



УДК 621.039.75

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УЧЕТА ОСОБЕННОСТЕЙ, СОБЫТИЙ И ПРОЦЕССОВ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО

Шарафутдинов Р. Б., к.т.н. (charafoutdinov@secnrs.ru), Понизов А. В. (ponizov@secnrs.ru),  
Мурлис Д. В. (murlis@secnrs.ru) (ФБУ «НТЦ ЯРБ»),  
Савельева Е. А., к.ф.-м.н. (esav@ibrae.ac.ru), Свительман В. С., к.ф.-м.н. (svitelman@ibrae.ac.ru)  
(ИБРАЭ РАН)

*Рассматривается подход к учету особенностей (свойств, характеристик) системы захоронения радиоактивных отходов и влияющих на нее событий и процессов природного и техногенного происхождения при обосновании долговременной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов после закрытия, который состоит в обобщении и формализации установленных в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии перечней исходных событий проектных аварий с учетом международно принятого перечня особенностей, событий, процессов. Продемонстрировано использование данного подхода к пунктам глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов.*

► **Ключевые слова:** ОСП, система захоронения радиоактивных отходов, долговременная безопасность, обоснование безопасности, ПГЗ ЖРО, сценарий эволюции, факторы природного и техногенного происхождения.

## METHODOLOGICAL ASPECTS OF ACCOUNTING OF FEATURES, EVENTS AND PROCESSES OF NATURAL AND MAN-INDUCED ORIGIN IN JUSTIFICATION OF LONG-TERM SAFETY OF RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL SYSTEM

Sharafutdinov R., Ph. D., Ponizov A., Murlis D. (SEC NRS),  
Saveleva E., Ph. D., Svitelman V., Ph. D. (IBRAE)

*An approach is considered to accounting of features (properties, characteristics) of the radioactive waste disposal system and events and processes of natural and man-induced origin affecting it in justification of long-term safety of radioactive waste disposal facilities after their closure, which consists of generalization and formalization of the lists of initial events of design basis accidents established in federal rules and regulations in the field of atomic energy use, taking into account the internationally accepted list of features, events and process. The approach is illustrated with regard to deep disposal facilities for liquid radioactive waste.*

► **Key words:** FEP, radioactive waste disposal system, long-term safety, safety justification, deep disposal facility for liquid radioactive waste, evolution scenario, factors of natural and man-induced origin.

## 1. Введение

Обоснование безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) после закрытия предполагает проведение оценки долговременной безопасности, включающей прогнозный расчет радиационного воздействия на население и окружающую среду с последующим сравнением полученных результатов с допустимыми уровнями радиационного воздействия. При этом важным является учет всех факторов, оказывающих (или способных оказать) существенное влияние на состояние системы захоронения радиоактивных отходов (РАО). Последнее традиционно сводится к разработке обоснованного набора сценариев эволюции системы захоронения РАО, под которыми в соответствии с п. 60 федеральных норм и правил в области использования атомной энергии (ФНП) НП-055-14 [1] понимаются последовательности связанных между собой событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, физико-химических процессов, определяющих эволюцию системы захоронения РАО, миграцию радионуклидов в окружающую среду и уровни облучения человека.

В данной работе рассматривается подход к учету особенностей, событий, процессов (ОСП), основанный на анализе и обобщении требований ФНП и рекомендаций международных организаций, при разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО в рамках оценки долговременной безопасности ПЗРО. Результаты работы могут быть использованы при разработке методики оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (ПГЗ ЖРО), которая могла бы лечь в основу руководства по безопасности при использовании атомной энергии.

## 2. Требования и рекомендации нормативных документов РФ к учету событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, физико-химических процессов при разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО

Требования действующих ФНП к учету ОСП выстраиваются в следующий логический ряд.

Первый шаг при оценке безопасности площадки ПЗРО заключается в обосновании отсутствия на площадке запрещающих явлений и факторов в соответствии с требованиями п. 48 НП-055-14 [1].

Далее (второй шаг) площадка для размещения ПЗРО выбирается с учетом требований пп. 52, 53 и 54 НП-055-14 [1]. Что касается ПГЗ ЖРО, то в соответствии с Федеральным законом от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ [2] захоронение жидких низко-активных и среднеактивных РАО допускается исключительно в уже сооруженных и эксплуатируемых ПГЗ ЖРО, то есть создание новых ПГЗ ЖРО не допускается.

Третий шаг. В соответствии с требованиями п. 2.1.5 НП-064-17 [3] на площадке ПЗРО устанавливаются и обосновываются значения параметров внешних природных воздействий с оцененной вероятностью возникновения на интервале в один год  $10^{-4}$  и выше и внешние техногенные воздействия с оцененной вероятностью возникновения на интервале в один год  $10^{-6}$  и выше.

