

Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору

Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 марта 2021 г. № 101.

# Руководство по безопасности при использовании атомной энергии

## Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов. РБ-003-21

*Введено в действие с 19 марта 2021 г.*

*© Москва, 2021*

## Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов» (РБ-003-21)

Руководство по безопасности при использовании атомной энергии РБ-003-21 «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов» (утверждено приказом Ростехнадзора от 19.03.2021 № 101) (далее — Руководство по безопасности) разработано в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в целях содействия соблюдению требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения» (НП-058-14), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 5 августа 2014 г. № 347 (зарегистрирован Минюстом России 14 ноября 2014 г., регистрационный № 34701), федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (НП-055-14), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 августа 2014 г. № 379 (зарегистрирован Минюстом России 2 февраля 2015 г., регистрационный № 35819) и федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 июня 2017 г. № 218 (зарегистрирован Минюстом России 20 июля 2017 г., регистрационный № 47477).

Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору по проведению оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов, предназначенных для захоронения радиоактивных отходов 1 и 2 классов, в части:

- разработки основных положений оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов;
- сбора и подготовки исходных данных о характеристиках пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов и условиях их размещения;
- разработки и обоснования сценариев эволюции системы захоронения радиоактивных отходов;
- разработки и обоснования концептуальной модели системы захоронения радиоактивных отходов и математических моделей процессов, влияющих на долговременную безопасность пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов;
- разработки расчетной модели (моделей) процессов, влияющих на долговременную безопасность пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов, с использованием программ для электронных вычислительных машин;
- анализа результатов оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов.

При разработке настоящего Руководства по безопасности были учтены положения документов Международного агентства по атомной энергии и Агентства по ядерной энергии Организация экономического сотрудничества и развития, в том числе:

- МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности No. SSR-5, МАГАТЭ, Вена (2011);
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-14, IAEA, Vienna (2011);
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-23, IAEA, Vienna (2012);
- NUCLEAR ENERGY AGENCY, Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste: Outcomes of the NEA MeSA Initiative, OECD/NEA, Paris (2012);
- NUCLEAR ENERGY AGENCY, International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Version 3.0, NEA/RWM/R(2019)1, OECD/NEA, July 2019.

Руководство по безопасности предназначено для применения:

- национальным оператором по обращению с радиоактивными отходами;
- специализированными организациями, выполняющими работы и (или) предоставляющими услуги национальному оператору по обращению с радиоактивными отходами по размещению, проектированию, эксплуатации и закрытию пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов;
- специалистами Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, осуществляющими лицензирование деятельности по размещению, проектированию, сооружению, эксплуатации и закрытию пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов и надзор за указанными видами деятельности.

Выпускается впервые.

Руководство по безопасности разработано коллективом авторов в составе: А. В. Понизов, Д. В. Мурлис, Р. Б. Шарафутдинов, П.М. Верещагин, А. С. Мишагина, К.А. Лебедкин (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), Е. Г. Кудрявцев, А. Ю. Аникин (Ростехнадзор), Е. А. Савельева-Трофимова, И. В. Капырин (ИБРАЭ РАН).

При разработке учтены замечания и предложения Центрального МТУ по надзору за ЯРБ Ростехнадзора, ФГУП «НО РАО», ИБРАЭ РАН, АО «ВНИПИпромтехнологии», АО «РАОПРОЕКТ» и др.

# Оглавление

I. Общие положения .....	6
II. Рекомендации по оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов .....	8
III. Рекомендации по разработке основных положений оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов .....	9
IV. Сбор и подготовка исходных данных о характеристиках пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов и условиях их размещения .....	14
V. Разработка и обоснование сценариев эволюции системы захоронения радиоактивных отходов .....	18
VI. Разработка и обоснование концептуальной модели системы захоронения радиоактивных отходов .....	22
VII. Разработка математических моделей процессов, влияющих на долговременную безопасность пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов .....	24
VIII. Разработка расчетных моделей пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов с использованием программ для электронных вычислительных машин .....	27
IX. Анализ результатов оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов. Анализ неопределенностей и чувствительности .....	30
Приложение № 1 .....	32
Перечень сокращений .....	32
Приложение № 2 .....	33
Блок-схема итерационного подхода к оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов .....	33
Приложение № 3 .....	34
Перечень событий, явлений и факторов, учитываемых при оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов .....	34
Приложение № 4 .....	41
Примеры математических моделей радиационного воздействия пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов на население .....	41
Приложение № 5 .....	46
Перечень исходных данных и параметров, учитываемых в расчетных моделях пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов .....	46
Приложение № 6 .....	49
Блок-схема разработки расчетной модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов .....	49
Приложение № 7 .....	50

Пример выполнения прогнозного расчета оценки долговременной безопасности пункта  
глубинного захоронения радиоактивных отходов .....50

## I. Общие положения

---

1. Настоящее руководство по безопасности «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов» (РБ-003-21) (далее – Руководство по безопасности) разработано в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в целях содействия соблюдению требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения» (НП-058-14), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 5 августа 2014 г. № 347 (зарегистрирован Минюстом России 14 ноября 2014 г., регистрационный № 34701), федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (НП-055-14), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 августа 2014 г. № 379 (зарегистрирован Минюстом России 2 февраля 2015 г., регистрационный № 35819) и федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 июня 2017 г. № 218 (зарегистрирован Минюстом России 20 июля 2017 г., регистрационный № 47477).

2. Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору по проведению оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов, предназначенных для захоронения радиоактивных отходов 1 и 2 классов, в части:

- разработки основных положений оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов;
- сбора и подготовки исходных данных о характеристиках пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов и условиях их размещения;
- разработки и обоснования сценариев эволюции системы захоронения радиоактивных отходов (далее — сценарии);
- разработки и обоснования концептуальной модели системы захоронения радиоактивных отходов и математических моделей процессов, влияющих на долговременную безопасность пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов;
- разработки расчетной модели (моделей) процессов, влияющих на долговременную безопасность пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (далее — расчетная модель), с использованием программ для электронных вычислительных машин;
- анализа результатов оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов.

3. Настоящее Руководство по безопасности предназначено для применения:

- национальным оператором по обращению с радиоактивными отходами;
- специализированными организациями, выполняющими работы и (или) предоставляющими услуги национальному оператору по обращению с радиоактивными отходами

по размещению, проектированию, эксплуатации и закрытию пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов;

- специалистами Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, осуществляющими лицензирование деятельности по размещению, проектированию, сооружению, эксплуатации и закрытию пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов и надзор за указанными видами деятельности.

4. Оценку долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов рекомендуется выполнять с целью подтверждения способности системы захоронения радиоактивных отходов ограничивать радиационное воздействие пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов на население и окружающую среду пределами, установленными санитарными правилами и нормами радиационной безопасности, с учетом всех значимых событий, явлений и факторов, влияющих на выход радионуклидов из пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов и их перенос в окружающей среде, в том числе с учетом цепочек радиоактивных превращений.

5. При проведении оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов рекомендуется выполнять прогнозные расчеты миграции радионуклидов в системе захоронения радиоактивных отходов и окружающей среде (биосфере) и радиационного воздействия пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов на население, а также прогнозы развития процессов и явлений, учитываемых в различных сценариях (далее — прогнозные расчеты).

6. Перечень сокращений, использованных в настоящем Руководстве по безопасности, приведен в приложении № 1.

## II. Рекомендации по оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов

---

7. Оценку долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется выполнять с использованием итерационного подхода, блок-схема которого приведена в приложении № 2 к настоящему Руководству по безопасности.

8. При проведении оценки долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется выделять следующие основные этапы:

- разработка основных положений оценки долговременной безопасности ПГЗРО;
- сбор и подготовка исходных данных о характеристиках ПГЗРО и условиях его размещения, полученных в том числе в ПИЛ, предназначенной для проведения исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО;
- разработка и обоснование сценариев, включая анализ определяющих их событий, явлений, процессов и факторов;
- разработка и обоснование концептуальной модели системы захоронения РАО и математических моделей процессов, влияющих на долговременную безопасность ПГЗРО;
- разработка расчетной модели (моделей) и их реализация с помощью программ для ЭВМ;
- анализ результатов оценки долговременной безопасности ПГЗРО с учетом анализа чувствительности расчетной модели и неопределенностей сценариев, расчетной модели и расчетных параметров.



### III. Рекомендации по разработке основных положений оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов

---

9. При выполнении оценки долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется определять:

- цели оценки долговременной безопасности ПГЗРО, которые зависят от этапа жизненного цикла ПГЗРО, и используемые подходы к оценке долговременной безопасности ПГЗРО;
- критерии долговременной безопасности ПГЗРО и искомые параметры (результаты прогнозных расчетов);
- критические группы населения;
- временные периоды, важные для разработки сценариев и выполнения прогнозных расчетов.

10. Оценку долговременной безопасности ПГЗРО при разработке предпроектной документации (ДОН, ОБИН) ПГЗРО и ООБ на этапе размещения ПГЗРО рекомендуется выполнять с целью:

- обоснования концепции захоронения РАО, в том числе выбора типа вмещающих пород, конфигурации ячеек захоронения РАО и примерного состава инженерных барьеров безопасности ПГЗРО;
- обоснования основных технических, технологических и организационных решений по захоронению РАО и обеспечению долговременной безопасности ПГЗРО;
- обоснования выбора площадки размещения ПГЗРО из числа альтернативных вариантов;
- обоснования принятых принципов и критериев обеспечения долговременной безопасности ПГЗРО;
- оценки влияния учитываемых природных и техногенных воздействий и условий размещения ПГЗРО на долговременную безопасность ПГЗРО;
- обоснования концептуальных положений по закрытию ПГЗРО;
- обоснования концептуальных положений по проведению радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО после закрытия ПГЗРО.

11. Оценку долговременной безопасности ПГЗРО при разработке проектной документации ПГЗРО и ООБ на этапе сооружения ПГЗРО рекомендуется выполнять с целью:

- обоснования технических, технологических и организационных решений проектируемого ПГЗРО;
- обоснования пределов и условий безопасной эксплуатации ПГЗРО, эксплуатационных пределов и условий;

- обоснования критериев приемлемости РАО для захоронения в данном ПГЗРО, а также допустимой суммарной активности и допустимого количества (объема) РАО, захораниваемых в ПГЗРО;
- обоснования технических и организационных решений по размещению упаковок РАО в ячейках ПГЗРО и их консервации;
- обоснования состава, защитных, прочностных и изолирующих свойств естественных и инженерных барьеров безопасности ПГЗРО;
- обоснования решений по мониторингу системы захоронения РАО, включающего системные наблюдения и контроль за состоянием барьеров безопасности и компонентов окружающей среды (атмосферы, почв, поверхностных и подземных вод, растительного и животного мира);
- оценки влияния процессов, происходящих в подземных конструкциях и инженерных барьерах безопасности ПГЗРО, включая упаковки РАО, на долговременную безопасность ПГЗРО;
- обоснования концепции закрытия ПГЗРО.

12. Оценку долговременной безопасности ПГЗРО при разработке эксплуатационной документации ПГЗРО и ООБ на этапе эксплуатации ПГЗРО рекомендуется выполнять с целью:

- обоснования текущего уровня безопасности ПГЗРО с учетом фактического состояния естественных барьеров безопасности (вмещающих и (или) несущих горных пород), подземных сооружений ПГЗРО, инженерных барьеров безопасности и данных мониторинга;
- разработки и обоснования проекта реконструкции и модернизации эксплуатируемого ПГЗРО и его отдельных систем (элементов);
- обоснования внесения изменений в проектную документацию ПГЗРО, влияющих на долговременную безопасность ПГЗРО;
- уточнения критериев приемлемости РАО для захоронения в данном ПГЗРО, а также допустимой суммарной активности и допустимого количества (объема) РАО, захораниваемых в ПГЗРО;
- оптимизации системы радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО и окружающей среды;
- разработки программы закрытия ПГЗРО.

13. Оценку долговременной безопасности ПГЗРО при разработке проекта закрытия ПГЗРО и ООБ на этапе закрытия ПГЗРО рекомендуется выполнять с целью:

- подтверждения долговременной безопасности закрываемого (закрытого) ПГЗРО с учетом данных мониторинга и фактических данных о количественном и качественном составе РАО, состоянии упаковок РАО, инженерных и естественных барьеров безопасности, подземных сооружений ПГЗРО;
- разработки и обоснования программы проведения периодического радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО, предусматриваемого после закрытия ПГЗРО.

14. В зависимости от этапа жизненного цикла ПГЗРО оценку долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется выполнять на основе консервативного или реалистичного подходов или их комбинации.

15. При использовании консервативного подхода к оценке долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется в сценариях и расчетной модели в качестве исходных данных и расчетных параметров использовать данные (в пределах допустимых диапазонов их значений), а также допущения, предположения и граничные условия, заведомо приводящие к наиболее неблагоприятным результатам, то есть в предположении максимального радиационного воздействия ПГЗРО на критическую группу населения.

16. При использовании реалистичного подхода к оценке долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется в сценариях и расчетной модели в качестве исходных данных и расчетных параметров использовать характеристики ПГЗРО и условий площадки и района его размещения, граничные условия там, где это возможно, подтвержденные исследованиями, в том числе в ПИЛ, научно обоснованные допущения и предположения.

17. При использовании консервативного подхода к оценке долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется использовать детерминистический подход, при котором параметрам расчетной модели из диапазонов их возможных значений присваиваются фиксированные значения, при которых по результатам прогнозных расчетов радиационное воздействие ПГЗРО на население и окружающую среду будет наибольшим.

18. При использовании реалистичного подхода к оценке долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется выполнять многовариантные расчеты, позволяющие учитывать статистическую природу параметров расчетной модели.

С целью определения статистических характеристик результатов расчетной модели (среднее, стандартное отклонение, толерантный интервал) рекомендуется выполнять статистическую обработку результатов многовариантных расчетов.

19. Оценку долговременной безопасности ПГЗРО на этапе размещения рекомендуется выполнять на основе консервативного подхода.

При последующих итерациях оценки долговременной безопасности ПГЗРО (на этапах сооружения, эксплуатации и закрытия) в зависимости от полноты полученных исходных данных, изученности условий размещения ПГЗРО и процессов, влияющих на долговременную безопасность ПГЗРО, рекомендуется уменьшать степень консерватизма оценки долговременной безопасности в пользу получения более реалистичных результатов путем использования в расчетной модели значений параметров, подтвержденных экспериментально.

20. Оценку долговременной безопасности ПГЗРО на этапе после закрытия рекомендуется выполнять периодически с целью подтверждения долговременной безопасности ПГЗРО с учетом результатов мониторинга системы захоронения РАО.

21. При оценке радиационного воздействия закрытого ПГЗРО на население рекомендуется в качестве основных критериев долговременной безопасности ПГЗРО использовать нормативы, установленные санитарными правилами и нормами радиационной безопасности, в том числе:

- основные пределы доз;
- допустимые уровни радиационного воздействия;
- граничные значения обобщенного риска;

- допустимые значения удельных активностей радионуклидов в объектах окружающей среды (почва, подземные и поверхностные воды, атмосфера).

22. С целью непревышения допустимого уровня радиационного воздействия на население, которое может подвергаться облучению одновременно от нескольких ПЗРО, находящихся в районе размещения ПЗРО, рекомендуется устанавливать квоты для величин индивидуальной эффективной дозы облучения критической группы населения. Сумма квот от различных ПЗРО, включая ПЗРО, не должна превышать допустимой годовой эффективной дозы облучения критической группы населения за счет РАО после их захоронения.

23. В качестве конечных результатов оценки долговременной безопасности ПЗРО рекомендуется принимать значения искомых величин, которые подлежат сравнению с установленными критериями долговременной безопасности ПЗРО (удельные активности радионуклидов в подземных водах, годовая эффективная доза и риск облучения населения).

24. Критическую группу населения, которая может подвергнуться наибольшему радиационному воздействию от ПЗРО в отдаленном будущем, рекомендуется определять в соответствии с санитарными правилами и нормами радиационной безопасности с учетом условий формирования дозы облучения по всем возможным путям радиационного воздействия (с учетом внешнего и внутреннего облучения) для каждого сценария.

25. Критическую группу населения рекомендуется выбирать с учетом демографических условий размещения ПЗРО, в том числе расположения населенных пунктов, численности, плотности размещения и половозрастной структуры населения, особенностей образа жизни и рациона питания, структуры природопользования, водопотребления и водоснабжения, типичных для данной местности биоценозов.

26. Если для сценария характерно несколько путей облучения населения, обусловленных различными путями переноса и поступления радионуклидов в окружающую среду, рекомендуется рассматривать несколько критических групп населения, соответствующих каждому пути облучения, и выполнять для них прогнозные расчеты радиационного воздействия. Вывод об обеспечении долговременной безопасности ПЗРО по данному сценарию следует делать для той критической группы населения, которая подвергается наибольшему радиационному воздействию из рассматриваемых путей облучения.

27. Для сценариев непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения РАО рекомендуется определять группу лиц, однородную по условиям профессиональной деятельности (например, работники, выполняющие буровые работы на площадке закрытого ПЗРО), которая осуществляет вторжение в систему захоронения РАО и подвергается облучению от РАО, извлеченных из ПЗРО.

