масуда С., Умэки Х., Найто М. Надежность захоронения отходов высокой удельной активности в подземные хранилища глубокого заложения в Японии // Атом. техника за рубежом. 2001. № 2. С. 21-30.
180. Международный прогресс в геологических захоронениях. // Атом. техника за рубежом. 2005. № 9. С. 32-34.
181. Аренс В.Ж., Гайдин А.М. Геолого-гидрогеологические основы геотехнологических методов добычи полезных ископаемых. М.: Недра. 1982. 136 с.
182. Сущенко Д.К., Гупало В.С., Коновалов В.Ю. Информационное обеспечение создания сети объектов окончательной изоляции РАО исторического наследия // Ядерная и радиационная безопасность России. 2008. Вып.4, часть 2. С.100-112.
183. Волкова Е.В. Анализ чувствительности численной модели переноса $^{90}Sr$ для площадки старых хранилищ РНЦ «Курчатовский институт» // Атом. энергия. 2009. Т. 106, вып. 4. С. 224-229.
184. Гупало Т.А., Спешилов С.Л., Третьяков А.А. и др. Использование комплекса подземных сооружений Красноярского горно-химического комбината в качестве действующей лаборатории для обоснования безопасности проектируемого хранилища РАО на Нижнеканском гранитоидном массиве / Хранение и переработка отработавшего ядерного топлива в новой концепции развития завода РТ-2: Материалы КНТС / С-Пб. 2004. С. 130-145.
185. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Publication 26. Ann. ICRP N 3. 1977.
186. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. РД 03-418-01. М.: Госгортехнадзор России. 2001.

187. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Р 2.1.10.1920-04. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора России. 2004.
188. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И. и др. Анализ риска по данным радиоэкологического мониторинга // Атомная энергия. 2009. Т. 106, вып. 6. С. 332-338.
189. Geological Disposal of Radioactive Wastes Produced by Nuclear Power. EUR 21224. Luxembourg, 2004. 42 p.
190. Маккинли Я., Кавамура Ч. Гибкое хранилище XXI века // Барьер безопасности. 2005. № 3-4. С.72-76.
191. Беккер К. Причины, следствия и терапия синдрома радиофобии // Атомная техника за рубежом. 2005. № 4. С. 31-34.
192. Проект норм безопасности для геологического удаления ядерных отходов // Ядерная и радиационная безопасность России. Информационный бюллетень. 2002. Вып. 2 (5). С. 121-125.
193. Savage D. The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste. Chichester: Wiley. 1996. 437 p.
194. Directives adopted: no Option but Geologic Disposal // Nuclear News. 2003. Vol.46, N 13. p. 74-75.
195. Горский А.А., Звонова И.А. Критерии допустимого // Барьер безопасности. 2005. № 3-4. С. 82-85.
196. Сергеев В.И., Степанова Н.Ю. Защита подземных вод // Радиационная безопасность. 2007. № 4. С. 62.
197. Пузанов Ю.В. О теории безопасности // Барьер безопасности. 2005. № 3-4. С. 86-87.
198. Scientific and Technical Basis for Geological Disposal of Radioactive Wastes: IAEA Tech. Rep. Ser. N 413. 2003.
199. De Preter P., Marivoet J., Minon J.P. Deep Radioactive Waste Repository in the Boom Clay: the Long Term Safety Functions and Robust Safety Indicators // Proc. Meet. of Radioactive Waste Management Commitment on the Future Environment. ENS Topseal'99, 1999. Antwerp, Belgium. p. 231-236.
200. Miller B. Natural Safety Indicators and Their Application to Repository Safety Cases. IAEA-TECDOC-1282, 2002. p. 97-102.
201. Лобанов Н.Ф., Гупало Т.А. Научные подходы к оценке безопасности объектов окончательной изоляции РАО // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. № 1. С. 35-40.
202. Natural Analogues in Performance Assessment for the Disposal of Long Lived Radioactive wastes: IAEA Tech. Rep. Ser. N 304. 1989.
203. Natural Analogue in Radioactive Waste Disposal. Proc: Int. Symp. Luxembourg: CEC. 1987.
204. Anderson E.B., Karelin A.I., Krivochatsky A.S. et al. Forecasting the Space-Time Stability of Radioactive Waste Isolation in Salt Formations // Proc. Third Int. Conf. Las Vegas, USA. 1992. p. 2114-2121.
205. Глобальные изменения природной среды и климата: Избр. науч. тр. под общ. ред. Н.П.Лаверова. М.: Министерство науки и технологии РФ; 1997. 433 с.
206. Догановский А.М., Малинин В.Н. Гидросфера Земли / Под ред. д-ра физ-мат. наук проф. Л.Н.Калина.- СПб.: Гидрометеоиздат. 2004. 630 с.
207. Флинт Р.Ф. История Земли. М.: Прогресс. 1978. 355 с.