Четвертый шаг. В соответствии с требованиями приложения № 3 НП-064-17 [3] по значениям параметров внешних природных воздействий с оцененной вероятностью возникновения на интервале в один год  $10^{-4}$  и выше и внешних техногенных воздействий с оцененной вероятностью возникновения на интервале в один год  $10^{-6}$  и выше определяется степень их опасности по последствиям воздействия на объект использования атомной энергии. Внешние природные и техногенные воздействия III степени опасности в дальнейшем не рассматриваются и не учитываются.

Пятый шаг. В соответствии с требованиями п. 18 НП-055-14 [1] и НП-064-17 [3] оценивается влияние установленных на площадке внешних воздействий I и II степени опасности на безопасность ПЗРО при его эксплуатации и закрытии.

Шестой шаг. В соответствии с требованиями п. 18 НП-055-14 [1] выполняется прогнозный расчет оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПЗРО (ПГЗ ЖРО). Порядок проведения прогнозных расчетов для оценки долговременной безопасности ПЗРО установлен в п. 233 НП-100-17 [4]:

- разработка основных положений;
- описание исходных данных;
- разработка и обоснование сценариев эволюции системы захоронения РАО;
- разработка и обоснование концептуальных и математических моделей и их реализация с помощью программных средств;
- анализ результатов оценки долговременной безопасности с учетом их неопределенностей.

В соответствии с п. 17 приложения № 3 НП-100-17 [4] результаты прогнозного расчета должны учитывать нормальную эволюцию ПЗРО

и альтернативные сценарии, включая внешние или внутренние воздействия природного или техногенного происхождения. Поскольку прогнозный расчет, как правило, охватывает геологическое развитие района размещения ПЗРО (ПГЗ ЖРО) на сто тысяч лет и более, то очевидно, что возможно несколько вариантов прогноза. С учетом принципа консервативности ФНП рассматривается наиболее неблагоприятный вариант прогнозного расчета.

Формирование сценариев эволюции системы захоронения РАО, для которых выполняются расчетные оценки долговременной безопасности, строится на перечнях исходных событий, установленных в НП-055-14 [1].

Для приповерхностных ПЗРО (ППЗРО) и глубоких ПЗРО (ПГЗРО) перечни исходных событий, учитываемых при оценке долговременной безопасности, установлены, соответственно, в приложениях № 3 и № 4 к НП 055-14 [1]. Исходные события в этих приложениях распределены по следующим группам:

- внешние воздействия природного и техногенного происхождения, свойственные району размещения ПЗРО (например, сейсмические явления, изменение интенсивности осадков из-за перемены климата, катастрофические воздействия, включая землетрясение выше максимального расчетного землетрясения (МРЗ));

- непреднамеренное вторжение человека в систему захоронения РАО после закрытия ПЗРО (техногенные воздействия, такие как буровые и горные работы, различные виды промышленной деятельности);

- внутренние воздействия (например, длительные радиационные воздействия и тепловые нагрузки, газовыделение и микробиологическое разложение органических РАО, физико-химическое (геохимическое) взаимодействие РАО со средами ближайшей зоны системы захоронения РАО).

Для ПГЗ ЖРО перечень исходных событий, учитываемых при оценке долговременной безопасности системы захоронения жидких РАО (ЖРО), установлен в приложении № 5 к НП-055-14 [1] и содержит перечисленные ниже события.

1. Расконсервация скважин вследствие коррозии обсадных колонн или деградации материала герметизации затрубного пространства, возникновение вертикальных перетоков по стволам скважин, загрязнение вышележащих горизонтов.

2. Непреднамеренное вторжение человека, в том числе буровые и горные работы, различные виды промышленной деятельности.

3. Внешние воздействия природного и техногенного происхождения, свойственные району размещения ПГЗ ЖРО, в том числе изменения гидрогеологического режима, активизация тектонических процессов, изменения сейсмического режима. При анализе внешних воздействий необходимо рассмотреть катастрофические воздействия, включая землетрясение выше МРЗ.

В соответствии с п. 47 руководства по безопасности при использовании атомной энергии (РБ) РБ-117-16 [5] последовательности логически связанных между собой событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов, определяющих возможную эволюцию системы захоронения РАО, выстраиваются в сценарии эволюции системы захоронения РАО, на основании которых разрабатываются концептуальные и математические модели, используемые в прогнозных расчетах.

Таким образом, можно сделать вывод, что нормативные документы РФ содержат основные положения по учету событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, физико-химических процессов, определяющих сценарии эволюции системы захоронения РАО, с целью выполнения оценок долговременной безопасности ПЗРО.