28. С целью разработки сценариев и проведения прогнозных расчетов рекомендуется определять основные временные периоды оценки долговременной безопасности ПЗРО:

- период административного контроля ПЗРО, то есть срок, установленный в проекте ПЗРО, в течение которого эксплуатирующей организацией или иной уполномоченной организацией осуществляется периодический радиационный контроль и мониторинг системы захоронения РАО (период активного административного контроля) и сохраняются знания о ПЗРО (период пассивного административного контроля);
- расчетный период, то есть период времени, для которого выполняется прогнозный расчет оценки долговременной безопасности ПЗРО.

29. В период административного контроля ПГЗРО доступ населения на территорию закрытого ПГЗРО ограничен и контролируется, однако возможно проживание населения на прилегающих к площадке ПГЗРО территориях, ведение строительной, сельскохозяйственной и иной промышленной деятельности, ограниченной определенными условиями.

После окончания периода административного контроля предполагается неограниченный доступ человека на территорию закрытого ПГЗРО, возможно непреднамеренное вторжение человека в систему захоронения РАО.

30. Расчетный период рекомендуется ограничивать сроком, для которого результаты прогнозных расчетов показывают, что уровень радиационного воздействия ПГЗРО на население достигает максимального значения и далее уже не может возрастать.

31. При установлении расчетного периода рекомендуется удостовериться в том, что после его завершения все значимые события, явления и факторы, в том числе миграция радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде с учетом цепочек радиоактивных превращений, влияющие на радиационное воздействие на население и окружающую среду, не приведут к превышению пределов, установленных санитарными правилами и нормами радиационной безопасности.

## IV. Сбор и подготовка исходных данных о характеристиках пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов и условиях их размещения

---

32. В целях подготовки исходных данных для оценки долговременной безопасности ПГЗРО и проведения прогнозных расчетов рекомендуется использовать следующую информацию:

характеристики площадки ПГЗРО и района его размещения:

- географическое положение, административное расположение, границы площадки ПГЗРО, границы СЗЗ ПГЗРО и ЗН (при наличии), границы земельного отвода и горного отвода (при наличии);
- топографические условия, в том числе характеристики рельефа площадки размещения и уклонов в сторону водоемов, наличие природных и искусственных объектов;
- геологическое строение площадки ПГЗРО и района его размещения;
- гидрометеорологические условия (экстремальные и средние значения температуры и влажности воздуха, количество и интенсивность атмосферных осадков, скорость ветра, наибольшая высота снежного покрова и глубина промерзания почвы);
- гидрологические, геоморфологические, гидрогеологические, сеймотектонические, сейсмические и инженерно-геологические условия;
- близость особо опасных объектов по взрыво- и пожароопасности;
- сведения об опасных процессах, явлениях и факторах природного и техногенного происхождения, выявленных в районе и на площадке размещения ПГЗРО и учитываемых в проекте ПГЗРО и (или) способных оказать влияние на безопасность ПГЗРО, степень их опасности и класс площадки;
- сводная таблица внешних воздействий на ПГЗРО;
- информация о мониторинге состояния недр (геологической среды) в районе размещения и на площадке ПГЗРО;
- оценка изменения геолого-тектонических, геодинамических, сейсмических, геологических, гидрологических, гидрогеологических, климатических условий и характеристик района и площадки размещения ПГЗРО в геологическом масштабе времени;

информация о населении, проживающем в районе размещения ПГЗРО:

- информация о населенных пунктах, близлежащих к СЗЗ ПГЗРО и находящихся в ЗН (при наличии);
- медико-демографические характеристики района размещения ПГЗРО (численность и плотность населения в районе размещения ПГЗРО, условия проживания населения и перспективы развития района размещения ПГЗРО, занятость, пространственное размещение и динамика роста или убыли населения, факторы, влияющие на социально-экономические условия жизни населения в результате реализации планируемой деятельности);

- информация о распределении населения в районе размещения ПГЗРО;
- информация о наличии территорий с особыми условиями пользования, включая особо охраняемые природные территории и объекты, объекты историко-культурного наследия, СЗЗ промышленных объектов и производств, водоохраные зоны, зоны охраны источников питьевого водоснабжения;
- информация о земле- и водопользовании, информация о дебетах (объемах) водопотребления и источниках водоснабжения на питьевые, хозяйственно-бытовые и производственные нужды, использовании природных ресурсов, данные о рационе питания населения, данные о доле местных продуктов питания в рационе, данные о продолжительности пребывания населения на открытой местности;

характеристики окружающей среды:

- фоновые показатели загрязнения окружающей среды (атмосферного воздуха, поверхностных вод и донных отложений, подземных вод, почв (грунтов), результаты радиационного обследования площадки ПГЗРО и района его размещения);
- данные о типах и подтипах почв, их площадном распространении, физико-химических свойствах, хозяйственном использовании земель, оценка мощности плодородного слоя;
- характеристика естественной растительности и агрофитоценозов (видовой состав, виды, занесенные в Красные книги, их местонахождение), имеющиеся негативные факторы воздействия на растительность;
- данные по видовому составу объектов животного мира, ареалам обитания и плотности популяций (с выделением охотничьих видов и видов, занесенных в Красные книги), информация о миграционных видах животных и путях их миграции, рыбохозяйственные характеристики водных объектов;

инженерная часть ПГЗРО:

- описание сооружений ПГЗРО, предназначенных для захоронения РАО, и соответствующего оборудования, предназначенного для захоронения РАО;
- описание систем (элементов), важных для безопасности ПГЗРО;
- описание подземных конструкций ПГЗРО, в том числе ячеек захоронения РАО, их внутренней компоновки;
- описание барьеров безопасности, в том числе буферных материалов и материалов засыпки, и соответствующих конструкционных материалов (используемые материалы, показатели надежности, срок эксплуатации);
- прогноз изменения со временем защитных, задерживающих и изолирующих характеристик инженерных барьеров безопасности;

вмещающие и (или) несущие породы:

- геолого-тектонические, геодинамические, гидрогеологические, гидрологические, сейсмотектонические и инженерно-геологические условия;
- прогноз изменения со временем состояния естественных барьеров безопасности;

сведения о РАО и упаковках РАО:

- критерии приемлемости РАО для захоронения в данный ПГЗРО;
- номенклатура захороненных РАО (происхождение, класс, вид, состав, основные химические, физические и радиационные характеристики, радионуклидный состав, суммарная и удельная активность радионуклидов, уровень тепловыделения и газообразования);
- максимальная проектная мощность (вместимость) ПГЗРО (по объему и по общей активности РАО для каждого класса РАО);
- номенклатура и характеристики контейнеров и упаковок РАО, в том числе массогабаритные параметры, конструкция, конструкционные материалы;
- прогноз изменения со временем характеристик упаковок РАО.

33. В зависимости от этапа жизненного цикла ПГЗРО в качестве источников исходных данных для проведения оценки долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется использовать:

при разработке ДОН, ОБИН строительства ПГЗРО:

- фондовые, справочные и литературные данные;
- материалы рекогносцировочного обследования местности;
- данные существующих сетей мониторинга;
- спецификации и сертификаты на оборудование, изделия и материалы;
- результаты исследований площадки и района размещения ПГЗРО, в том числе инженерных изысканий;
- данные экспериментальных исследований защитных, задерживающих, прочностных и изолирующих свойств аналогичных материалов инженерных барьеров безопасности ПГЗРО;
- данные о закономерностях миграции радионуклидов, полученные при изучении природных аналогов, таких как рудные месторождения, содержащие природные радионуклиды;

на этапе размещения ПГЗРО:

- материалы ДОН, ОБИН строительства ПГЗРО;
- задание на проектирование ПГЗРО;
- результаты выполненных инженерных изысканий, НИР и ОКР;
- результаты исследований, проведенных в ПИЛ, в объеме, достаточном для обоснования выбора площадки размещения ПГЗРО;

на этапе сооружения ПГЗРО:

- проектная документация на строительство ПГЗРО;
- задание на проектирование ПГЗРО;
- результаты выполненных инженерных изысканий, НИР и ОКР;
- результаты исследований, проведенных в ПИЛ, в объеме, достаточном для обоснования долговременной безопасности ПГЗРО;



на этапе эксплуатации ПГЗРО:

- материалы проектной и эксплуатационной документации ПГЗРО;
- результаты выполненных инженерных изысканий, НИР и ОКР;
- результаты исследований, проведенных в ПИЛ, в объеме, достаточном для подтверждения долговременной безопасности ПГЗРО;
- результаты мониторинга ПГЗРО, в том числе состояния барьеров безопасности;
- результаты радиационного контроля, включающего наблюдения за распространением радионуклидов в окружающей среде, в том числе данные о фактической радиационной обстановке;
- результаты расследования и учета нарушений;

на этапе закрытия ПГЗРО:

- материалы проектной и эксплуатационной документации ПГЗРО;
- результаты выполненных инженерных изысканий, НИР и ОКР;
- результаты исследований, проведенных в ПИЛ, в объеме, достаточном для подтверждения долговременной безопасности ПГЗРО;
- результаты мониторинга и радиационного контроля ПГЗРО;
- результаты комплексного инженерного и радиационного обследования ПГЗРО;
- результаты анализа ядерной безопасности ПГЗРО для периода после закрытия ПГЗРО;
- проектная документация на закрытие ПГЗРО;
- результаты заключительного обследования закрытого ПГЗРО.

34. Объем исходных данных, необходимых для выполнения количественных прогнозных расчетов, рекомендуется уточнять с учетом информации о выявляемых событиях, явлениях и факторах, влияющих на долговременную безопасность ПГЗРО, а также по мере получения новых или уточненных сведений о характеристиках барьеров безопасности ПГЗРО и изменении их свойств во времени.

С учетом актуализированных исходных данных рекомендуется уточнять результаты оценки долговременной безопасности ПГЗРО.

## V. Разработка и обоснование сценариев эволюции системы захоронения радиоактивных отходов

---

35. На основании исходных данных о характеристиках ПГЗРО и условиях его размещения рекомендуется разрабатывать сценарии, представляющие собой возможные последовательности логически связанных и упорядоченных во времени событий, явлений и факторов, а также процессов, происходящих в системе захоронения РАО.

36. В сценариях рекомендуется учитывать:

- свойства (условия, характеристики, особенности) ПГЗРО, площадки и района его размещения, влияющие на долговременную безопасность ПГЗРО, которые описываются качественными или количественными значениями;
- внешние воздействия природного и техногенного происхождения, свойственные району размещения и площадке ПГЗРО;
- процессы, определяющие миграцию радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде, в том числе выход радионуклидов из компаундов (матричных материалов с включенными в них РАО) и упаковок РАО;
- факторы, которые могут прямо или косвенно влиять на миграцию радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде;
- возможные пути миграции радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде;
- исходные события, учитываемые при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО, установленные федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии;
- механизмы облучения критической группы населения.

37. Перечень событий, явлений и факторов, учитываемых при оценке долговременной безопасности ПГЗРО, приведен в приложении № 3 к настоящему Руководству по безопасности.

38. На основании анализа возможности реализации в системе захоронения РАО событий, явлений и факторов, приведенных в перечне событий, явлений и факторов, учитываемых при оценке долговременной безопасности ПГЗРО, рекомендуется в сценарии включать те события, явления и факторы, которые индивидуально или в сочетании с другими будут оказывать влияние на долговременную безопасность ПГЗРО.

39. В сценарии рекомендуется не включать события, явления и факторы, если:

- они не имеют отношения к системе захоронения РАО или не могут проявляться в ее данном воплощении (нерелевантные);
- они не реализуются в течение расчетного периода (крайне редкие или практически невозможные);
- эффект в результате их реализации отсутствует либо незначителен (несущественные).

40. Обоснование учета (неучета) в сценариях событий, явлений и факторов рекомендуется выполнять качественно и (или) количественно, основываясь на результатах специализированных

прогнозных оценок и (или) исследований, выполненных в том числе в ПИЛ. В рамках консервативного подхода допускается использовать экспертный метод, основанный на анализе и формализации мнений квалифицированных специалистов (экспертов), их знании характеристик ПГЗРО и условий его размещения, возможных состояний системы захоронения РАО и ее эволюции в предполагаемых условиях, а также имеющегося опыта.

41. В зависимости от частоты реализации учитываемых событий, явлений и факторов рекомендуется разрабатывать сценарии следующих типов:

- сценарий нормальной эволюции (наиболее вероятный сценарий), то есть последовательность наиболее вероятных событий, явлений и факторов, в том числе процессов, влияющих на долговременную безопасность ПГЗРО;
- альтернативные сценарии, то есть вероятные отклонения системы захоронения РАО от ее нормальной эволюции, которые могут приводить к более негативным последствиям для системы захоронения РАО, приводящим к изменению механизмов, путей и (или) скорости миграции радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде, включая маловероятные сценарии, обусловленные катастрофическими внешними воздействиями природного и техногенного характера на площадке размещения ПГЗРО.

42. При разработке сценария нормальной эволюции рекомендуется учитывать:

- наиболее вероятные пути миграции радионуклидов в системе захоронения РАО;
- относительное постоянство (стабильность) геолого-тектонических, геодинамических, геологических, сейсмотектонических и сейсмических условий района размещения и площадки ПГЗРО;
- изменение климата по наиболее вероятному климатическому сценарию;
- постоянство условий окружающей среды и образа жизни населения.

43. При разработке сценария нормальной эволюции рекомендуется учитывать постепенное снижение защитных, задерживающих, прочностных и изолирующих свойств инженерных барьеров безопасности со временем в результате внутренних воздействий и процессов, включая:

- образование химических соединений, снижающих изолирующие свойства барьеров безопасности;
- газовыделение в результате коррозии контейнеров и конструкционных материалов, а также биогенных процессов;
- микробиологически связанные процессы (в том числе разложение органических составляющих РАО);
- длительные радиационные воздействия;
- длительные тепловые нагрузки от тепловыделяющих РАО;
- механическое воздействие вышележащих горных пород;
- физико-химическое (геохимическое) взаимодействие РАО со средами ближней зоны ПГЗРО.

44. При разработке альтернативных сценариев рекомендуется учитывать:

- внешние воздействия природного и техногенного происхождения, свойственные району размещения ПГЗРО, способные привести к ухудшению изолирующих и прочностных свойств естественных барьеров безопасности, нарушению целостности и отказам инженерных барьеров безопасности, включая:
- активизацию тектонических процессов;
- изменения сейсмического режима, включая катастрофические воздействия землетрясений выше МРЗ;
- изменения гидрогеологического режима в результате изменения климатических условий и (или) хозяйственной деятельности человека в районе размещения ПГЗРО;
- внутренние воздействия и недостатки в системе инженерных барьеров безопасности, приводящие к их отказам и раннему выходу из строя, включая возникновение СЦР после закрытия ПГЗРО, дефекты производственного характера, ошибки при создании системы инженерных барьеров безопасности;
- непреднамеренное вторжение человека в систему захоронения РАО, включая буровые и горные работы, различные виды промышленной деятельности на площадке ПГЗРО, приводящие в том числе к вскрытию ячеек захоронения РАО.

45. При рассмотрении отказов инженерных барьеров безопасности ПГЗРО рекомендуется обосновывать, что если один из инженерных барьеров безопасности функционирует не в полной мере или полностью перестает выполнять свои функции безопасности, то долговременная безопасность ПГЗРО в целом будет обеспечиваться другими инженерными барьерами безопасности и вмещающими породами (выполнение принципа многобарьерности). Рекомендуется учитывать возможность отказа каждого инженерного барьера безопасности ПГЗРО.

46. При разработке сценария непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения РАО рекомендуется учитывать, что лицо или группа лиц, осуществивших вторжение в ПГЗРО, может в течение некоторого времени подвергаться радиационному воздействию извлеченных на поверхность РАО, не подозревая о существующей опасности.

47. При разработке сценариев рекомендуется определять качественные и количественные характеристики последствий рассматриваемых внешних и внутренних воздействий для системы захоронения РАО с целью их учета в расчетах миграции радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде.

48. Разработанные сценарии рекомендуется представлять в одном из следующих видов либо их комбинаций:

- матриц взаимодействия, в которых основные диагональные элементы представляют собой элементы ПГЗРО, а недиагональные — взаимодействия между элементами ПГЗРО;
- диаграмм взаимного влияния процессов;
- описательной формы.

49. Рекомендуется определять конечный перечень сценариев эволюции системы захоронения РАО, которые в совокупности позволят учесть основные особенности и неопределенности возможной эволюции системы захоронения РАО.

50. В целях определения обобщенного риска облучения населения рекомендуется оценивать вероятность реализации каждого альтернативного сценария.

## VI. Разработка и обоснование концептуальной модели системы захоронения радиоактивных отходов

---

51. После разработки сценариев рекомендуется выбрать принципиальную схему для их последующего количественного анализа. С этой целью рекомендуется разрабатывать концептуальную модель системы захоронения РАО, представляющую собой качественные предположения о ее прогнозируемом функционировании.