208. Хаин В.Е., Балуховский А.И. Историческая геотектоника. Мезозой и кайнозой. М.: Авиар. 1993. 452 с.
209. Милановский Е.Е. Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии): Учебник. М.: Изд-во МГУ. 1996. 448 с.
210. Berry B.L. Regularities of Natural Cycles, Predictions of Climate and Surface Conditions. // Hydrol. Process. 1998. Vol. 12, p. 2267-2278.
211. Лукина Н.В. Нижнеканский гранитоидный массив: новейшие и современные тектонические движения, морфология и кинематика активных разломов и мегатрещин, современное поле напряжений. Возможности безопасного захоронения ВАО // Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: Материалы КНТС. СПб.: 1999. С. 49-59.
212. Nuclear Regulatory Commission. Code of Federal Regulation. Title 10, Energy Part 60. Disposal of High-level Radioactive Waste in Geological Repositories // Federal Register. 1983. Vol. 48, N 120.
213. В.А.Зуев, М.Б. Букаты, Е.В.Зуева. Анализ результатов полевых гидрогеологических исследований в междуречье Большого и Малого Итатов (Красноярский край, Нижнеканский гранитоидный массив): Научный отчет по полевым работам 1990 г. Томск-Железногорск: КГПИИ «ВНИПИЭТ»; ЗАО «Гея; Эколого-гидрогеологическое предприятие «Ноосфера». 2000.
214. Davis P.A., Avadhanula M.R., Canclo D. et al. BIOMOVS II: An International Test of the Performance of Environmental Transfer Models // J. Environ. Radioact., 1998. Vol. 42, N 2-3. p. 117-130.
215. Бери Б.Л. Управление климатом, его прошлое и будущее // «Холод'ОК». 2008. № 1(6). С. 72-78.
216. Абдусамитов Х.И. Солнце диктует климат Земли. СПб.: Logos, 2009. 197 с.
217. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.
218. Летников Ф.А. Об одном из возможных источников тепловой энергии эндогенных процессов // Доклады РАН. 2004. Т.398. С. 792-794.
219. Калиберда И.В., Левин А.Г., Мурлис Д.В. и др. Внешние воздействия природного происхождения на глубинные захоронения долгоживущих радиоактивных отходов // Атом. техника за рубежом. 2003. № 2. С. 3-7.
220. Зейлик Б.С. Продолжение тяжелой космогенной бомбардировки Земли в фанерозое – реальность // Доклапды РАН. 1992. Т. 324, № 5. С. 1059-1063.
221. Hazards Due to Comets and Asteroids // Ed. T.Gehrels. Tucson: Univ. of Arizona. Press, 1994. 1300 p.
222. Natural Analogue Working Group. First Meeting. Brussels, 1985. Rep. EUR-10315, CEC, Luxembourg, 1986.
223. Duerden P., Golian C., Nightingale T. et al. Alligator rivers analogue project. Rep. EUR-11037. Luxembourg: CEC, 1987.
224. Japan-Russia Experts Meet. on Radioactive Waste Management: Japan Atomic Industrial Forum – Ministry of the Russian Federation of Atomic Energy. Text of Presentations. Tokyo. 1998.
225. Лисицын А.К. Экзогенные урановые месторождения – возможные места захоронения радиоактивных отходов // Литология и полезные ископаемые. 1994. № 6. С. 89-99.
226. Челищев Н.Ф. Ионообменные свойства минералов. М.: Наука. 1973. 204 с.

227. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении. // Кол. авторов под рук. проф. В.А.Логачева. М.: ИздАТ, 2001. 519 с.
228. The Oklo Phenomen. IAEA, 1975. 649 p.
229. Петров Ю.В., Назаров А.И., Онегин М.С. и др. Нейтронно-физические расчеты свежей зоны природного реактора Окло // Атом. энергия. 2005. Т. 98, вып. 4. С. 306-316.
230. Loss R.D., Rosman K.J.R., De Lacter J.R. et al. Fission-Product Retentivity in Peripheral Rocks at the Oklo Natural Fission Reactors, Gabon // Chem. Geol. 1989. V.76, N 1. p. 71-84.
231. Кузнецов В.В. Природные ядерные реакторы в Габоне // Атом. техника за рубежом. 1994. № 5. С. 25-27.
232. Тарханов А.В., Ветров В.И., Абросимов А.А. и др. Распределение мировых запасов урана // Отечественная геология. 1996. № 11. С. 3-10.
233. Рогозин Ю.М., Брызгалова Р.В., Смирнова Е.А. и др. Радиохимические аспекты обоснования локализации радионуклидов при захоронении РАО в глубокозалегающие гранитоиды Нижнеканского массива // Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: Матер. КНТС СПб.: 1999. С. 91-101.
234. Hydrogeological Investigation of Sites for the Geological Disposal of Radioactive Waste: IAEA Tech. Rep. Series N 391. 1999.
235. Establishing Confidence in the Safety of Deep Disposal // Nucl. Eng. Int.. August 2002. p. 42-44.
236. Смирнов В.И. Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений. М.: Изд-во МГУ. 1954. 546 с.
237. Валлнер М., Мругалла З., Хаммер Й. и др. Требования к разведке мест для захоронения ВАО в скальной горной породе (АСТЕР). GRS, BRG, DBEtec. 2005.
238. Щеглов А.Д. О некоторых вопросах нелинейной геологии / Региональная геология и металлогения. 1995. № 4. С. 5-16.
239. Паркин Р.А., Каневский М.Ф., Савельева Е.А. и др. Пространственно-временная геостатистика на примере данных радиоэкологического мониторинга // Инженерная геология. 2005. № 1. С. 18-32.
240. Оценка безопасности приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов. РБ-011-2000. Руководство по безопасности. Госатомнадзор России. Введено с 01.03.2001 г.
241. Филатова В.Т. Количественные оценки параметров раннепротерозойского плюм-литосферного взаимодействия в северо-восточной части Балтийского щита // Доклады РАН. 2004. Т. 395, № 5. С. 685-689.
242. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмические процессы в блоковой среде. М.: Наука. 1991. 96 с.
243. Панасенко Г.Д. Сейсмические особенности северо-востока Балтийского щита. Л.: Наука. 1969. 184 с.
244. Никонов А.А. Палеосейсмологический подход при сейсмическом районировании и оценка сейсмической опасности // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1995. Вып. 2-3. С. 46-62.
245. Шарафутдинов Р.Б., Талицкая А.В., Рунова Ю.В. и др. Долгосрочный прогноз миграции радионуклидов из хранилища твердых радиоактивных отходов Си-