В следующих разделах рассмотрен международный подход к учету ОСП при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО и выполнено сопоставление положений ФНП и РБ с рекомендациями документов международных организаций.

### **3. Международный подход к учету ОСП при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО**

В соответствии с документом Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) SSR-5 [6] необходимо уделять особое внимание ОСП, которые могут негативно влиять на безопасность ПЗРО; их следует учитывать в обосновании безопасности ПЗРО и связанной с ним оценке долговременной безопасности.

В соответствии с зарубежными документами, в частности NUREG-1804 [7], ОСП (англ. FEP) трактуются следующим образом.

Особенность (Feature) – структура, условие, характеристика ПЗРО или вмещающих пород, которые могут влиять на эволюцию системы захоронения РАО и описываются качественным или

количественным значением (например, литологический состав пород, коэффициент фильтрации водоносного горизонта).

Событие (Event) – природное или техногенное воздействие, кратковременное, по сравнению с периодом существования системы захоронения РАО, которое способно оказывать влияние на эволюцию данной системы (например, землетрясение, падение метеорита).

Процесс (Process) – природное или техногенное явление, которое способно воздействовать на эволюцию системы захоронения РАО и проявлять свое действие в течение всего периода потенциальной опасности захороненных РАО (например, миграция радионуклидов или постепенная деградация инженерных барьеров безопасности).

В документе МАГАТЭ SSG-23 [8] рекомендуется следующий подход к разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО на основе ОСП.

На первом этапе разрабатывается исчерпывающий перечень ОСП в соответствии с международно принятым перечнем ОСП, с учетом требований национального законодательства и характеристик площадки размещения ПЗРО, его систем и элементов. Далее следует процесс исключения (скрининга) из дальнейшего рассмотрения ОСП, характеризующихся пренебрежимо слабыми последствиями воздействий на систему захоронения РАО, либо очень низкой вероятностью проявления. Для ОСП, важных с точки зрения обоснования безопасности ПЗРО, выполняется всесторонний анализ различных комбинаций и взаимосвязей между отдельными ОСП, на основании которых осуществляется разработка сценариев эволюции системы захоронения РАО.

Основными критериями для исключения ОСП из оценки безопасности являются требования национального законодательства, вероятности проявления события или процесса, последствия воздействия события или процесса на систему захоронения РАО [8].

В регулирующих требованиях ряда стран в качестве критерия исключения ОСП установлено предельное значение вероятности наступления маловероятного события. Например, согласно нормам Чешской Республики, можно пренебречь сценариями, связанными с событиями, вероятность наступления которых менее  $10^{-7}$ /год [9].

Согласно требованиям Министерства энергетики США [10], из рассмотрения при разработке сценариев долговременной безопасности ПЗРО

исключаются события, вероятность проявления которых меньше  $10^{-4}$  за 10 000 лет, то есть не превышает  $10^{-8}$ /год.

В качестве международно принятого перечня ОСП в документе МАГАТЭ SSG-23 [8] рекомендуется стандартный перечень ОСП, разработанный Агентством по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР) [11], который содержит более 150 ОСП и считается в настоящее время наиболее полным и универсальным.

Стимулом к созданию международного перечня ОСП послужило коллективное решение экспертов МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР относительно обоснованности оценок долговременной безопасности ПЗРО [12]. Данное решение констатирует, что «только совместное рассмотрение соответствия использованных для оценки безопасности методов и достаточности информации о предполагаемом месте захоронения РАО может обеспечить технические основы для решения, будет ли система захоронения РАО обеспечивать удовлетворительную безопасность для будущих поколений». Кроме того, в решении утверждается, что «факторы, которые могут существенно влиять на безопасность, должны быть учтены в научных исследованиях и регулирующих процедурах». Ключевым аспектом в разработке процедуры оценки безопасности ПЗРО является идентификация ОСП, потенциально влияющих на эволюцию системы захоронения РАО, и выделение среди них тех, которые должны быть учтены при оценке долговременной безопасности ПЗРО. Концептуальный подход к учету ОСП был сформулирован в документе АЯЭ ОЭСР [11]. На основе этого подхода был сформирован современный перечень ОСП АЯЭ ОЭСР [13]. Он пополнялся факторами, которые рассматривались при анализе зарубежных проектов ПЗРО, и на настоящий момент квалифицируется как полный перечень ОСП, требующих рассмотрения при обосновании безопасности ПЗРО.

Перечень ОСП АЯЭ ОЭСР содержит следующие категории.