52. При разработке концептуальной модели рекомендуется рассматривать систему захоронения РАО и область ее влияния как совокупность следующих составляющих:

- ближней зоны ПГЗРО, к которой относятся подземные сооружения и конструкции ПГЗРО, горные выработки, включая нарушенную зону горных выработок, ячейки захоронения РАО и инженерные барьеры безопасности, включая упаковки РАО;
- дальней зоны ПГЗРО, к которой относится геологическая среда, в которой прогнозируется миграция радионуклидов, вышедших из ближней зоны ПГЗРО;
- окружающей среды, включая население.

53. При разработке концептуальной модели системы захоронения РАО рекомендуется обобщать сведения, полученные при сборе и подготовке исходных данных о характеристиках ПГЗРО и условиях его размещения, в том числе:

- описание характеристик системы захоронения РАО, ее отдельных элементов и их взаимосвязи;
- описание общей концепции обеспечения безопасности системы захоронения РАО и функций безопасности для каждого из элементов системы, важных для безопасности;
- описание выполнения элементами системы захоронения РАО возложенных на них функций безопасности при нормальной эволюции системы и при внешних и внутренних воздействиях, учитываемых в альтернативных сценариях;
- описание технических решений, предусмотренных проектом ПГЗРО для реализации принципов и требований безопасности;
- описание геологических, гидрогеологических, радиационных, химических, биологических, механических, тепловых и других процессов, которые могут повлиять на эволюцию системы захоронения РАО;
- описание характеристик РАО с учетом пространственной неоднородности РАО;
- описание предполагаемых изменений свойств и поведения элементов системы захоронения РАО и их взаимодействия во времени, в том числе их защитных, задерживающих и изолирующих свойств;
- описание предполагаемых изменений условий окружающей среды и их воздействия на элементы системы захоронения РАО;
- описание возможных механизмов выхода и путей миграции радионуклидов при нормальной эволюции системы захоронения РАО и при альтернативных сценариях;
- описание неопределенностей, обусловленных неполнотой имеющейся информации.

54. В описательную часть концептуальной модели системы захоронения РАО рекомендуется включать следующую информацию:

- характеристику системы захоронения РАО как источника радионуклидов (в том числе содержание и активность радионуклидов, скорость их выхода из компаундов и упаковок РАО, формы миграции радионуклидов и их гидрогеохимические свойства, физико-химическую форму РАО), ее элементов и взаимосвязи между ними;
- сведения об эволюции системы захоронения РАО, в том числе события, явления и факторы, определяющие сценарии;
- характеристики геологической среды района размещения ПГЗРО;
- характеристики окружающей среды (биосферы) в районе размещения ПГЗРО;
- информацию о физико-химических процессах, определяющих пути переноса радионуклидов из системы захоронения РАО в окружающую среду;
- пути воздействия радионуклидов на человека и окружающую среду (например, внешнее и внутреннее облучение, потребление загрязненной воды и продуктов питания, вдыхание радиоактивной пыли);
- пределы применимости концептуальной модели в рассматриваемых пространственной области и временном диапазоне с учетом допущений, при которых она была разработана;
- начальные и граничные условия, задаваемые при проведении прогнозных расчетов.

55. В графическую часть концептуальной модели системы захоронения РАО рекомендуется включать блок-схемы и иллюстрации, наглядно демонстрирующие пути миграции радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде, а также взаимосвязи между элементами системы захоронения РАО, обусловленные происходящими в ней процессами.

## VII. Разработка математических моделей процессов, влияющих на долговременную безопасность пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов

---

56. Разработанную концептуальную модель системы захоронения РАО или ее отдельных элементов (ближней и дальней зон, окружающей среды) рекомендуется учитывать при разработке математических моделей процессов, влияющих на долговременную безопасность ПГЗРО.

57. При оценке долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется использовать математические модели, разработанные с целью учета процессов, происходящих в системе захоронения РАО, в том числе:

- в ближней зоне ПГЗРО:
- модель источника радионуклидов;
- модель процессов, протекающих в инженерных барьерах безопасности ПГЗРО;
- модель миграции радионуклидов в нарушенной зоне горных выработок ПГЗРО (приконтурной зоне горной выработки ПГЗРО, изолирующие и задерживающие свойства которой ухудшились в результате сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО);

в дальней зоне ПГЗРО:

- модель миграции радионуклидов в геологической среде;
- в окружающей среде (биосферные модели):
- модель переноса радионуклидов в поверхностной гидросфере;
- модель атмосферного переноса радионуклидов (для сценариев вторжения человека в систему захоронения РАО);
- модель радиационного воздействия на население и окружающую среду.

58. Для оценки долговременной безопасности ПГЗРО как единого целого рекомендуется обеспечивать взаимосвязь указанных выше математических моделей, а также учет при моделировании происходящих в системе захоронения РАО событий, явлений и факторов (например, изменение климатических условий, количества атмосферных осадков, уровней подземных вод, режима поверхностных водоемов и водотоков).

59. При моделировании миграции радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде рекомендуется учитывать цепочки радиоактивных превращений, а также радиационные и физико-химические характеристики дочерних радионуклидов, в том числе миграционные.

60. Для моделирования источника радионуклидов рекомендуется использовать:

- модели динамики выхода радионуклидов из компаундов и упаковок РАО;
- модели растворения, растрескивания и механического разрушения компаундов вследствие тепловых, химических, радиационных и биологических процессов;



- модели теплового режима отдельных элементов и всего ПГЗРО вместе с вмещающей средой;
- модели напряженно-деформированного состояния и прочности элементов ПГЗРО и вмещающей среды.

61. Для моделирования процессов, протекающих в инженерных барьерах безопасности ПГЗРО (за исключением компаундов и упаковок РАО), рекомендуется использовать:

- модели напряженно-деформированного состояния и прочности инженерных барьеров безопасности;
- модели изменения характеристик инженерных барьеров безопасности под действием изменения температуры и внешнего и внутреннего давления в процессе эволюции системы захоронения РАО;
- модели химических процессов, протекающих в инженерных барьерах безопасности, описывающих трансформацию минеральных фаз (в том числе коррозию металлических материалов, изменение состава буферных материалов, деградацию цемента);
- модели миграции радионуклидов и теплопереноса в системе инженерных барьеров безопасности с учетом сорбции и радиоактивного распада;
- модели биогенных процессов.

62. Для моделирования миграции радионуклидов в геологической среде рекомендуется использовать:

- модели фильтрации в гомогенной пористой среде;
- модели фильтрации в трещиноватой среде;
- модели адвективно-диффузионно-дисперсионного массопереноса с учетом химических взаимодействий в системе вода — порода, в частности сорбции.

63. При моделировании миграции радионуклидов в геологической среде рекомендуется учитывать:

- тепловыделение, обусловленное радиоактивным распадом, и теплоперенос;
- тепловую конвекцию;
- газообразование;
- коллоидный перенос радионуклидов;
- изменение напряженно-деформированного состояния породы (геомеханические процессы) и его влияние на параметры фильтрационных и миграционных процессов.

64. Для моделирования радиационного воздействия на население и окружающую среду рекомендуется использовать математические модели:

- внешнего облучения от поверхности почвы, загрязненной радионуклидами в результате орошения;
- внутреннего облучения ингаляционным путем;
- внутреннего облучения в результате потребления растительной пищи, выращенной на загрязненной почве;

- внутреннего облучения в результате потребления мясомолочной продукции, произведенной от животных, вскормленных на загрязненной территории;
- внутреннего и внешнего облучения в результате потребления и использования воды, загрязненной радионуклидами;
- внутреннего облучения в результате непреднамеренного (случайного) поступления радионуклидов в организм (например, с частицами почвы);
- внутреннего облучения в результате потребления рыбы.

Примеры математических моделей радиационного воздействия ПГЗРО на население приведены в приложении № 4 к настоящему Руководству по безопасности.

## VIII. Разработка расчетных моделей пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов с использованием программ для электронных вычислительных машин

---

65. С целью разработки расчетной модели ПГЗРО рекомендуется реализовывать разработанные математические модели процессов, влияющих на долговременную безопасность ПГЗРО, в программах для ЭВМ, прошедших экспертизу в соответствии с Порядком проведения экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии, утвержденным приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 июля 2018 г. № 325 (зарегистрирован Минюстом России 12 ноября 2018 г., регистрационный № 52650).

66. При разработке расчетной модели ПГЗРО рекомендуется определять параметры расчетной модели, их значения и присущие им неопределенности.

Принятые значения параметров расчетной модели, а также используемые методы определения значений параметров рекомендуется обосновывать.

67. При выполнении многовариантных расчетов в рамках выбранного сценария рекомендуется принимать функции распределения и диапазоны варьирования значений для следующих параметров расчетной модели:

- характеристик процессов, влияющих на выход радионуклидов из компаундов и упаковок РАО, их миграцию в системе захоронения РАО и окружающей среде;
- данных о свойствах вмещающих пород и конструкционных материалов инженерных барьеров безопасности ПГЗРО, в том числе их защитных, задерживающих, прочностных и изолирующих свойствах;
- характеристик внешних и внутренних воздействий, свойственных району размещения и площадки ПГЗРО;
- геометрических размеров систем и элементов ПГЗРО;
- коэффициентов эмпирических уравнений, использованных в программах для ЭВМ.

В случае отсутствия информации относительно функций распределения и диапазонов варьирования значений параметров расчетной модели рекомендуется обосновывать их выбор, в том числе с использованием экспертной оценки.

68. При определении параметров расчетной модели рекомендуется использовать перечень исходных данных и параметров, учитываемых в расчетных моделях ПГЗРО, приведенный в приложении № 5 к настоящему Руководству по безопасности.

69. Разработку расчетной модели ПГЗРО рекомендуется начинать с разработки модели (моделей), реализующей сценарий нормальной эволюции.

Для учета в расчетной модели альтернативных сценариев могут быть использованы модели, разработанные для сценария нормальной эволюции, но с заданием иных расчетных параметров и условий.

70. Разработку расчетной модели ПГЗРО рекомендуется выполнять в соответствии с блок-схемой, приведенной в приложении № 6 к настоящему Руководству по безопасности.

71. Пространственную область и границы расчетной модели рекомендуется выбирать с учетом масштаба возможного радиационного воздействия ПГЗРО на критическую группу населения (область прогнозируемого распространения радионуклидов).

В пространственную область расчетной модели рекомендуется включать границы горного отвода.

72. В рамках консервативного подхода к оценке долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется разрабатывать упрощенные расчетные модели, основанные в том числе на аналитических решениях уравнений массопереноса радионуклидов в системе инженерных барьеров безопасности ПГЗРО и геологической среде и методе камерного моделирования.

73. При разработке упрощенной расчетной модели ПГЗРО допускается:

- ограничивать круг рассматриваемых процессов наиболее значимыми;
- рассматривать схематичное описание системы захоронения РАО;
- принимать упрощенное описание процессов выхода радионуклидов из источника РАО;
- предполагать постоянство условий переноса радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде;
- принимать упрощенные граничные и начальные условия;
- использовать упрощенные модели процессов переноса радионуклидов;
- предполагать гомогенность сред, в которых происходит перенос радионуклидов.

74. Упрощенные расчетные модели ПГЗРО рекомендуется использовать как для получения консервативных результатов оценки долговременной безопасности ПГЗРО, так и для решения вспомогательных задач (обнаружения ошибок в расчетах, быстрого анализа полученных результатов, оценки влияния отдельных процессов на конечный результат, выбора дозообразующих радионуклидов, определения расчетного периода, а также для кросс-верификации более сложных расчетных моделей).

75. В рамках реалистичного подхода к оценке долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется разрабатывать трехмерные сеточные модели, основанные на численных методах конечных элементов, конечных объемов или конечных разностей, позволяющие учитывать большой спектр процессов, происходящих в системе захоронения РАО, действительные пути переноса радионуклидов и неоднородности геологического строения вмещающих пород, а также задавать точную геометрию элементов ПГЗРО.

76. При разработке расчетных моделей рекомендуется обосновывать адекватность расчетной модели, ее соответствие целям моделирования и целям оценки долговременной безопасности ПГЗРО, а также оценивать корректность математической постановки задачи.

77. Для подтверждения адекватности расчетной модели рекомендуется выполнять валидацию расчетной модели путем сравнения результатов расчетов, полученных с использованием расчетной модели, с результатами натурных измерений и (или) экспериментальными данными.

78. Для снижения неопределенностей результатов оценки долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется увеличивать объем используемых экспериментальных данных о составе и характеристиках РАО, инженерных барьерах безопасности, условиях района размещения и площадки ПГЗРО, в том числе за счет дополнительных исследований, проводимых в ПИЛ, направленных на изучение процессов и явлений, характеризующихся высоким уровнем неопределенности.

79. Для подтверждения корректности математической постановки задачи рекомендуется обеспечивать выполнение следующих условий:

- существование решения (задача должна иметь решение при любых допустимых исходных данных (начальных и граничных условиях, коэффициентах));
- однозначность задачи (каждым исходным данным задачи соответствует только одно решение);
- устойчивость решения (решение должно непрерывно зависеть от исходных данных задачи, то есть при малых изменениях исходных данных решение не должно меняться скачкообразно).

80. В связи с возникновением в процессе разработки расчетной модели ошибок, обусловленных упрощениями, аппроксимацией, субъективностью предположений, выдвинутых в ходе моделирования, а также ограничениями методов математического моделирования, рекомендуется уточнять расчетную модель не только на основании сравнения результатов, полученных по модели, с эмпирическими данными, но и на основании экспертных оценок, сопоставления между собой результатов расчетов, полученных по различным программам для ЭВМ, в том числе с использованием аналитических решений.

## IX. Анализ результатов оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов. Анализ неопределенностей и чувствительности

---

81. С целью определения направлений дальнейших исследований, ориентированных на уточнение расчетной модели, в том числе ее параметров, и снижения неопределенности результатов расчетов рекомендуется выполнять анализ чувствительности расчетной модели.

82. При выполнении анализа чувствительности расчетной модели рекомендуется определять:

- какие из параметров расчетной модели вносят наибольший вклад в неопределенность результата расчета;
- какие из параметров расчетной модели слабо влияют на неопределенность результата расчета и соответственно могут быть зафиксированы в наиболее вероятном значении.

83. Для количественной оценки значимости параметра расчетной модели рекомендуется использовать методы глобального анализа чувствительности. Например, при использовании вариационного метода анализа чувствительности значение индекса полного порядка, под которым понимается вклад параметра в итоговую неопределенность результата моделирования с учетом всех его взаимодействий с другими параметрами, меньше 0,01 обеспечивает низкую значимость параметра.

84. Варьирование параметров, оказывающих влияние на результат расчетной модели, рекомендуется выполнять в пределах обоснованных диапазонов значений.

85. Расчетную модель рекомендуется пересматривать, если по результатам анализа чувствительности наблюдается:

- сильное влияние на результат параметра расчетной модели, который с физической точки зрения не может сильно влиять на результат моделирования;
- незначительное влияние на результат всех параметров расчетной модели.

86. По результатам анализа чувствительности расчетной модели рекомендуется в целях снижения погрешности результатов моделирования для параметров расчетной модели, оказывающих влияние на результат расчетной модели, выполнять калибровку расчетной модели путем подбора параметров расчетной модели до получения результатов, соответствующих экспериментальным данным.

87. Калибровку расчетной модели рекомендуется осуществлять итеративно путем уточнения отдельных модулей многомодульных моделей и расчетной модели в целом.

88. Расчетные модели, уточненные по результатам анализа чувствительности и калибровки, рекомендуется использовать для определения радиационного воздействия ПГЗРО на население и окружающую среду после закрытия ПГЗРО.

89. Результаты прогнозных расчетов оценки долговременной безопасности ПГЗРО для каждого рассмотренного сценария рекомендуется сопровождать качественной и (или) количественной

оценкой неопределенностей, присущих концептуальным, математическим и расчетным моделям.

90. Вывод об обеспечении долговременной безопасности ПГЗРО, в том числе о выполнении инженерными барьерами безопасности ПГЗРО функций безопасности в течение установленных проектом ПГЗРО сроков, а также о необходимости принятия соответствующих мер по обеспечению и повышению безопасности ПГЗРО, рекомендуется делать на основе сопоставления результатов прогнозных расчетов с установленными критериями (показателями) безопасности ПГЗРО с учетом неопределенности полученных результатов.

91. Результаты прогнозных расчетов оценки долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется представлять в виде таблиц или графиков в форме, удобной для сопоставления результатов с установленными критериями (показателями) безопасности ПГЗРО, с указанием неопределенностей полученных значений.

92. Пример выполнения прогнозного расчета оценки долговременной безопасности ПГЗРО приведен в приложении № 7 к настоящему Руководству по безопасности.

## Приложение № 1

---

к руководству по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов», утвержденному приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 марта 2021 г. № 101.

### Перечень сокращений

*ДОН* — декларация о намерениях;

*ЗН* — зона наблюдения;

*МРЗ* — максимальное расчетное землетрясение;

*НИР* — научно-исследовательская работа;

*ОБИН* — обоснование инвестиций;

*ОКР* — опытно-конструкторская работа;

*ООБ* — отчет по обоснованию безопасности;

*ПЗРО* — пункт захоронения радиоактивных отходов;

*ПГЗРО* — пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов;

*ПИЛ* — подземная исследовательская лаборатория;

*РАО* — радиоактивные отходы;

*СЗЗ* — санитарно-защитная зона;

*СЦР* — самоподдерживающаяся цепная реакция деления;

*ЭВМ* — электронная вычислительная машина.