бирского химического комбината // Атом. энергия. 2007. Т. 103, вып. 2. С. 134-136.
246. Мартьянов В.В., Шевцова Е.В., Склифосовская Ю.Г. Миграция радионуклидов цезия в различных глинистых отложениях // Безопасность окружающей среды. 2007. № 4. С. 50-55.
247. Николаев А.В. Проблемы геотомографии // Проблемы геотомографии. М.: Наука. 1997. С. 4-38.
248. Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод СНиП 2.06.14-85. Дата введения 1986.
249. Федеральный закон от 10 июля 2001 г. N 92-ФЗ «О специальных экологических программах реабилитации радиационно загрязненных участков территорий» (с изменениями от 30 декабря 2008 г.).
250. Petersen S.W., Morse J.G., Truex M.J. et al. Treatability Test Plan for Deep Vadose Zone Remediation at the Hanford Site's Central Plateau // Proc. Int. Conf. "Waste Management'08", Phoenix, Arizona, USA. February 24–28, 2008. Abstract # 8204.
251. Короткевич В.М., Зубков А.А., Козырев А.С. и др. Консервация открытых хранилищ среднеактивных отходов РХЗ // Мат. 6 научно-технической конф. Сибирского химического комбината (в 3-х частях). Часть 3. Северск: СТИ ТПУ, 2001. С. 73-78.
252. Обливанцев Д.Ю. Технология создания экономически безопасных хранилищ радиоактивных отходов с использованием барьера из глин. // Мат.VI Междунар. конф. «Новые идеи в науках о земле». М.: МГГРУ. 2003. С. 104.
253. Бернс Р.Е., Стедуэл М.И. Удаление радиоактивных отходов в Хенфорде // Атомная техника за рубежом. 1957. № 4. С. 61-67.
254. Thompson K. M., Petersen S. W., Fruchter J. S, et al. Supplemental Groundwater Remediation Technologies to Protect the Columbia River at Hanford, WA // Proc. Intern. Conf. "Waste Management'07". Tucson, Arizona, USA. February 25–March 1, 2007. CD-ROM.
255. Разворотнева Л.И., Гилинская Л.Г., Маркевич Т.И. Модифицированные природные сорбенты как поглотители радионуклидов // Электронный научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» 2009. № 1(27).
256. Wellman D.M., Pierce E.M., Richards E.L. et al. Uranium Plume Treatability Demonstration at the Hanford Site 300 Area: Development of Polyphosphate Remediation Technology for In Situ Stabilization of Uranium – 8070 // Proc. Int. Conf. "Waste Management'08". Phenix, Arizona, USA. February 24–28, 2008. Sec. 27, N 6.
257. Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л. Обстановки морфолитогенеза в прибрежной зоне Мирового океана. М: Наука. 2007. 455 с.
258. Природа Ленинградской области и её охрана / Составители Т.И.Миронова, Э.А. Слепян. Л.: Лениздат. 1983. 277 с.
259. Климатическая карта // Учебный географический атлас Ленинградской области и Санкт-Петербурга. СПб.: ВСЕГЕИ. 1997.
260. Румынин В.Г. Параметрические и модельные обоснования строительства ПЗРО в вендских глинах // Росийско-германский семинар по обращению с отходами низкого и среднего уровня активности. СПб., 14-15 апреля 2011 г.
261. Henriet J.-P., De Batist M., Vershuren M. Early Fracturing of Paleogene Clays, Southernmost North Sea: Relevance to Mechanisms of Primary Hidrocarbon Migra-

tion // Generation, Accumulation and Production of Europe's Hydrocarbons Ed. A.M.Spencer. 1991. N 1. p. 217-227.
262. Гогоненко Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Геодинамика и нефтегазоносность структур горизонтального сдвига (на примере Западной Сибири) // Геодинамика нефтегазоносных бассейнов. М.: РГУ им. Губкина. 2005. С. 184-192.