- Категория 0 (основа оценки безопасности) – это факторы (аспекты), определяющие детальность рассмотрения оценки долговременной безопасности ПЗРО. К ним относятся: определение пространственных и временных рамок оценки безопасности, конечных результатов, используемых подходов (консервативный/реалистичный), регулирующих требований на данной фазе оценки и т.д.

- Категория 1 (внешние факторы и воздействия) – это набор ОСП, определяющих воздействия на систему захоронения РАО. Эти факторы можно распределять по характерному времени воздействия, а именно: этап сооружения, этап эксплуатации, этап закрытия и далее временные интервалы после закрытия (начальный период, деградация барьеров безопасности, полное разрушение барьеров безопасности и другие).

- Категория 2 (процессы и явления в системе захоронения РАО) – это те факторы, которые максимально определяют эволюцию системы захоронения РАО посредством физических, химических и биологических процессов, а также человеческого фактора.

- Категория 3 (факторы миграции радионуклидов) – это факторы, которые характеризуют процессы миграции радионуклидов и других компонентов РАО и в конечном счете определяют дозо-

вые нагрузки, в том числе и для представителей критических групп населения.

Следует отметить, что перечень ОСП АЯЭ ОЭСР разрабатывался зарубежными специалистами для пунктов захоронения твердых РАО, поэтому он не учитывает особенности ПГЗ ЖРО.

#### 4. Анализ соответствия положений ФНП и РБ рекомендациям международных организаций в части учета ОСП при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО

Для понимания, как соотносятся рекомендации международных организаций (МАГАТЭ, АЯЭ ОЭСР) и положения действующих ФНП и РБ, выполнено их сравнение в табличной форме. Основные результаты сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1

### Основные результаты сравнения положений ФНП и РБ с рекомендациями международных организаций в части учета ОСП при разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО

№ п/п	Рекомендации МАГАТЭ/АЯЭ ОЭСР	Положения ФНП и РБ
1	Определение сценария эволюции системы захоронения РАО	
1.1	В обосновании безопасности для периода после закрытия следует учитывать сценарии наиболее вероятных изменений в пункте геологического захоронения и условий в районе его размещения в течение очень длительных периодов времени (например, периодов времени, сопоставимых с периодом, в течение которого отходы остаются опасными) и менее вероятные события, которые могут повлиять на эволюцию пункта захоронения [14]	ПЗРО (ПГЗ ЖРО) удовлетворяет требованиям безопасности в период после его закрытия, если: при нормальном (эволюционном) протекании естественных процессов на площадке размещения ПЗРО (ПГЗ ЖРО) (наиболее вероятных сценариях эволюции системы захоронения РАО) его радиационное воздействие на население не приведет к превышению допустимого уровня, установленного в соответствии с санитарными правилами и нормативами радиационной безопасности; при маловероятных (катастрофических) внешних воздействиях природного и техногенного характера на площадке размещения ПЗРО (ПГЗ ЖРО) (маловероятных сценариях распространения радионуклидов из системы захоронения РАО) для критической группы населения не будет превышено граничное значение обобщенного риска, установленного санитарными правилами и нормативами радиационной безопасности (п. 14 НП-055-14 [1])
1.2	Сценарии представляют собой структурированные комбинации ОСП, относящихся к эволюции системы захоронения. Рассматриваются различные типы сценариев, включая «сценарий нормальной эволюции» и «альтернативные сценарии эволюции», которые включают разрушительные процессы и события [8]	Под сценарием эволюции системы захоронения РАО понимается одна из возможных последовательностей связанных между собой событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, физико-химических процессов, определяющих эволюцию системы захоронения РАО, миграцию радионуклидов в окружающую среду и уровни облучения человека. Возможные изменения защитных и изолирующих свойств барьеров безопасности должны быть учтены в сценариях эволюции системы захоронения РАО (п. 60 НП-055-14 [1])