## Приложение № 2

к руководству по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов», утвержденному приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 марта 2021 г. № 101.

### Блок-схема итерационного подхода к оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов

Блок-схема итерационного подхода к оценке долговременной безопасности ПГЗРО представлена на рис. 1.

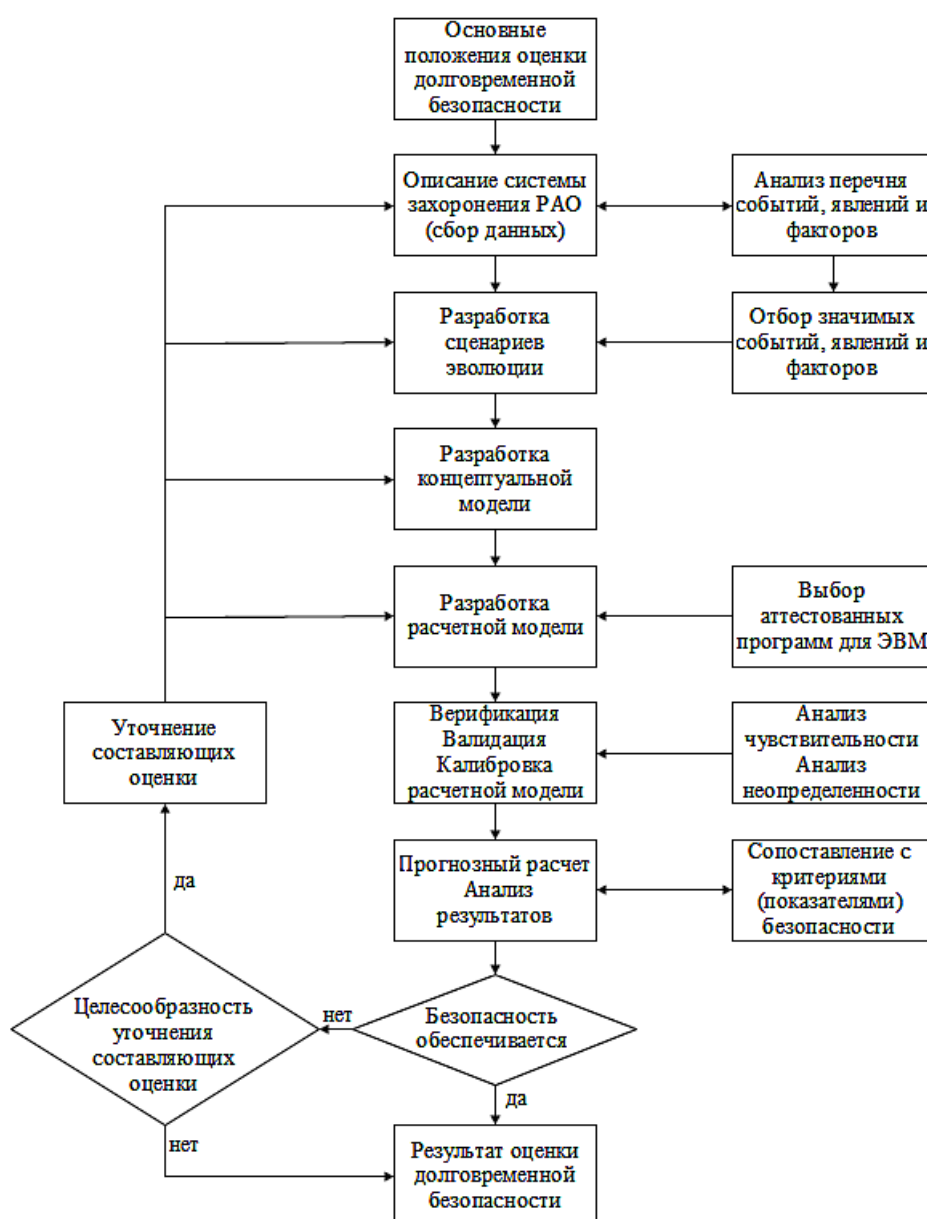


Рис. 1. Блок-схема итерационного подхода к оценке долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов

## Приложение № 3

---

к руководству по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов», утвержденному приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 марта 2021 г. № 101.

### Перечень событий, явлений и факторов, учитываемых при оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов

#### 1. Внешние события, явления и факторы.

##### 1.1. Факторы, связанные с размещением, сооружением и закрытием ПГЗРО, в том числе:

- несоблюдение контроля качества систем и элементов ПГЗРО;
- недостатки проведения исследовательских (изыскательских) работ в районе размещения и на площадке ПГЗРО;
- неучет особенностей проекта ПГЗРО, в том числе проектных характеристик ПГЗРО;
- нарушение графика и планирования работ;
- недостатки выполнения строительных работ;
- недостатки выполнения работ при эксплуатации ПГЗРО;
- недостатки выполнения работ при закрытии ПГЗРО;
- аварии и нарушения до закрытия ПГЗРО;
- несоблюдение административного контроля (по срокам и видам контроля);
- недостатки проведения мониторинга системы захоронения РАО;
- потеря данных и информации о ПГЗРО.

\* Международный перечень особенностей, событий и процессов для пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов. Отчет Агентства по ядерной энергии ОЭСР, 2019 г. (International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Version 3.0. Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency. NEA/RWM/R(2019)1, July 2019).

##### 1.2. Геологические процессы и явления, в том числе:

- тектонические движения, активизация тектонических процессов;
- орогенез;
- деформации горных пород (упругие, пластические, хрупкие);
- сейсмичность, изменения сейсмического режима, землетрясения выше МРЗ;
- магматическая и вулканическая активность;
- метаморфизм горных пород;

- гидротермальная активность;
- эрозия и осаждение;
- диагенез;
- почвообразование;
- растворение солей;
- гидрологическая и (или) гидрогеологическая реакция на геологические изменения;
- геоморфологическая реакция на геологические изменения;
- климатическая реакция на геологические изменения.

#### 1.3. Климатические факторы, в том числе:

- глобальные климатические изменения;
- региональные и локальные климатические изменения;
- изменение уровня моря;
- перигляциальные эффекты;
- движение ледника и ледяного щита (локальные эффекты);
- эффекты теплого климата (тропический и пустынный);
- гидрологическая и (или) гидрогеологическая реакция на изменение климата;
- экологическая реакция на климатические изменения;
- изменение жизнедеятельности человека в связи с климатическими изменениями;
- геоморфологическая реакция на климатические изменения.

#### 1.4. Деятельность человека в будущем, в том числе:

- влияние деятельности человека на климат;
- социальное развитие района размещения ПГЗРО;
- технологическое развитие района размещения ПГЗРО;
- сохранение знаний о ПГЗРО;
- буровые и горные работы на площадке ПГЗРО;
- добыча полезных ископаемых, различные виды промышленной деятельности;
- исследования площадки ПГЗРО без вторжения;
- деятельность на площадке ПГЗРО (строительство зданий, дорог, археологические изыскания);
- управление водными ресурсами (подземными и поверхностными водами);
- взрывы и аварии различного происхождения;
- деятельность по устранению недостатков, возникших на площадке ПГЗРО;
- вторжение с целью обследования ПГЗРО после закрытия.

## 2. Характеристики упаковок и контейнеров РАО, включая компаунд.

### 2.1. Характеристики и свойства компаунда, в том числе:

- качественный и количественный состав РАО (радионуклидный состав, суммарные и удельные активности радионуклидов, включая дочерние), содержание химических токсичных веществ;
- характеристики твердых и отвержденных РАО (масса, объем, тепловые, гидравлические, химические и механические характеристики, содержание органических веществ).

### 2.2. Характеристики и свойства упаковок и контейнеров РАО, в том числе:

- физические, химические и биологические характеристики и свойства защитных и (или) транспортных контейнеров РАО (без учета характеристик компаунда).

### 2.3. Процессы и события, происходящие в упаковках и контейнерах РАО, в том числе:

- тепловые процессы (тепловыделение в результате химических и биологических процессов, в том числе обусловленное радиоактивным распадом, теплоперенос);
- гидравлические процессы (водонасыщение, тепловые эффекты, механические эффекты, химические эффекты, в том числе физико-химическое (геохимическое) взаимодействие РАО со средами ближней зоны ПГЗРО, газообразование);
- механические процессы (деформация, изменения объема материала упаковок и контейнеров РАО; смещение упаковок и контейнеров РАО; коррозионное разрушение под напряжением; взрыв газа в упаковке и контейнере РАО в результате воспламенения горючей газовой смеси, а также в результате газообразования, вызванного коррозией с последующим разрушением упаковки и контейнера РАО);
- химические процессы (изменение pH, изменение окислительно-восстановительных условий в упаковке и контейнерах РАО, миграция химических веществ и продуктов химических реакций, коррозия упаковок и контейнеров РАО, растворение компонентов упаковок и контейнеров РАО, осаждение радионуклидов в твердой фазе, комплексообразование, коллоидообразование);
- биологические процессы (увеличение/уменьшение количества микроорганизмов, микробиологическое разложение органических РАО);
- радиационные процессы (радиоактивный распад и образование дочерних радионуклидов; радиолиз; образование гелия; образование радона; радиационные повреждения упаковок и контейнеров РАО, возникновение СЦР).

### 2.4. Процессы, влияющие на выход радионуклидов за пределы компаунда, в том числе:

- перенос в водной фазе (растворение, диффузия, образование и растворимость химических веществ, сорбция и десорбция);
- перенос в газообразной фазе;
- перенос в твердой фазе;
- перенос радионуклидов в результате вторжения человека.

### 2.5. Миграция радионуклидов за пределы упаковок и контейнеров РАО с учетом выхода радионуклидов за пределы компаунда, в том числе:

- перенос в водной фазе (адвекция, дисперсия, диффузия, растворение, осаждение и кристаллизация, образование и растворимость химических веществ, сорбция и десорбция, коллоидный перенос);
- перенос в газообразной фазе.

3. Факторы и процессы в ПГЗРО без учета выхода радионуклидов за пределы упаковок и контейнеров РАО.

3.1. Характеристики и свойства ПГЗРО, в том числе:

- буферного материала, материала засыпки;
- засыпки свободного пространства и туннелей;
- засыпки шахт и рамп;
- тампонажа исследовательских и мониторинговых скважин;
- других инженерных барьеров безопасности и материалов;
- нарушенной зоны горной выработки.

3.2. Процессы в ПГЗРО, в том числе:

- тепловые процессы, включая разрушение инженерных барьеров безопасности в результате длительных воздействий тепловых нагрузок;
- гидравлические процессы (водонасыщение барьеров безопасности; туннельная и гидравлическая эрозия);
- механические процессы (изменение объема материалов; пластическая деформация; обрушение проемов; образование и скопление газа; взрыв газа);
- химические процессы, в том числе образование химических соединений, снижающих изолирующие свойства барьеров безопасности (изменение рН, изменение окислительно-восстановительных условий, миграция химических веществ, коррозия, деградация материалов барьеров безопасности ПГЗРО, осаждение твердой фазы, комплексообразование, коллоидообразование);
- биологические процессы (увеличение/уменьшение количества микроорганизмов, микробиологическое разложение материалов барьеров безопасности ПГЗРО);
- радиационные процессы (радиоактивный распад и образование дочерних радионуклидов, радиолиз, образование радона, радиационные повреждения, в том числе разрушение инженерных барьеров безопасности в результате длительных радиационных воздействий, возникновение СЦР).

3.3. Миграция радионуклидов в ПГЗРО, в том числе:

- перенос в водной фазе (адвекция, дисперсия, диффузия, растворение, осаждение и кристаллизация; образование и растворимость химических веществ, сорбция и десорбция, коллоидный перенос);
- перенос в газообразной фазе;
- перенос в твердой фазе;
- перенос радионуклидов в результате вторжения человека.

#### 4. Факторы геологической среды.

##### 4.1. Характеристики и свойства геологической среды, в том числе:

- геологическое строение района размещения и площадки ПГЗРО;
- крупные нарушения горных пород (разрывы, разломы);
- наличие природных ресурсов в районе размещения ПГЗРО;
- невыявленные особенности и элементы геологической среды (зоны трещиноватости, разрывы, фильтрационные окна);
- геотермальные (температура на отметке размещения ПГЗРО, теплопроводность и теплоемкость горных пород);
- гидравлические (гидравлическая проводимость, частота и связность трещиновидности, пористость, извилистость и давление поровой воды горных пород);
- механические (механические нагрузки, вызванные тектоническими движениями горных пород);
- геохимические (минеральный состав горных пород, состав грунтовых и поровых вод (рН и окислительно-восстановительные условия), соленость и химические градиенты);
- биологические (биологическая и биохимическая эволюция геологической среды, наличие микроорганизмов).

##### 4.2. Процессы, происходящие в геологической среде, в том числе:

- тепловые процессы (передача тепла за счет естественных градиентов температуры, изменение плотности твердых тел и жидкости в геологической среде за счет теплового расширения/сжатия);
- гидравлические процессы (учет потоков грунтовых вод, временные изменения потоков и гидравлических свойств породы);
- механические процессы (механические нагрузки, вызванные тектоническими движениями, ледниковой нагрузкой и разгрузкой, удаление горных пород, выветривание, эрозия, отложения), в том числе механическое воздействие вышележащих горных пород на окружающую геологическую среду);
- химические процессы (геохимические процессы, изменения в химическом составе подпиточной воды, химические реакции между различными фазами);
- биологические процессы (биологические и биохимические процессы, влияющие на вмещающие породы и общую эволюцию геологической среды, изменения условий популяции микроорганизмов);
- радиационные процессы (воздействие радиации на вмещающую породу, непосредственно окружающую ПГЗРО).

##### 4.3. Миграция радионуклидов в геологической среде, в том числе:

- перенос в водной фазе (адвекция, дисперсия, диффузия, матричная диффузия, растворение, осаждение и кристаллизация, образование и растворимость химических веществ, сорбция и десорбция, коллоидный перенос);

- перенос в газообразной фазе;
- перенос в твердой фазе;
- перенос загрязняющих веществ в результате вторжения человека.

## 5. Факторы окружающей среды.

### 5.1. Характеристики поверхностной среды, в том числе:

- топография и морфология (рельеф, ландшафт);
- природные зоны (взаимосвязь животных и растений; процессы, влияющие на их эволюцию в дальнейшем);
- почвы и отложения (поверхностные почвы, растительный грунт, донные отложения);
- приповерхностные водоносные горизонты и водовмещающие породы;
- поверхностные водные объекты (заболоченная местность, озера и реки, родники и области разгрузки подземных вод);
- береговые особенности;
- особенности морей и океанов, включая морское дно;
- атмосфера;
- флора;
- фауна;
- метеорологические условия;
- гидрологический режим и водный баланс (приповерхностный);
- эрозия и осаждение;
- экологические/биологические/микробные системы.

### 5.2. Поведение и образ жизни человека, в том числе:

- физические характеристики человека (возраст, состояние здоровья, пол);
- характеристики сообщества (тип сообщества, местоположение сообщества, источник водоснабжения, жилища или другие помещения, в которых люди проводят время);
- рацион и водопотребление (употребление сельскохозяйственной продукции, вегетарианство, потребление продуктов животного происхождения, другие виды рациона);
- привычки (исключая рацион);
- приготовление пищи и обработка воды.

### 5.3. Миграция радионуклидов в окружающей среде, в том числе:

- водно-опосредованная миграция (поступление подземных загрязненных вод в биосферу, миграция, связанная с поверхностной почвой и грунтом, миграция, связанная с поверхностными водоемами, растворение и осаждение, образование и растворимость химических веществ, сорбция и десорбция, коллоидный перенос);
- перенос в газообразной фазе;

- перенос в твердой фазе;
- перенос радионуклидов в результате деятельности человека;
- перенос радионуклидов животными, растениями;
- радиоактивный распад и образование дочерних радионуклидов.

5.4. Радиационные факторы воздействия на население, в том числе:

- загрязненная питьевая вода и пища;
- загрязненные непродовольственные товары;
- другие загрязненные природные среды;
- характер облучения (радиационное воздействие на человека, радиационное воздействие на флору и фауну);
- дозиметрия и биокинетика (дозиметрия и биокинетика человека, дозиметрия и биокинетика флоры и фауны);
- радиационное воздействие/эффекты (радиационное воздействие на человека, радиационное воздействие на флору и фауну);
- химическая токсичность/эффекты (химическое воздействие на человека, химическое воздействие на флору и фауну).



## Приложение № 4

к руководству по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов», утвержденному приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 марта 2021 г. № 101.

### Примеры математических моделей радиационного воздействия пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов на население

Для критической группы населения, проживающей в районе размещения ПГЗРО, рекомендуется учитывать пути облучения, связанные с потреблением и использованием загрязненной радионуклидами воды, в том числе:

- внешнее облучение от почвы, загрязненной при орошении;
- внутреннее облучение при употреблении загрязненной питьевой воды;
- внутреннее облучение при употреблении загрязненной растительной пищи;
- внутреннее облучение при употреблении загрязненных продуктов животного происхождения;
- внутреннее облучение, обусловленное потреблением рыбы;
- внутреннее облучение при случайном проглатывании почвы.

Расчет рекомендуется проводить суммированием доз по всем путям облучения для всех присутствующих радионуклидов.

Доза внешнего облучения от загрязненной при орошении почвы  $D_{почв}$  [Зв/год] рассчитывается по формуле:

$$D_{почв} = C_{почв}^{внеш} \cdot K_{почв} \cdot t, \quad (1)$$

где:

$C_{почв}^{внеш}$  — концентрация радионуклида на поверхности почвы, Бк/м<sup>2</sup>;

$$C_{почв}^{внеш} = C_{вод} \cdot z \cdot g, \quad (2)$$

где:

$C_{вод}$  — концентрация радионуклида в воде, Бк/м<sup>3</sup>;

$z$  — коэффициент загрязнения почвы при орошении;

$g$  — средняя глубина проникновения воды в почву, м;

$K_{почв}$  — коэффициент дозового преобразования при внешнем облучении человека от радиоактивно загрязненной поверхности, Зв·м<sup>2</sup>/с·Бк;

$t$  — время нахождения человека на загрязненной почве, с/год.

Доза внутреннего облучения от употребления загрязненной питьевой воды  $D_{вод}$  [Зв/год]:

$$D_{вод} = C_{вод} \cdot K_{вод} \cdot V_{вод}, (3)$$

где:

$C_{вод}$  — концентрация радионуклида в воде, Бк/м<sup>3</sup>;

$K_{вод}$  — коэффициент дозового преобразования при пероральном поступлении радионуклида, Зв/Бк;

$V_{вод}$  — годовое потребление воды лицом из критической группы, м<sup>3</sup>/год.

Доза внутреннего облучения от потребления растительной пищи, выращенной при орошении загрязненной водой  $D_p$  [Зв/год]:

$$D_p = C_p \cdot K_{пищ} \cdot m_p, (4)$$

где:

$C_p$  — концентрация радионуклида в потребляемой части растения, Бк/кг;

$K_{пищ}$  — коэффициент дозового преобразования при пероральном поступлении радионуклида, Зв/Бк;

$m_p$  — годовое потребление растительной пищи лицом из возрастной группы, которая является критической по пероральному поступлению радионуклида с пищевыми продуктами, кг/год.

Концентрация радионуклида в урожае  $C_p$  [Бк/кг] рассчитывается с использованием следующего уравнения:

$$C_p = (F_{p2} \cdot C_{Fp} + F_{p1} \cdot S_p) \cdot C_{почв} / (1 - \theta_t) \rho + I_p \cdot V_{irr} \cdot C_{вод} \cdot \{ (1 - F_{abs}) \cdot e^{-wT} \cdot F_{p3} + F_{abs} \cdot F_{p2} \cdot F_{trans} \} / Y, (5)$$

где:

$C_{вод}$  — концентрация радионуклида в воде, Бк/м<sup>3</sup>;

$C_{почв}$  — концентрация радионуклида в почве, Бк/м<sup>3</sup>;

$I_p$  — доля радионуклида в воде, которая осаждается на биомассе;

$F_{p1}$  — доля внешнего загрязнения урожая почвой после обработки;

$F_{p2}$  — доля внутреннего загрязнения, сохранившаяся после обработки урожая;

$F_{p3}$  — доля внешнего загрязнения от перехвата радионуклида, сохраняющаяся после обработки урожая;

$F_{abs}$  — доля радионуклида, поглощенная внешними поверхностями растений;

$F_{trans}$  — доля поглощенной активности, перемещенной в съедобную часть растения к моменту сбора урожая;

$w$  — постоянная, характеризующая процессы снижения содержания радионуклидов на поверхности растений за счет процессов выветривания, вымывания и падения листьев, год<sup>-1</sup>;

$T$  — время между орошением и сбором урожая, год;

$CF_p$  — коэффициент концентрации радионуклида от поглощения воды корнями, Бк кг<sup>-1</sup> (вес свежего урожая)/Бк кг<sup>-1</sup> (вес сухой почвы);

$S_p$  — загрязненность урожая почвой, кг (вес сухой почвы)/кг (вес свежего урожая);

$Y$  — масса урожая с единицы площади, кг/год;

$\theta_t$  — общая пористость почвы;

$\rho$  — плотность почвы, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{irr}$  — расход воды на орошение на 1 м<sup>2</sup> почвы, м<sup>3</sup>/год.

Доза внутреннего облучения от потребления продуктов животного происхождения  $D_{ж}$  [Зв/год]:

$$D_{ж} = C_{ж} \cdot m_{ж} \cdot K_{пищ}, (6)$$

где:

$C_{ж}$  — концентрация радионуклида в килограмме свежей продукции, Бк/кг;

$m_{ж}$  — годовое потребление продуктов животного происхождения лицом из возрастной группы, которая является критической по пероральному поступлению радионуклида с пищевыми продуктами, кг/год;

$K_{пищ}$  — коэффициент дозового преобразования при пероральном поступлении радионуклида, Зв/Бк.

Для расчета концентрации радионуклида в животноводческой продукции рассматриваются пути облучения животных через потребление загрязненной воды, пастбищной травы (корма) и проглатывание почвы. Концентрация радионуклида в килограмме свежей продукции животного происхождения  $C_{ж}$  [Бк/кг] рассчитывается как:

$$C_{ж} = TF_{пищ}^{ж} (C_{корм} \cdot m_{корм} + C_{вод} \cdot V_{вод} + C_{почв} \cdot m_{почв} / [(1 - \theta_t) \rho_{почв} + \theta \cdot \rho_{вод}]), (7)$$

где:

$TF_{пищ}^{ж}$  — фактор концентрации радионуклида в животном продукте, день/кг;

$C_{корм}$  — концентрация радионуклидов в корме/пастбищной траве, Бк/кг;

$m_{корм}$  — потребление корма скотом, кг/день;

$C_{вод}$  — концентрация радионуклида в воде, Бк/м<sup>3</sup>;

$V_{вод}$  — объем потребления воды скотом в день, м<sup>3</sup>/день;

$C_{почв}$  — концентрация радионуклида в единичном объеме почвы, Бк/м<sup>3</sup>;

$m_{почв}$  — масса почвы, случайно проглатываемой скотом в день, кг/день;

$\theta$  — пористость влажной почвы;

$\theta_t$  — общая пористость почвы;

$\rho_{почв}$  — плотность почвы, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{вод}$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

$$C_{корм} = (CF_{past} + S_{past}) \cdot C_{почв} / (1 - \theta_t) \rho + I_{past} \cdot V_{irr} \cdot C_{вод} / (SB_{past} \cdot W_{past} + M_{корм} \cdot SD), (8)$$

где:

$CF_{past}$  — коэффициент концентрации для пастбищ, Бк·кг<sup>-1</sup> (свежий вес пастбищной травы) / Бк·кг<sup>-1</sup> (вес сухой почвы);

$S_{past}$  — загрязнение почвы на пастбище, кг (сухая почва)/кг (свежий вес пастбищной травы);

$I_{past}$  — доля перехвата для оросительной воды на пастбищах;

$SB_{past}$  — постоянный выход травы с пастбищ, кг;

$W_{past}$  — скорость удаления оросительной воды с пастбищ за счет выветривания, год<sup>-1</sup>;

$M_{корм}$  — потребление корма скотом, кг/год;

$SD$  — количество животных в расчетной области.

Доза внутреннего облучения от непреднамеренного проглатывания почвы  $D^{потреб}_{почв}$  [Зв/год]:

$$D^{потреб}_{почв} = C_{почв} \cdot m_{почв} \cdot K_{пищ} / [(1 - \theta_t) \rho_{почв} + \theta \cdot \rho_{вод}], \quad (9)$$

где:

$C_{почв}$  — концентрация радионуклида в единичном объеме почвы, Бк/м<sup>3</sup>;

$m_{почв}$  — индивидуальный уровень годового потребления почвы, кг/год;

$\theta$  — пористость влажной почвы;

$\theta_t$  — общая пористость почвы;

$\rho_{почв}$  — плотность почвы, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{вод}$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$K_{пищ}$  — коэффициент дозового преобразования при пероральном поступлении радионуклида, Зв/Бк.

Доза внутреннего облучения от потребления рыбы (Зв/год):

$$D_{рыб} = FF_w \cdot C_{вод} \cdot CF_{аа} \cdot 10^{-3} \cdot m_{рыб} \cdot K_{пищ}, \quad (10)$$

где:

$C_{вод}$  — концентрация радионуклида в водоеме, Бк/м<sup>3</sup>;

$FF_w$  — доля активности, растворенная в водоеме (-);

$CF_{аа}$  — коэффициент концентрации для рыбы, (Бк·кг<sup>-1</sup> свежего веса съедобной части рыбы / Бк·л<sup>-1</sup> фильтрованной воды),  $10^{-3}$  — переводной коэффициент из м<sup>3</sup> в л;

$m_{рыб}$  — годовое потребление рыбы лицом из возрастной группы, которая является критической по пероральному поступлению радионуклида, кг/год;

$K_{пищ}$  — коэффициент дозового преобразования при пероральном поступлении радионуклида, Зв/Бк.

Доля активности, растворенная в водоеме:

$$FF_w = 1/(1 + K_d \cdot \alpha_w). \quad (11)$$

где:

$K_d$  — коэффициент межфазного распределения (м<sup>3</sup>/кг);

$\alpha_w$  — концентрация донного осадка, растворенная в водоеме (кг/м<sup>3</sup>).

## Приложение № 5

---

к руководству по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов», утвержденному приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 марта 2021 г. № 101.

### Перечень исходных данных и параметров, учитываемых в расчетных моделях пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов

#### 1. Исходные данные, характеризующие область источника радионуклидов:

- объем (масса) РАО;
- физическая форма и вид РАО;
- физические и химические характеристики РАО (в том числе морфологический (химический) состав РАО, плотность, содержание свободной жидкости, скорость выщелачивания, скорость газообразования (газовыделения) и состав образующихся газов, содержание окисляющих веществ, содержание органических гниющих, биологически активных и разлагающихся веществ, содержание коррозионно-активных, комплексообразующих и химически токсичных веществ);
- радиационные характеристики РАО (упаковок РАО) (радионуклидный состав, удельная, суммарная активность, содержание ядерно опасных делящихся нуклидов);
- характеристики компаунда и упаковки РАО, контейнеров РАО:
- материалы, пористость, степень заполнения упаковок РАО, массогабаритные характеристики, конструкция;
- прочностные, фильтрационные и сорбционные свойства;
- тепловыделение;
- скорость и механизмы разрушения (деградации);
- параметры, определяющие взаимодействие радиоактивного содержимого и материалов барьеров безопасности ПГЗРО, приводящие к снижению изолирующих свойств барьеров безопасности (например, вследствие газообразования, коррозии, биологических процессов):
- параметры, определяющие выход дозообразующих радионуклидов из компаундов и упаковок РАО:
- растворимость радиоактивного содержимого РАО;
- скорость выщелачивания (выхода) радионуклидов и ее изменение со временем, площадь поверхности компаунда РАО;
- скорость газообразования, объем и скорость выхода образующихся газов;
- характеристики, определяющие образование комплексных соединений, перенос радионуклидов в коллоидной форме, выпадение в осадок и кристаллизацию РАО.

При определении исходных данных, характеризующих область источника радионуклидов для эксплуатируемых ПГЗРО, рекомендуется учитывать состояние РАО, в том числе компаундов и упаковок РАО, контейнеров и их изменение со временем вследствие процессов, происходящих в системе захоронения РАО.

2. Исходные данные, характеризующие инженерные барьеры безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов:

- состав и характеристики системы инженерных барьеров безопасности;
- конструкция и геометрические характеристики инженерных барьеров безопасности;
- конструкционные материалы;
- защитные, задерживающие, прочностные, изолирующие характеристики барьеров безопасности, в том числе относящиеся к их долговременной стабильности в условиях захоронения:
- механические, радиационные и тепловые воздействия;
- гидравлические и гидрогеологические процессы и условия;
- химические и геохимические процессы и условия;
- биохимические процессы и условия;
- тепловые процессы и условия (теплоемкость, теплопроводность среды);
- механизмы и условия разрушения (деградации).

Исходные данные, характеризующие свойства конструкционных материалов инженерных барьеров безопасности ПГЗРО, их защитные, задерживающие, прочностные и изолирующие свойства и их изменение со временем включают в том числе:

- пористость, плотность;
- водопроницаемость (коэффициент фильтрации);
- эффективный коэффициент диффузии дозообразующих радионуклидов;
- коэффициент распределения дозообразующих радионуклидов в материалах инженерных барьеров безопасности;
- скорость коррозии бетонных и металлических элементов (арматуры, конструкций, контейнеров).

При определении исходных данных, характеризующих инженерные барьеры эксплуатируемых ПГЗРО, рекомендуется учитывать состояние барьеров безопасности ПГЗРО и их изменение со временем вследствие процессов, происходящих в системе инженерных барьеров ПГЗРО.

3. Исходные данные, характеризующие геологические и гидрогеологические характеристики пород, не измененных и измененных в процессе сооружения и эксплуатации пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов:

- тип и минералогический состав пород, их петрографическое описание;
- плотность, пористость и влажность пород;
- мощности рассматриваемых водоносных горизонтов;

- химический состав подземных вод, кислотнo-щелочные и окислительно-восстановительные условия среды;
- радионуклидный состав вод;
- величина напоров для рассматриваемых водоносных горизонтов;
- коэффициенты фильтрации для рассматриваемых водоносных горизонтов и для зоны аэрации;
- коэффициенты межфазного распределения радионуклидов в породах;
- коэффициенты продольной и поперечной дисперсии;
- коэффициенты диффузии в рассматриваемых водоносных горизонтах и разделяющих толщах (водоупорных горизонтах);
- характеристика водоупорных горизонтов (минералогический состав, глубина залегания, мощность, плотность, пористость, влажность, наличие фильтрационных окон).

При эксплуатации ПГЗРО рекомендуется учитывать возможные изменения приведенных исходных данных со временем в связи с изменениями геологических и гидрогеологических условий в ближней зоне ПГЗРО, вызванными сооружением и эксплуатацией ПГЗРО.

4. Исходные данные, характеризующие условия (район и площадку) размещения пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов:

- данные о физико-географических условиях: карта рельефа, геоморфологическая характеристика района, метеорологические данные (количество осадков, распределение осадков в течение года, испарение, среднегодовая и среднесезонная температура воздуха, преобладающее направление ветра, глубина промерзания или оттаивания), описание поверхностных водоемов и водотоков, модуль поверхностного стока рассматриваемого района;
- геологические данные: геологические, структурные и тектонические карты, геологические разрезы, стратиграфические колонки, характеристики горных пород;
- гидрогеологические данные: карты, гидрогеологические разрезы, описание областей питания и разгрузки подземных вод, направление движения потока, данные режимных наблюдений за динамикой, химическим и радионуклидным составом;
- данные о возможных внешних воздействиях природного происхождения (например, землетрясения, смерчи, затопления, эрозия, карстово-суффозионные процессы);
- данные о возможных внешних воздействиях техногенного происхождения;
- демографические данные (численность и плотность населения в пределах района размещения ПГЗРО, характер земле- и водопользования, рацион питания населения).



## Приложение № 6

к руководству по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов», утвержденному приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 марта 2021 г. № 101.

### Блок-схема разработки расчетной модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов

Блок-схема разработки расчетной модели ПГЗРО представлена на рис. 1.