№ п/п	Рекомендации МАГАТЭ/АЯЭ ОЭСР	Положения ФНП и РБ
2	Критерии исключения ОСП из рассмотрения при разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО	
2.1	Низкая вероятность события – вероятность проявления в течение периода времени, когда ОСП может произойти, существенно ниже установленного уровня [9]	В проекте ОИАЭ должны быть установлены и обоснованы значения параметров внешних природных воздействий с оцененной вероятностью возникновения на интервале в один год $10^{-4}$ и выше и внешние техногенные воздействия с оцененной вероятностью возникновения на интервале в один год $10^{-6}$ и выше (п. 2.1.1 НП-064-17 [3]). Следовательно, более низкая вероятность не рассматривается
2.2	Слабые последствия – эффект неизмерим, либо не наблюдаем, либо не существен [9]	Внешние природные и техногенные воздействия III степени опасности в дальнейшем не рассматриваются и не учитываются (п. 2.3 и приложение № 3 НП-064-17 [3])
3	Соответствие ФНП и РБ перечню ОСП АЯЭ ОЭСР [11]	
3.1	Основные положения оценки безопасности	
3.1.1	Виды воздействия	Радиационное воздействие на работников (персонал), население и окружающую среду (п. 13 НП-055-14 [1])
3.1.2	Временные рамки оценки безопасности	Весь период потенциальной опасности РАО (п. 4 НП-055-14 [1])
3.1.3	Пространственная область	В пределах горного отвода (п. 106 НП-055-14 [1]). Области прогнозируемого распространения радионуклидов (п. 108 НП-055-14 [1])
3.1.4	Предположения о захоронении РАО	Для каждого сценария должны быть представлены и обоснованы концептуальные предположения об особенностях эволюции системы захоронения РАО, происходящих в ней и вне ее событиях, явлениях и факторах природного и техногенного происхождения и физико-химических процессах, влияющих на безопасность системы захоронения РАО (п. 246 НП-100-17 [4])
3.1.5	Предположения о деятельности человека в будущем	Непреднамеренное вторжение человека, в том числе буровые и горные работы, различные виды промышленной деятельности (приложения № 4, 5 НП-055-14 [1])
3.1.6	Предположения о поведении человека (критической группы) в будущем	Критическую группу населения рекомендуется выбирать с учетом демографических условий размещения ППЗРО, 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, а также радионуклидного состава РАО (п. 31 РБ-117-16 [5])
3.1.7	Предположения о соотношении «доза-эффект»	Для целей радиационной защиты в диапазоне малых доз (меньше 100 мЗв эффективной дозы) общепринятой является линейная беспороговая модель Международной комиссии по радиационной защите. Согласно этой модели радиационный риск линейно возрастает в зависимости от дозы ионизирующего излучения, в том числе малой дозы (п. 3.2 МР 2.6.1.0098-15 [15])
3.1.8	Цели оценки безопасности	Определение необходимости реализации технических и организационных мероприятий, направленных на обеспечение безопасности работников (персонала) и населения и безопасности системы захоронения РАО (п. 78 НП-055-14 [1])
3.1.9	Требования регулирующего органа и ограничения	Требования ФНП
3.1.10	Модель и данные	Описание используемой в расчетах гидродинамической модели рекомендуется представлять в следующем порядке: представление модели; обоснование принятых в модели допущений; исходные данные; методология реализации модели; сведения о верификации и валидации модели (п. 2.3.2.4 РБ-139-17 [16])



№ п/п	Рекомендации МАГАТЭ/АЯЭ ОЭСР	Положения ФНП и РБ
3.2		Внешние факторы
3.2.1		Пункт захоронения РАО
3.2.1.1	Исследование площадки	Для района размещения и площадки ПЗРО (ПГЗ ЖРО) должны быть исследованы и оценены все характерные процессы и явления природного и техногенного происхождения, а также факторы, характеризующие условия размещения ПЗРО (ПГЗ ЖРО), которые могут оказать влияние на безопасность ПЗРО (ПГЗ ЖРО) и на безопасность работников (персонала), население и окружающую среду в период потенциальной опасности размещенных РАО; должны быть изучены факторы, влияющие на выход радионуклидов из ПЗРО (ПГЗ ЖРО), их перенос и накопление в окружающей среде (п. 35 НП-055-14 [1])
3.2.1.2	Земляные работы/ строительство	В проекте приповерхностных ПЗРО должны быть предусмотрены технические средства, препятствующие поступлению подземных, паводковых вод и атмосферных осадков в места захоронения РАО, и учтены возможные изменения гидрогеологических условий, вызванные строительством и эксплуатацией зданий и сооружений приповерхностных ПЗРО (п. 69 НП-055-14 [1])
3.2.1.3	Упаковка РАО и засыпка	К инженерным барьерам безопасности ПЗРО относятся: упаковка РАО, ее отдельные элементы (форма РАО, контейнер), инженерные конструкции ПЗРО и их отдельные части и элементы, в том числе строительные конструкции сооружений, буферные материалы, подстилающие и покрывающие экраны (п. 20 НП-055-14 [1])
3.2.1.4	Закрытие и изоляция	Проект закрытия ПЗРО (ПГЗ ЖРО) должен предусматривать: консервацию заполненных РАО ячеек (отсеков, камер, секций) ПЗРО, консервацию нагнетательных и разгрузочных скважин ПГЗ ЖРО; дезактивацию, демонтаж, ликвидацию или репрофилирование сооружений, строительных конструкций, систем и оборудования, предназначенных для приемки РАО и их временного хранения на ПЗРО (ПГЗ ЖРО); проведение радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО в течение установленного времени; демонтаж и ликвидацию систем и оборудования, предназначенного для осуществления радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО после завершения проведения радиационного контроля и мониторинга (п. 136 НП-055-14 [1])
3.2.1.5	Записи и маркеры	Организационные и технические мероприятия по обеспечению качества при захоронении РАО, устанавливаемые в программе обеспечения качества, должны быть направлены на организацию эффективной системы ведения учетных записей и хранения документации при обращении с РАО и их захоронении, организацию надежного хранения документации ПЗРО (ПГЗ ЖРО) после его закрытия (п. 163 НП-055-14 [1])
3.2.1.6	Размещение РАО	РАО, захораниваемые в определенный пункт захоронения твердых РАО или пункт глубинного захоронения жидких РАО, должны соответствовать критериям приемлемости для захоронения (п.5 НП-093-14 [17])
3.2.1.7	Проект пункта захоронения	Выбор способа захоронения РАО (приповерхностное или глубинное захоронение РАО), конструкции сооружений, состава и свойств барьеров безопасности определяется и обосновывается в проекте ПЗРО (ПГЗ ЖРО) в зависимости от характеристик РАО (класс РАО, радионуклидный состав, удельная активность, период потенциальной опасности, физико-химические свойства) и их объема, с учетом природных условий размещения ПЗРО (ПГЗ ЖРО) и результатов оценки безопасности ПЗРО (ПГЗ ЖРО) (п. 12 НП-055-14 [1])