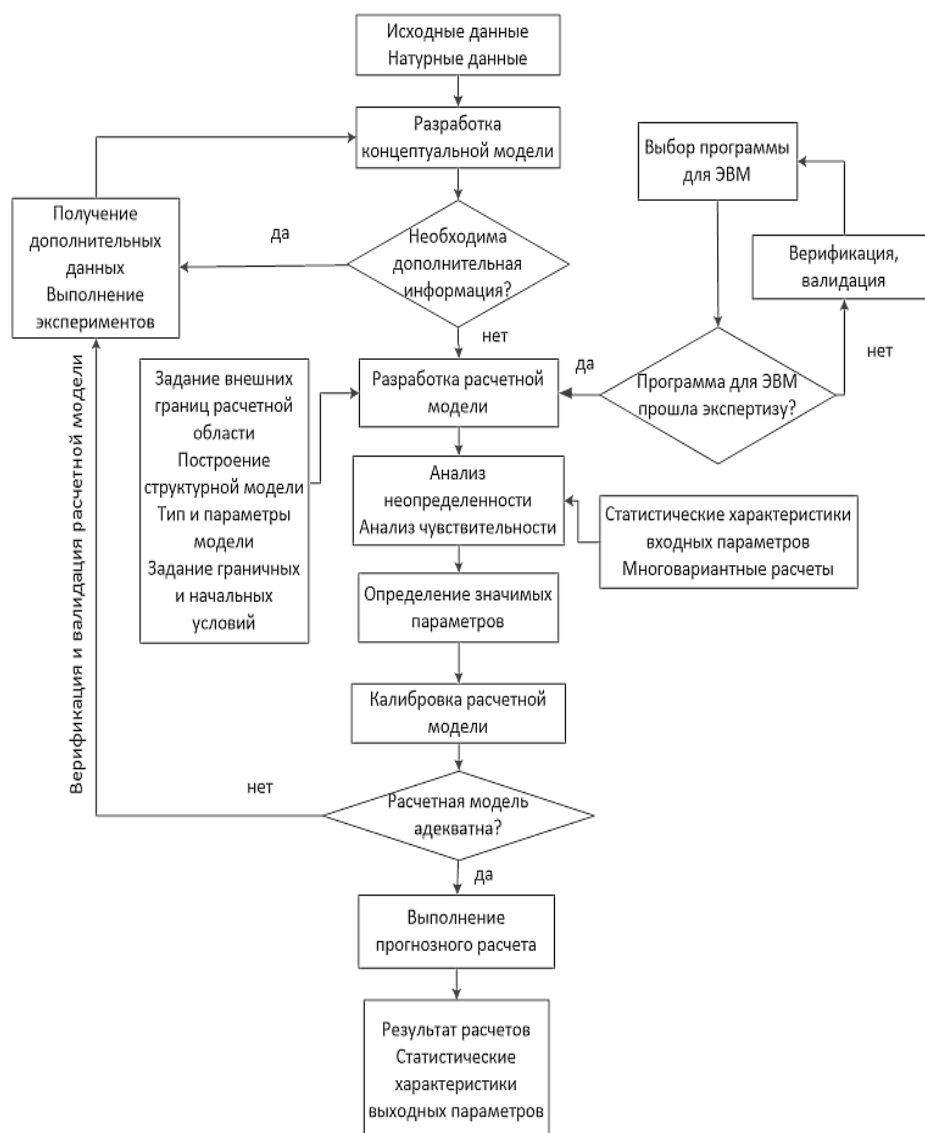


Рис. 1. Блок-схема разработки расчетной модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов

## Приложение № 7

---

к руководству по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов», утвержденному приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 марта 2021 г. № 101.

### Пример выполнения прогнозного расчета оценки долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов

1. Разработка основных положений оценки долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов

1.1. Цели и используемые подходы к выполнению прогнозного расчета оценки долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

Настоящий пример приводится с целью демонстрации методики выполнения оценки долговременной безопасности ПГЗРО, в том числе выполнения прогнозного расчета миграции радионуклидов из референтного ПГЗРО в окружающую среду.

Ключевым элементом прогнозного расчета оценки долговременной безопасности ПГЗРО является создание расчетной модели миграции радионуклидов в геологической среде вмещающих ПГЗРО пород.

Прогнозный расчет оценки долговременной безопасности ПГЗРО в рамках настоящего примера выполняется с использованием консервативного подхода.

Учитывается только возможное радиационное воздействие ПГЗРО на население.

1.2. Критерии долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов и искомые параметры.

В соответствии с санитарными правилами и нормативами СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)», утвержденными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26 апреля 2010 г. № 40 (зарегистрировано Минюстом России 11 августа 2010 г., регистрационный № 18115), годовая эффективная доза облучения критической группы населения за счет РАО после их захоронения не должна превышать 10 мкЗв.

1.3. Характеристика критической группы населения.

Предполагается нахождение критической группы населения (семейного фермерского хозяйства) в районе размещения ПГЗРО. Для ведения натурального сельского хозяйства представители критической группы используют подземные воды района размещения ПГЗРО. Предполагается, что подземные воды района размещения ПГЗРО могут быть загрязнены в результате миграции радионуклидов из ПГЗРО.

Учитываются следующие основные пути облучения критической группы населения:

- внешнее облучение от загрязненной радионуклидами поверхности земли;
- внутреннее облучение ингаляционным путем;

- потребление растительной пищи, выращенной на загрязненной почве;
- потребление мясомолочной продукции, произведенной от животных, вскормленных на загрязненной территории;
- потребление и использование воды, загрязненной радионуклидами;
- непреднамеренное поступление радиоактивных веществ в организм.

1.4. Временные периоды прогнозного расчета оценки долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

Принимаются следующие временные периоды прогноза:

- период активного административного контроля — 100 лет;
- период пассивного административного контроля — 200 лет;
- расчетный период —  $10^7$  лет (период времени выбран с целью учета радиационного воздействия на критическую группу населения долгоживущих радионуклидов).

2. Сбор и подготовка исходных данных о характеристиках пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов и условиях его размещения.

2.1. Характеристики референтного пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

ПГЗРО предназначен для глубинного захоронения РАО класса 1. Захоронение РАО класса 1 в ПГЗРО осуществляется на глубине около 500 м в вертикальных скважинах.

Суммарная активность РАО в ПГЗРО —  $4 \cdot 10^{17}$  Бк.

Объем РАО — 4500 м<sup>3</sup>.

Условный радионуклидный состав РАО: <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>14</sup>C, <sup>79</sup>Se, <sup>99</sup>Tc, <sup>129</sup>I, <sup>36</sup>Cl, <sup>135</sup>Cs.

Система инженерных барьеров безопасности ПГЗРО включает:

- форму РАО — стеклоподобный компаунд;
- упаковку РАО — стальной бидон;
- контейнер — стальной пенал, вмещающий 3 бидона;
- буферный материал — смесь бентонитовой глины и извлеченной горной породы.

Буферным материалом заполняются зазоры между контейнерами и стенками вертикальных скважин, в которые размещаются контейнеры, а также тоннель, через который осуществляется загрузка контейнеров РАО в ячейки захоронения.

2.2. Характеристики условий размещения пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

Создание ПГЗРО предусмотрено в массиве кристаллических горных пород с развитой системой неактивных тектонических нарушений.

ПГЗРО располагается в горных породах на глубине около 500 м. В 4 км к западу от ПГЗРО протекает река — региональная дрена, которая в свою очередь имеет 3 притока — локальные дрены. Абсолютные отметки рельефа от 110 до 460 м. Гидрогеологический массив представляет собой зону интенсивного водообмена, приуроченного к водосборному бассейну

выделенных водотоков, в пределах которого осуществляется питание, транзит и разгрузка подземных вод.

Породы, слагающие массив, по глубине отличаются фильтрационными и миграционными свойствами, на основании чего выделяются выдержанные по мощности слои с характерным набором параметров.

Верхний слой состоит из рыхлых четвертичных отложений мощностью 15 м. Нижележащие четыре слоя мощностью 50, 100, 250 и 250 м состоят из гнейсов разной степени выветривания. Проницаемость слоев уменьшается с глубиной, при этом зоны неактивных тектонических нарушений в гнейсах имеют более высокую проницаемость и при моделировании рассматриваются как отдельные элементы.

Район размещения ПГЗРО относится к 6-балльной зоне для проектного землетрясения с расчетным периодом повторяемости — 1 раз в 1 000 лет и к 7-балльной зоне для максимального расчетного землетрясения с расчетным периодом повторяемости — 1 раз в 10 000 лет.

### 3. Разработка и обоснование сценариев эволюции системы захоронения РАО.

В рамках настоящего примера рассмотрен сценарий наиболее вероятной эволюции системы захоронения РАО (сценарий нормальной эволюции).

Предполагается следующая последовательность событий, явлений и факторов, происходящих в системе захоронения РАО:

- контакт контейнеров и упаковок РАО с подземными водами;
- коррозия стальных контейнеров;
- выход радионуклидов из стеклоподобных компаундов;
- миграция радионуклидов через инженерные барьеры безопасности ПГЗРО;
- поступление радионуклидов во вмещающий горный массив;
- миграция радионуклидов в геологической среде;
- поступление радионуклидов в первый от дневной поверхности постоянно действующий водоносный горизонт;
- использование вод водоносного горизонта критической группой населения в качестве источника хозяйственно-бытового водоснабжения.

Учитываются следующие процессы, происходящие в системе захоронения РАО:

- фильтрация в насыщенно-ненасыщенной среде;
- адвективно-диффузионно-дисперсионный перенос;
- радиоактивный распад, в том числе с учетом цепочек распада;
- равновесная обратимая сорбция, описываемая изотермой Генри, с постоянным коэффициентом распределения.

### 4. Разработка и обоснование концептуальных моделей пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

При выполнении прогнозного расчета оценки долговременной безопасности ПГЗРО сделаны следующие допущения.

Предполагается, что площадка размещения ПГЗРО не может использоваться людьми для проживания в течение периода административного контроля. После его окончания предполагается поселение людей в районе размещения ПГЗРО и ведение этими людьми натурального сельского хозяйства. На весь период оценки (расчетный период) рацион питания, образ жизни и уклад сельского населения остается неизменным.

Предполагается, что поверхностный слой почвы изначально не загрязнен радионуклидами. Загрязнение почв происходит при использовании для орошения загрязненных грунтовых вод, забираемых из водозаборной скважины.

Предполагается, что в районе размещения ПГЗРО в будущем не будет проводиться добыча полезных ископаемых, городское и промышленное строительство.

При разработке концептуальной модели ПГЗРО выполнен анализ существующих фактических данных, в том числе геологических, геоморфологических, тектонических, данных бурения, гидрогеологических данных территории размещения объекта. Основные этапы создания концептуальной модели включают:

- Выбор схематизации будущей модели.
- Обоснование граничных условий.
- Определение параметров и исходных данных, которые необходимо учесть в расчетной модели.

Выбор фактических данных для последующей калибровки модели.

Для создания расчетной модели референтного ПГЗРО:

- был определен и проанализирован ряд публикаций, статей, справочной литературы;
- проанализированы геологические, гидрогеологические, тектонические карты района моделирования.

Схематично концептуальная модель системы захоронения РАО приведена на рис. 1.

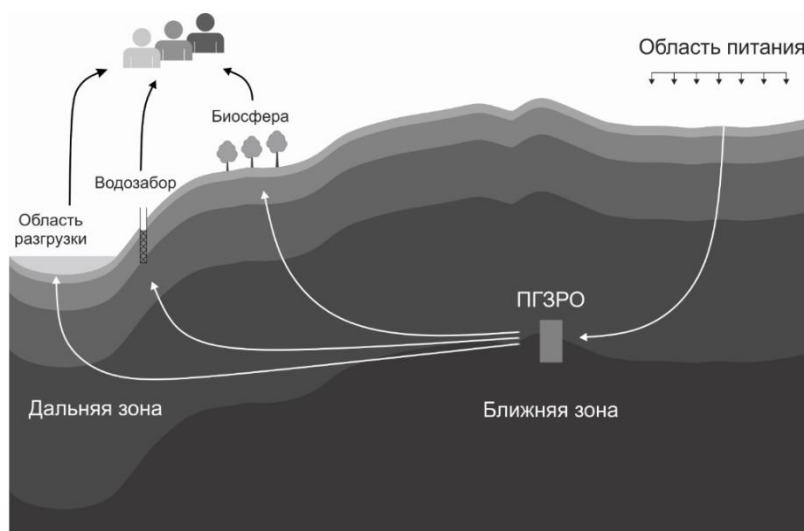


Рис. 1. Концептуальная модель системы захоронения РАО

5. Разработка математических моделей процессов, влияющих на долговременную безопасность пункта глубокого захоронения радиоактивных отходов.

5.1. Математическая модель выхода радионуклидов из пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

Изменение активности радионуклидов в источнике РАО вследствие выхода радионуклидов из источника РАО и радиоактивного распада в рамках настоящего примера задается упрощенно и определяется следующим образом:

$$\frac{dA_l}{dt} = -\frac{v_l}{\phi \cdot L_l} \cdot \frac{A_l}{R} - \lambda \cdot A_l, (1)$$

где:

$A_l$  — активность радионуклида в источнике РАО, Бк;

$v_l$  — скорость фильтрации, м/год;

$\phi$  — пористость материала;

$L_l$  — длина пути миграции, м;

$\lambda$  — постоянная радиоактивного распада, 1/год.

Безразмерный коэффициент задержки  $R$  определяется следующим образом:

$$R = 1 + \frac{\rho \cdot K_d}{\phi}, (2)$$

где:

$\rho$  — средняя плотность материала источника РАО, кг/м<sup>3</sup>;

$K_d$  — коэффициент межфазного распределения компаунда, м<sup>3</sup>/кг;

Решением уравнения (1) является выражение:

$$A_l(t) = A_0 \cdot \exp(-a_l \cdot t), (3)$$

где  $A_0$  — исходная активность источника РАО, Бк.

Параметр  $a_l$  определяется следующим образом:

$$a_l = \frac{v_l}{\phi \cdot L_l \cdot R} + \lambda. (4)$$

Интенсивность выхода радионуклидов из источника РАО  $Q_l(t)$  определяется следующим образом:

$$Q_l(t) = \frac{A_l(t)}{R} \cdot \frac{v_l}{\phi \cdot L_l}. (5)$$

5.2. Математическая модель миграции радионуклидов в геологической среде.

Модель напорной фильтрации.

Процесс напорной фильтрации жидкости описывается законом сохранения массы (уравнением неразрывности):

$$s_{stor} \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = Q, \quad (6)$$

где:

$s_{stor}$  — коэффициент упругости, определяемый как объем высвободившейся жидкости в единичном объеме насыщенной пористой среды при единичном понижении напора;

$h$  — напор;

$Q$  — источники и стоки (ими могут служить скважины и дренажи,  $Q = q_{well} + q_{drain}$ );

$K$  — тензор фильтрации;

$\vec{u}$  — вектор скорости фильтрационного потока, определяемый законом Дарси:

$$\vec{u} = -K \nabla h. \quad (7)$$

Модель адвективно-дисперсионно-диффузионного переноса с сорбцией по линейной изотерме и радиоактивным распадом.

Данная модель является основной при моделировании процессов геомиграции. Она описывается уравнением:

$$R\phi \frac{\partial C}{\partial t} - \nabla \cdot D \nabla C + \nabla (\vec{u} C) + \lambda \phi R C = f, \quad (8)$$

где:

$R$  — фактор замедления (если используется модель сорбции по изотерме Генри);

$C$  — концентрация растворенного вещества;

$D$  — тензор диффузии-дисперсии;

$\lambda$  — константа распада, связанная с периодом полураспада  $t$  соотношением  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ . Отметим, что в насыщенных условиях скорость Дарси связана с действительной скоростью фильтрации  $\vec{v}$  соотношением  $\vec{u} = \phi \vec{v}$ .

Модель переноса с учетом цепочек радиоактивного распада основана на уравнении:

$$R\phi \frac{\partial C_i}{\partial t} - \nabla \cdot D \nabla C_i + \nabla (\vec{u} C_i) = f + R_{C_i}(C, x, t), \quad (9)$$

в котором учтена сорбция, а  $R_{C_i}$  включает источники и стоки, обусловленные радиоактивным распадом изотопов и образованием дочерних элементов.

6. Разработка расчетной модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов с использованием программ для электронных вычислительных машин.

Для выполнения прогнозных расчетов выхода радионуклидов из источника РАО использовалась программа для ЭВМ, реализующая метод камерного моделирования.

Для выполнения расчетов миграции радионуклидов в геологической среде использовалась программа для ЭВМ, реализующая метод конечных объемов, предназначенная для трехмерного геофильтрационного и геомиграционного моделирования.

6.1. Разработка геологической модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

Начальным этапом разработки геологической модели ПГЗРО является определение границ расчетной области.

Предварительно выполнен ряд промежуточных действий, в частности, подготовлена цифровая модель рельефа.

Для создания цифровой модели референтного ПГЗРО использованы данные радиолокационной топографической съемки поверхности Земли.

Граница расчетной области была построена по цифровой модели рельефа с использованием специализированной программы.

Принятые размеры области расчетного моделирования в плане соответствуют водосборному бассейну участка региональной дрены, в пределах которой расположена площадка ПГЗРО. Размеры области моделирования приняты 17,5×8,3 км (рис. 2).

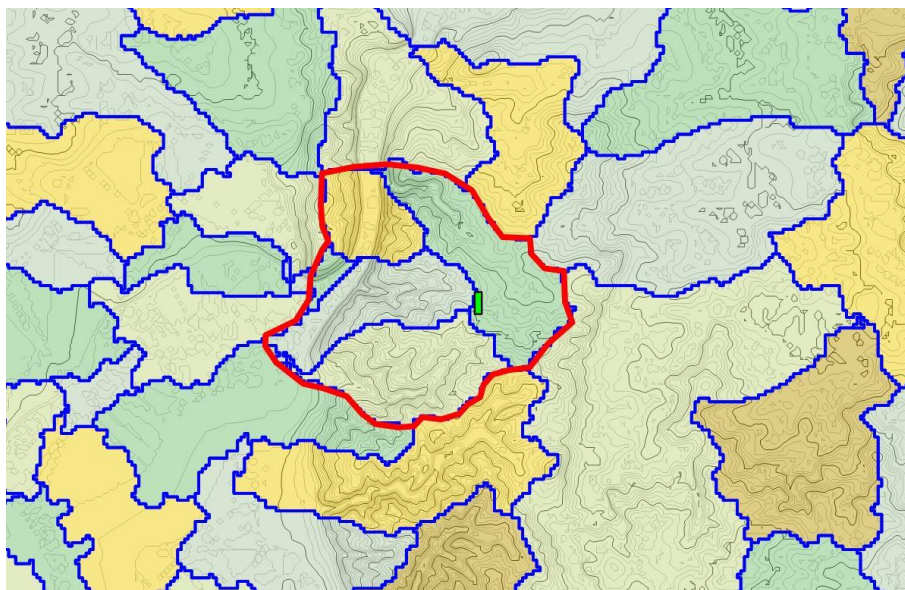


Рис. 2. Границы расчетной области с выделением водосборных бассейнов

Для создания геологической модели ПГЗРО рассматриваемого района выполнен анализ геологических карт дочетвертичных отложений, а также анализ геологических карт четвертичных отложений в области размещения долин временных и постоянных водотоков, попадающих в границы области расчетного моделирования.