№ п/п	Рекомендации МАГАТЭ/ АЯЭ ОЭСР	Положения ФНП и РБ
3.2.1.8	Контроль качества	Эксплуатирующая организация должна обеспечить разработку и выполнение программы обеспечения качества при размещении, сооружении, эксплуатации и закрытии ПЗРО (ПГЗ ЖРО) и контролировать выполнение программ обеспечения качества деятельности организаций, выполняющих работы и (или) предоставляющих услуги эксплуатирующей организации по размещению, сооружению, эксплуатации и закрытию ПЗРО (ПГЗ ЖРО) (п. 45 НП-055-14 [1])
3.2.1.9	График и планирование	При эксплуатации ПЗРО (ПГЗ ЖРО) должно осуществляться текущее планирование его закрытия путем периодического пересмотра и поддержания в актуальном состоянии проектной документации и соответствующих разделов ООБ ПЗРО (ПГЗ ЖРО), содержащих основные технические решения и организационные мероприятия по закрытию ПЗРО (ПГЗ ЖРО) (концепцию закрытия ПЗРО (ПГЗ ЖРО) и оценку долговременной безопасности ПЗРО (ПГЗ ЖРО)) (п. 92 НП-055-14)
3.2.1.10	Административный контроль	Для целей проведения оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется определить периоды времени, важные для разработки сценариев эволюции ППЗРО: период административного контроля ППЗРО, то есть срок, установленный в проекте ППЗРО, 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 ППЗРО (период пассивного административного контроля) (п. 34 РБ-117-16 [5])
3.2.1.11	Мониторинг пункта захоронения	После закрытия ПЗРО (ПГЗ ЖРО) эксплуатирующая организация должна проводить периодический радиационный контроль и мониторинг системы захоронения РАО, включающий: контроль состояния инженерных и естественных барьеров безопасности, ограждений и предупреждающих знаков; мониторинг состояния вмещающих пород; мониторинг состояния окружающей среды (п. 153 НП-055-14 [1])
3.2.1.12	Аварии и внеплановые события	Перечни исходных событий аварий, учитываемых при эксплуатации и закрытии ПЗРО (ПГЗ ЖРО), и перечни исходных событий, учитываемых при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО, приведены в приложениях № 1 – 5 к НП-055-14 (п. 43 НП-055-14 [1])
3.2.1.13	Возможность извлечения РАО	Захоронение РАО подразумевает безопасное размещение РАО в ПЗРО без намерения их последующего извлечения (ст. 3 190-ФЗ [2])
3.2.2	Геологические процессы и эффекты	Геологические и инженерно-геологические процессы и явления: сейсмотектонические разрывные смещения, сейсмодислокации, сейсмотектонические поднятия, опускания блоков земной коры; современные дифференцированные движения земной коры, тектонический крип; новейшие движения земной коры; остаточные сейсмодеформации земной коры; землетрясение (любого генезиса); извержение вулкана; грязевой вулканизм; оползни; обвалы и оползни-обвалы; сели; лавины снежно-каменные и щебнисто-глыбовые; размывы берегов, склонов, русел; оседания и провалы; размывы подземные, в том числе проявления карста; мерзлотно-геологические (криогенные) процессы;