Были использованы современные границы природных водоемов и водотоков, чье влияние необходимо учитывать, и обобщены данные, представленные в фондовых материалах.

Исходными данными для выделения слоев геологической модели служили геологические карты и фондовые данные.

На основе вышперечисленных данных была принята геологическая схематизация, которая описана послойно сверху вниз:



- слой 1 — интенсивно выветренная зона мощностью 15 м;
- слой 2 — менее выветренная переходная зона с мощностью 50 м;
- слои 3, 4 и 5 — гнейс с различными фильтрационными параметрами по глубине мощностью соответственно 100, 250 и 250 м.

На глубине 400 м от поверхности, между 5 и 6 слоями, была задана зона размещения РАО, которая геометрически представляет собой параллелепипед размерами 400x700x75 м (рис. 3).

Для учета в модели тектонических нарушений были использованы картографические фондовые материалы. Зоны деформаций задавались как неоднородность со своим набором параметров (рис. 4).

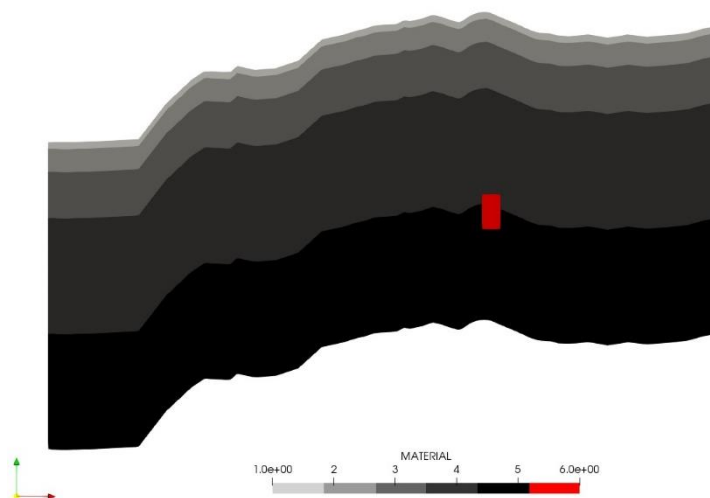


Рис. 3. Геологическая модель референтного пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов

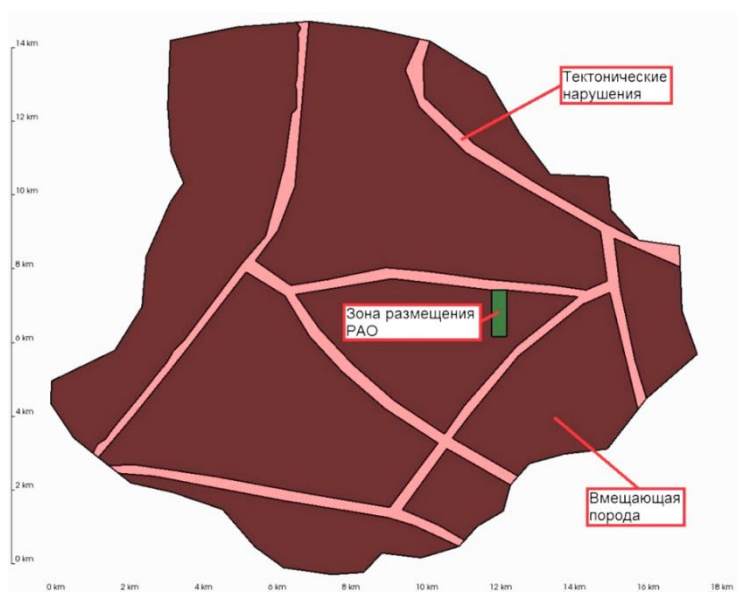


Рис. 4. Плановый вид выделенных тектонических нарушений

На основе фондовых материалов рассматриваемого района была составлена трехмерная геологическая модель, необходимая для создания геофильтрационной и геомиграционной моделей (рис. 5).

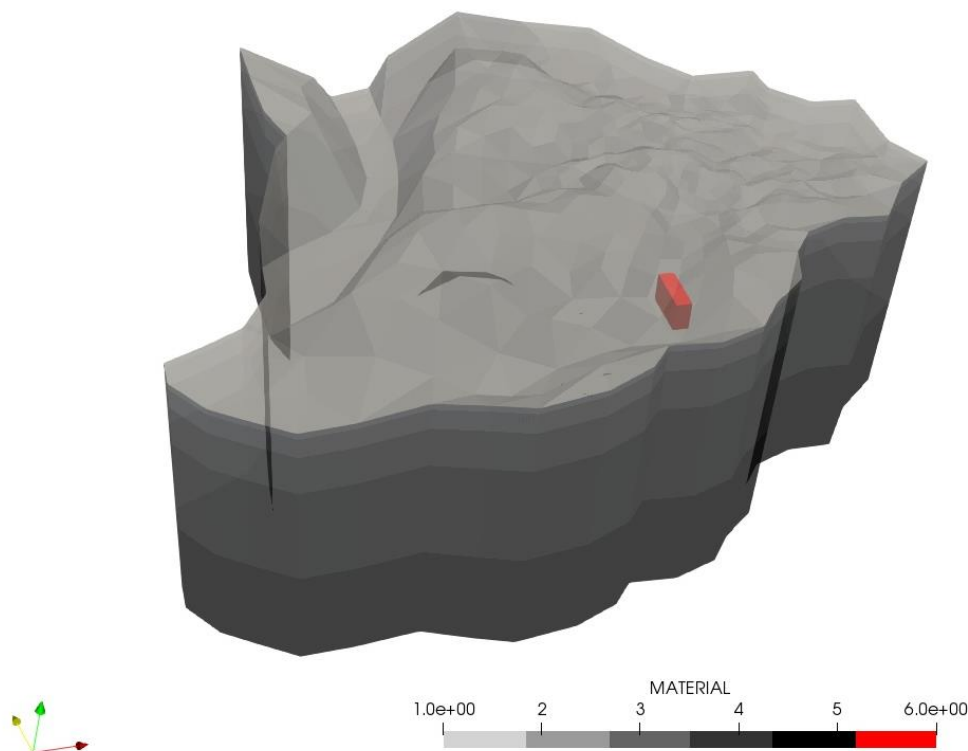


Рис. 5. Трехмерная геологическая модель референтного пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов

6.2. Разработка геофильтрационной модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

6.2.1. Пространственная структура геофильтрационного потока.

Пространственная структура геофильтрационного потока в рассматриваемом районе принята трехмерной: поток подземных вод распространяется как в плане – от водоразделов к дренам, так и в разрезе.

Границы водоемов задавались в модели в соответствии с их современным состоянием.

Преимущественно плановое движение потока подземных вод происходит по хорошо проницаемым четвертичным отложениям, а также по зоне трещиноватых гнейсов.

6.2.2. Граничные условия геофильтрационного потока.

Моделируемым районом является водосборная площадь участка реки, в пределах которой находится площадка размещения ПГЗРО. На всей границе водосборного бассейна (по водоразделу) в модели было задано граничное условие II рода (непроницаемая граница, расход  $Q = 0$ ). Исключением были приняты места пересечения реки (региональной дрены) и границы модели, для которого было задано граничное условие I рода с заданным напором ( $H = \text{const}$ ).

Основным источником питания подземных вод является инфильтрационное питание.

В рассматриваемой гидродинамической модели водотоки и водоемы соответствуют граничному условию III рода.

Инфильтрационное питание было задано равномерным для всей области моделирования с учетом эвапотранспирации.

### 6.2.3. Геофильтрационные параметры.

После создания геологической модели рассматриваемого района фильтрационные параметры каждого из модельных слоев задавались в соответствии с фильтрационными свойствами пород и зон тектонических нарушений (таблица № 1).

Таблица № 1. Фильтрационные параметры геофильтрационной модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов

Параметры фильтрации	Слой 1	Слой 2		Слой 3		Слой 4		Слой 5		Зона ПГЗРО
	Порода	Порода	Тектонические нарушения	Порода	Тектонические нарушения	Порода	Тектонические нарушения	Порода	Тектонические нарушения	Порода
Горизонтальный $K_f$ , м/сут	0,3	0,15	5e-3	1e-3	5e-3	5e-4	5e-3	3e-4	1e-3	3e-4
Вертикальный $K_f$ , м/сут	0,1	1e-3	5e-3	1e-4	5e-3	1e-5	5e-3	1e-5	1e-3	1e-5
Пористость каналов	0,4	0,05	0,33	0,012	0,08	4e-3	0,02	2e-3	6e-3	2e-3
Пористость матрицы	0,4	0,1	0,33	0,1	0,08	0,1	0,02	0,1	6e-3	0,1
Коэффициент упругой емкости	1e-6	1e-10	1e-10	1e-10	1e-10	1e-10	1e-10	1e-10	1e-10	1e-10

### 6.3. Разработка геомиграционной модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

При моделировании миграции радионуклидов в геологической среде учитывались следующие механизмы массопереноса и физико-химические процессы:

- адвекция;
- молекулярная диффузия;
- гидродинамическая дисперсия;
- радиоактивный распад с учетом цепочек;
- сорбция (по изотерме Генри).

Геомиграционное моделирование проводилось на основе трехмерной геофильтрационной модели в нестационарной постановке. При прогнозном геомиграционном моделировании проводились расчеты распространения радионуклидов на  $10^7$  лет.

При моделировании миграции в рассматриваемых породах (гнейсы с переменной трещиноватостью) применена модель двойной пористости, в которой учитывается наличие в одном

материале двух составляющих: канала и матрицы. Для каждого из материалов задаются свои параметры: пористость, коэффициент распределения.

В геомиграционной модели референтного ПГЗРО коэффициент распределения (как для матрицы, так и для каналов) для каждого радионуклида задавался единым. Это обусловлено тем, что порода, в которой расположен ПГЗРО, непроницаемая. Фильтрация идет по крупным трещинам (каналам) и зонам выветрелости вдоль трещин (матрица). Только поверхность породы участвует в ионном обмене.

Коэффициенты распределения, используемые в геомиграционной модели ПГЗРО, приведены в таблице № 2.

Таблица № 2. Значения коэффициентов распределения в горных породах

Радионуклид	Kd*, м <sup>3</sup> /кг
<sup>238</sup> U	0,003
<sup>14</sup> C	0,0
<sup>79</sup> Se	0,005
<sup>99</sup> Tc	0,0004
<sup>129</sup> I	0,0006
<sup>235</sup> U	0,003
<sup>36</sup> Cl	0,0002
<sup>135</sup> Cs	0,1

\* Radionuclide sorption from safety evaluation perspective. Proceedings of an NEA Workshop, Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. 1992.

#### 6.4. Анализ чувствительности и неопределенности модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

В настоящей работе используется вариационный подход к оценке чувствительности, который предполагает, что вариация выходного результата характеризует его неопределенность, а вклад входного параметра в эту вариацию определяет меру чувствительности модели к его изменению.

В рамках многовариантных расчетов было построено более 4000 наборов параметров расчетной модели ПГЗРО, удовлетворяющих наложенным на значения взаимным ограничениям. Рассчитывались значения удельных активностей радионуклидов в точке наблюдения вплоть до 10000 лет. Расположение точки наблюдения приведено на рис. 6.

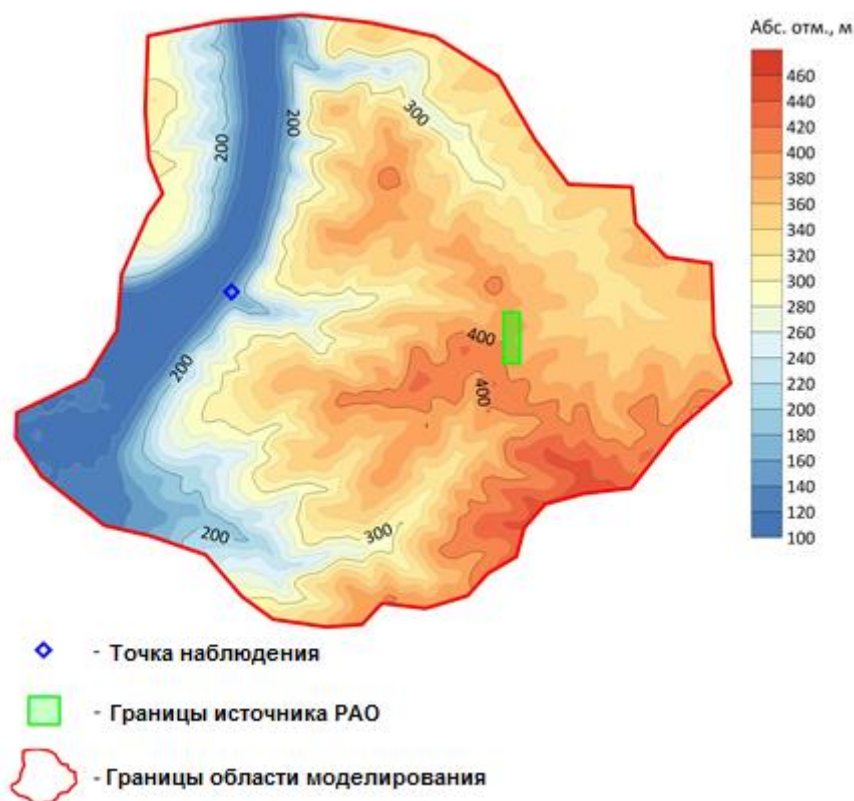


Рис. 6. Расположение точки наблюдения

Оценка чувствительности выполнена с использованием вариационного метода Соболя (индекс полного вклада). В качестве примера на рис. 7 приведены полученные значения индексов полного вклада параметров модели для радионуклида  $^{36}\text{Cl}$ . На рис. 8 приведен прямой вклад параметров модели в неопределенность расчетной оценки для  $^{36}\text{Cl}$  (белый участок на круговой диаграмме свидетельствует о присутствии совместного влияния групп параметров).

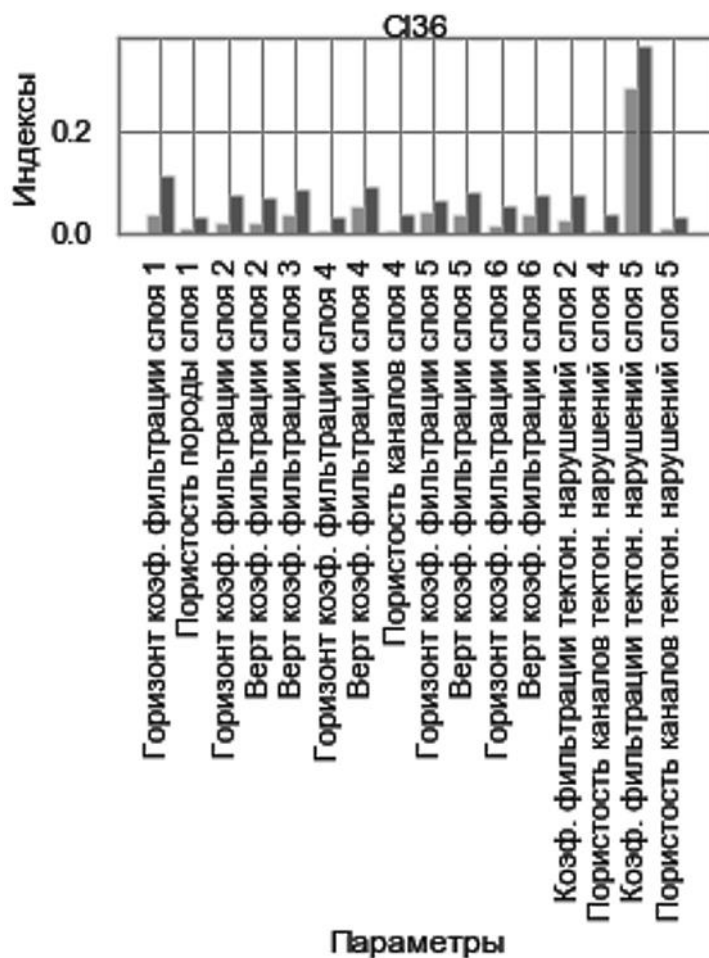


Рис. 7. Индексы полного вклада параметров модели

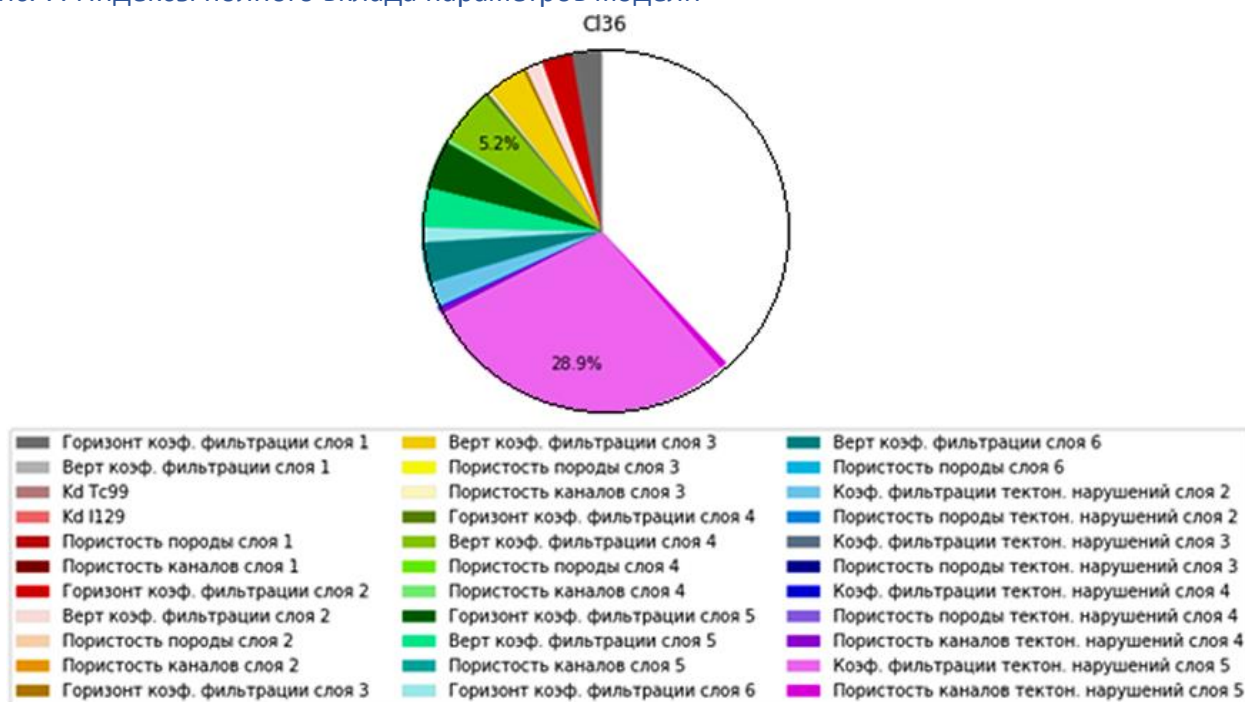


Рис. 8. Прямой вклад параметров модели в неопределенность расчетной оценки (на примере <sup>36</sup>Сi)