№ п/п	Рекомендации МАГАТЭ/ АЯЭ ОЭСР	Положения ФНП и РБ
		деформации специфических грунтов (карст, термокарст, разжижение, солифлюкция, суффозионные процессы); эоловые процессы (дефляция, перевевание, барханообразование); коррозионная агрессивность грунтов и подземных вод; глубина залегания уровня грунтовых вод; климатическая (солнечная) термодеструкция; атмосферная коррозия (п.2.1.2 НП-064-17 [3])
3.2.3	Гидрометеорологические процессы и эффекты	Гидрометеорологические процессы и явления: наводнение; цунами; ледовые явления на водотоках; режим прибрежной зоны водных объектов; сейши; приливы и отливы; изменение водных ресурсов: экстремально низкий сток, аномальное снижение уровня воды; смерч; ветер, ураган; тропический циклон (тайфун); атмосферные осадки; экстремальные снегопады и снеготпасы; температура воздуха; лавина снежная; гололед; удар молнии (п.2.1.1 НП-064-17 [3])
3.2.4	Деятельность человека в будущем	Непреднамеренное вторжение человека, в том числе буровые и горные работы, различные виды промышленной деятельности (приложения № 4, 5 НП-055-14 [1])
3.3	Область системы захоронения РАО: факторы окружающей среды	
3.3.1	РАО и инженерные барьеры	РАО, захораниваемые в определенный пункт захоронения твердых РАО или пункт глубинного захоронения жидких РАО, должны соответствовать критериям приемлемости для захоронения (п.5 НП-093-14 [17]). К инженерным барьерам ПГЗ ЖРО относятся обсадные колонны, материалы засыпки затрубного и межтрубного пространств, а также тампонажные материалы. К естественным барьерам ПГЗ ЖРО относятся элементы природного геологического образования, в том числе вмещающие породы (пп. 22 – 23 НП-055-14 [1])
3.3.2	Геологическая среда	Поглощающие горизонты ПГЗ ЖРО. Горизонты слабопроницаемых (водоупорных) пород. Буферный горизонт, отделенный от поглощающего горизонта слабопроницаемыми породами (пп. 107, 108 НП-055-14 [1])
3.3.3	Поверхностные условия	Не допускается размещение приповерхностных ПЗРО на площадке с выраженными признаками протекания поверхностных геологических процессов (например, эрозия, оседание, оползни, карст) (п. 52 НП-055-14 [1])
3.3.4	Поведение человека	Неопределенность сценариев эволюции системы захоронения РАО обусловлена неопределенностью процессов эволюции системы захоронения РАО в будущем и состояния системы захоронения РАО и включает неопределенность в развитии и поведении системы захоронения РАО, неопределенность прогноза изменения условий района и площадки размещения ППЗРО, возникновении тех или иных внешних воздействий и процессов и их параметров, а также неопределенность условий существования человека и его поведения в отдаленном будущем (п. 102 РБ-117-16 [5])

№ п/п	Рекомендации МАГАТЭ/ АЯЭ ОЭСР	Положения ФНП и РБ
3.4		Радиоактивные вещества
3.4.1	Характеристики радиоактивных веществ	Исходные данные, характеризующие область источника радионуклидов, включают следующие сведения: объем (масса) РАО; происхождение, физическая форма и вид РАО; физические и химические характеристики РАО (в том числе морфологический (химический) состав РАО, содержание свободной жидкости, скорость выщелачивания, скорость газообразования (газовыделения) и состав образующихся газов, горючесть, содержание легковоспламеняющихся, самовоспламеняющихся, окисляющих и иных пожаровзрывоопасных веществ, содержание органических гниющих, биологически активных и разлагающихся веществ, коррозионно-активных, комплексообразующих и химически токсичных веществ) (приложение № 2 РБ-117-16 [5])
3.4.2	Факторы миграции радионуклидов	Характеристики миграции радионуклидов в поверхностных и подземных водах и их накопления на дне водоемов с учетом: возможного радиоактивного загрязнения грунтовых вод; физико-химических свойств радионуклидов; кинетики геохимических реакций и возможного изменения минералогического состава пород; литологии осадочных пород и мощности водовмещающих и водоупорных слоев, грунтов зоны аэрации и почв; сорбционной способности пород, грунтов и почв применительно к радионуклидам и опасным химическим веществам; направления и скорости движения загрязненных потоков к местам их разгрузки (водотокам, водоемам, водозаборным скважинам и т.д.); характеристик и стратификации водоносных горизонтов и комплексов водоносных пород; гидравлической связи поверхностных и подземных вод; характеристик водоемов, гидротехнических сооружений, данных о водопользовании, уровнях и расходах воды, скорости течения рек, возможном механизме переноса и осаждения радионуклидов (п. 5.3 НП-060-05 [18])
3.4.3	Факторы облучения	Выделяются следующие основные пути облучения населения: внешнее облучение от загрязненной радионуклидами поверхности земли; внутреннее облучение ингаляционным путем; потребление растительной пищи, выращенной на загрязненной почве; потребление мясо-молочной продукции, произведенной от животных, вскормленных на загрязненной территории; потребление и использование воды, загрязненной радионуклидами; непреднамеренное поступление радиоактивных веществ в организм (приложение № 4 РБ-117-16 [5])