Из результатов оценки чувствительности расчетной модели следует, что коэффициенты фильтрации в разных слоях расчетной модели являются входными параметрами, которые оказывают наибольшее влияние на результат прогнозного расчета.

6.5. Калибровка геофильтрационной модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

Калибровка параметров фильтрации проводилась на основе общего представления о структуре потока подземных вод: поверхность вод повторяет поверхность рельефа, фильтрационный поток имеет направление от водораздела к дренам.

7. Анализ результатов прогнозного расчета оценки долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

В результате прогнозного моделирования были получены ореолы распространения радионуклидов во вмещающих породах. На рис. 9 приведено распределение объемной активности радионуклида  $^{14}\text{C}$ .

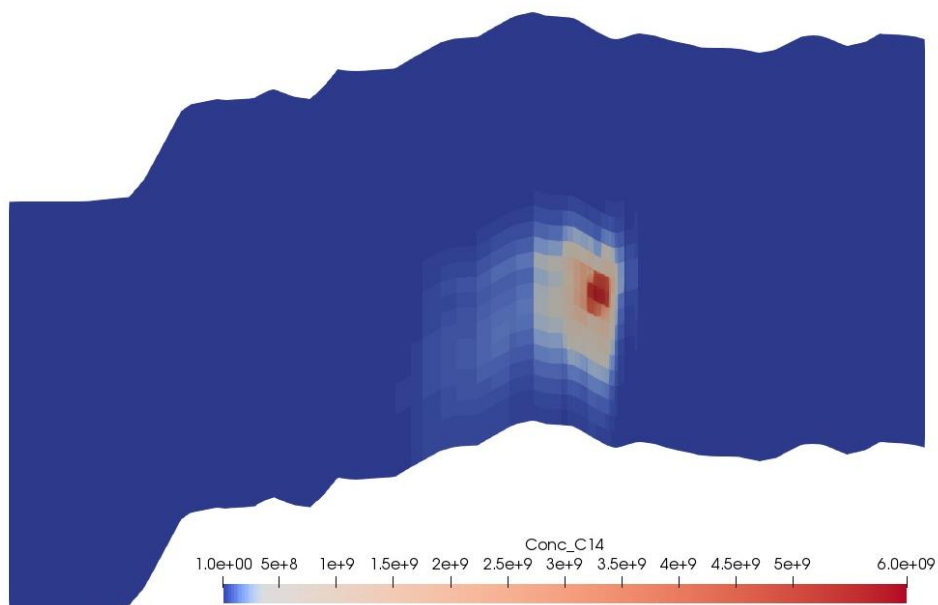


Рис. 9. Распределение объемной активности (Бк/м $^3$ )  $^{14}\text{C}$  во вмещающих породах в момент времени  $t = 10\,000$  лет

Объемные активности радионуклидов в зависимости от времени в точке наблюдения приведены на рис. 10.

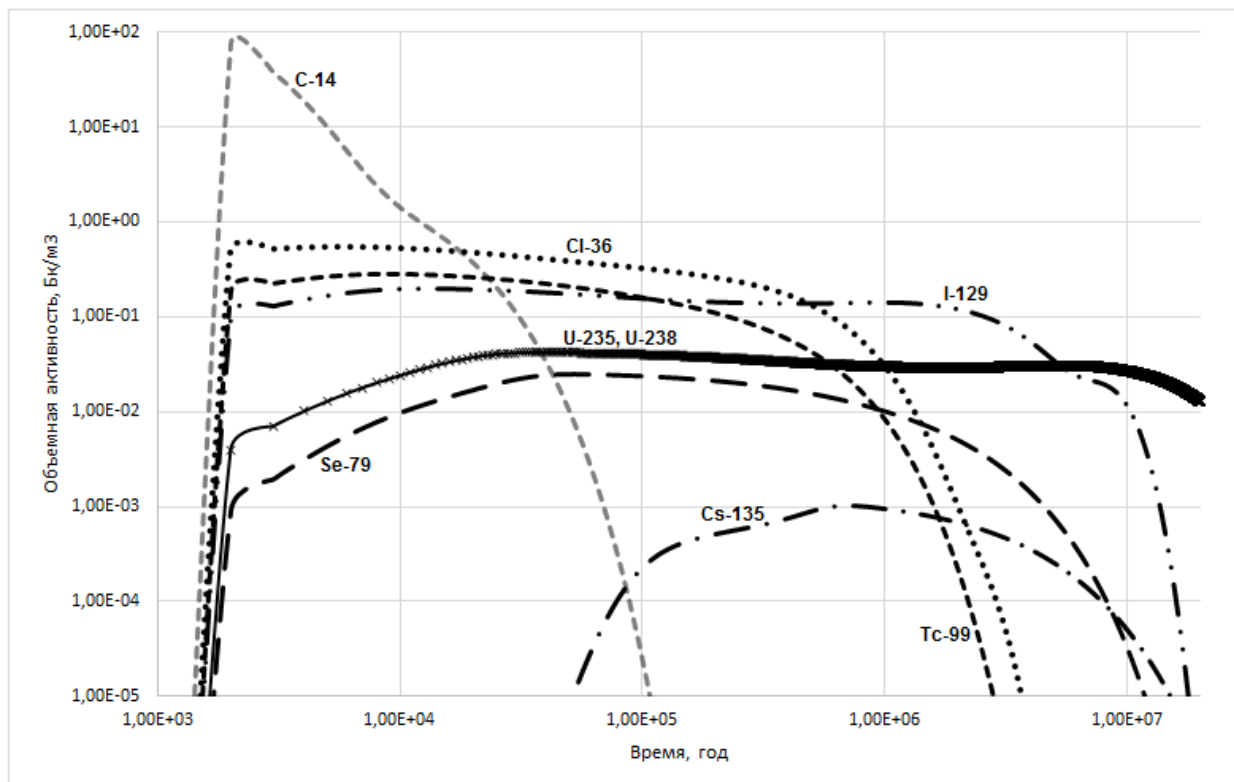


Рис. 10. Объемные активности радионуклидов в точке наблюдения

В таблице № 3 приведены средние значения и диапазоны значений объемной активности радионуклидов на момент времени  $10^4$  лет.

Таблица № 3. Средние значения и диапазоны значений объемной активности радионуклидов

Радионуклид	Среднее значение объемной активности, Бк/м <sup>3</sup>	Нижний 95 % предел значений объемной активности, Бк/м <sup>3</sup>	Верхний 95 % предел значений объемной активности, Бк/м <sup>3</sup>
<sup>238</sup> U	7,23e-07	0,00e+00	1,49e-06
<sup>14</sup> C	1,19e-01	0,00e+00	3,15e-01
<sup>129</sup> I	2,70e+03	1,89e+03	3,52e+03
<sup>79</sup> Se	2,53e-11	1,80e-11	3,27e-11
<sup>99</sup> Tc	7,66e+02	5,13e+02	1,02e+03
<sup>235</sup> U	3,76e-13	6,53e-14	6,88e-13
<sup>36</sup> Cl	4,61e+03	4,33e+03	4,90e+03
<sup>135</sup> Cs	2,05e-45	0,00e+00	5,04e-45

Для расчета индивидуальных годовых эффективных доз облучения, получаемых критической группой населения, проживающей вблизи области разгрузки подземных вод, в результате потребления загрязненной воды и продуктов питания, а также внешнего облучения использовались коэффициенты, приведенные в таблицах № 4, 5.



Таблица № 4. Дозовые коэффициенты внутреннего и внешнего облучения для продуктов растительного и животного происхождения, растительного корма и рыбы

Радионуклид	Период полураспада, лет	Дозовые коэффициенты облучения для случая пребывания у поверхности загрязненной воды**, (Зв ч <sup>-1</sup> )/(Бк м <sup>3</sup> ))	Дозовые коэффициенты облучения для случая пребывания на поверхности загрязненной почвы**, (Зв ч <sup>-1</sup> )/(Бк м <sup>3</sup> ))	Коэффициент внутреннего облучения при поступлении в организм радионуклида ингаляционным путем**, Зв/Бк	Коэффициент внутреннего облучения при поступлении в организм радионуклида пероральным путем**, Зв/Бк
<sup>238</sup> U	4,47E+09	1,1E-14	1,99E-18	3,4E-06	1,2E-7
<sup>14</sup> C	5,73E+03	1,6E-18	2,59E-19	2,5E-09	1,6E-09
<sup>129</sup> I	1,57E+07	3,2E-15	2,49E-16	6,7E-08	1,9E-7
<sup>79</sup> Se	6,5E+04	2,13E-18	3,59E-19	5,6E-09	2,8E-08
<sup>99</sup> Tc	2,13E+05	1,1E-17	2,41E-18	5,0E-09	4,8E-9
<sup>235</sup> U	7,04E+08	6,2E-14	1,35E-14	3,7E-06	1,3E-7
<sup>36</sup> Cl	3,01E+05	1,6E-16	7,5E-14	8,8E-09	6,3E-09
<sup>135</sup> Cs	2,30E+06	3,96E-19	7,38E-19	6,9E-10	2,0E-9

\*\* НРБ 99/2009 «Нормы радиационной безопасности»; Keith F. Eckerman and Jeffrey C. Ryman. External exposure to radionuclides in air, water, and soil. September, 1993; Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Vol. 1, 2, IAEA, VIENNA, 2004.

Таблица № 5. Коэффициенты реконцентрации для продуктов растительного и животного происхождения, растительного корма и рыбы

Радионуклид	Период полураспада, лет	Коэффициент реконцентрации для растительного корма*** (Бк/кг свежего веса в расчете на Бк/кг сухого веса почвы)	Коэффициент реконцентрации в продукте животного происхождения*** (день/кг свежего веса продукта)	Коэффициент реконцентрации в растениях представляет собой отношение удельной активности*** (Бк/кг свежего веса к удельной активности почвы, Бк/кг сухого веса)
<sup>238</sup> U	4,47E+09	1,0E-3	3,9E-4	2,5E-3
<sup>14</sup> C	5,73E+03	0,1	0,12	0,1
<sup>129</sup> I	1,57E+07	0,1	6,7E-3	2,0E-2
<sup>79</sup> Se	6,5E+04	1,0E-3	1,0E-2	0,1
<sup>99</sup> Tc	2,13E+05	10	1,0E-4	5
<sup>235</sup> U	7,04E+08	1,0E-3	3,9E-4	2,5E-3
<sup>36</sup> Cl	3,01E+05	5	1,7E-2	5
<sup>135</sup> Cs	2,30E+06	3,0E-2	2,2E-2	4,0E-2

\*\*\* НРБ 99/2009 «Нормы радиационной безопасности»; Keith F. Eckerman and Jeffrey C. Ryman. External exposure to radionuclides in air, water, and soil. September 1993; Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Vol. 1, 2, IAEA, VIENNA, 2004.

Результаты расчета индивидуальных годовых эффективных доз облучения критической группы населения приведены на рис. 11.

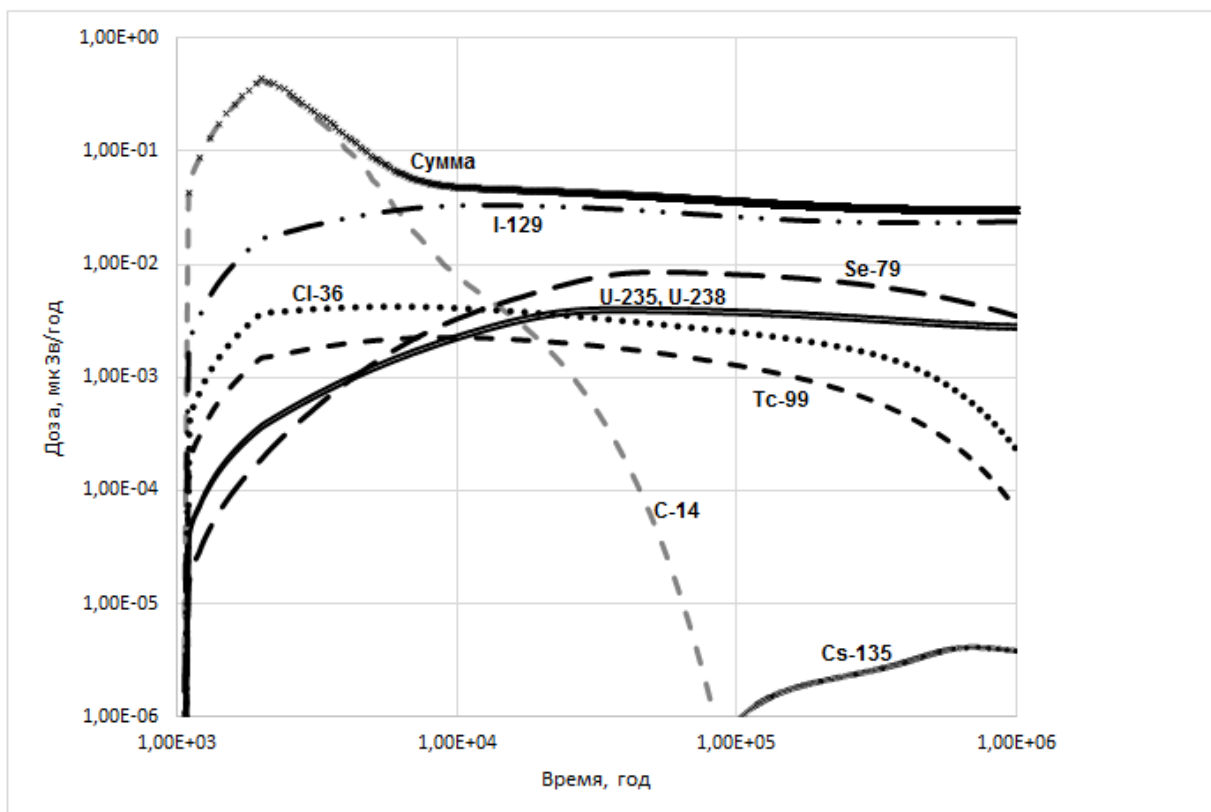


Рис. 11. Результаты расчета индивидуальных годовых эффективных доз облучения критической группы населения, проживающей вблизи области разгрузки подземных вод

Как видно из графиков на рис. 11, для критической группы населения, проживающей вблизи области разгрузки подземных вод района размещения ПГЗРО, не наблюдается превышение допустимого значения годовой эффективной дозы облучения, равного  $10$  мкЗв/год. Прогнозный расчет показал, что максимальная суммарная индивидуальная годовая эффективная доза облучения критической группы населения от ПГЗРО составляет  $0,44$  мкЗв/год. Радионуклидами, которые вносят максимальный вклад в эффективную дозу облучения, являются  $^{14}\text{C}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{79}\text{Se}$ .

Таким образом, результаты прогнозного расчета, выполненного в рамках настоящего демонстрационного примера, свидетельствуют о долговременной безопасности референтного ПГЗРО для населения.