На основании анализа, результаты которого приведены в таблице 1, можно сделать вывод, что методические аспекты учета ОСП при обосновании долговременной безопасности системы захоронения РАО, представленные в документах МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР, вполне совпадают с методикой оценки безопасности и подходом к учету событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, физико-химических процессов, предусмотренных в ФНП и РБ. При этом представляется, что требования ФНП более консервативные.

## 5. Разработка перечня ОСП для оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО

В настоящее время в Российской Федерации эксплуатируются три ПГЗ ЖРО, для которых разрабатывается концепция закрытия и реализуются связанные с завершением эксплуатации процедуры обеспечения и обоснования долговременной безопасности, включая анализ ОСП и разработку сценариев эволюции системы захоронения РАО.

В рамках научно-исследовательской работы «Выполнение комплексов расчетно-экспериментальных исследований в целях реализации рекомендаций миссии МАГАТЭ по совершенствованию обоснования безопасности эксплуатации и закрытия пунктов глубинного захоронения ЖРО» выполнена разработка перечня ОСП для оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО (далее – перечень ОСП ПГЗ ЖРО).

Разработка перечня ОСП ПГЗ ЖРО осуществлялась в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ SSG-23 [8] с учетом требований НП-064-17 [3]. За основу был взят международно принятый перечень ОСП АЯЭ ОЭСР по следующим причинам.

1. Принят на международном уровне и учитывает многолетний опыт проведения оценок долговременной безопасности ПЗРО зарубежными организациями.

2. Содержит базовый перечень ОСП, достаточный для разработки сценариев эволюции системы захоронения РАО.

3. Имеет последовательную структуру.

Необходимым условием был учет положений национального законодательства (ФНП и РБ) и условий площадок размещения ПГЗ ЖРО.

На первом этапе разработки и анализа ОСП при оценке долговременной безопасности ПГЗ ЖРО составлен полный перечень ОСП ПГЗ ЖРО, учитывающий все факторы, потенциально влияющие на эволюцию системы захоронения РАО.

Учтена технологическая особенность захоронения ЖРО, которая состоит в нагнетании отходов (низкого и среднего уровней активности) через специально оборудованные скважины в глубоководные (сотни метров от поверхности) водоносные горизонты, изолированные от дневной поверхности мощными слоями практически непроницаемых для компонентов ЖРО водоупорных горных пород, а также одним или несколькими буферными водоносными горизонтами.

Учтены следующие характеристики барьеров безопасности ПГЗ ЖРО:

- естественным барьером безопасности служит вмещающая горная порода, а конкретнее – локализирующие свойства эксплуатационного и буферного горизонта, а также слабопроницаемых (водоупорных) пород;

- инженерными барьерами безопасности служат обсадные колонны скважин, затрубный цементный камень, а также материалы, используемые для ликвидации (герметизации) скважин.

Следующим этапом выполнен анализ полного

перечня ОСП ПГЗ ЖРО, который состоял в последовательном рассмотрении элементов перечня ОСП и оценке вероятности проявления факторов и уровня их значимости с точки зрения влияния на безопасность ПГЗ ЖРО.

Процедура анализа ОСП ПГЗ ЖРО состояла в отборе из полного списка ОСП тех факторов, которые индивидуально или в сочетании с другими влияют на долговременную безопасность системы захоронения РАО.

ОСП исключались из оценки безопасности исходя из следующих критериев:

- нерелевантности (необоснованности) – не имеют отношения к системе захоронения РАО или не могут быть реализованы в ее данном воплощении;

- низкой вероятности – вероятность проявления в течение периода времени, когда ОСП может произойти, существенно ниже установленного уровня;

- слабых последствий – эффект неизмерим, либо не наблюдаем, либо не существенен;

- возможности регулирования – проявление может быть полностью устранено за счет выполнения набора регулирующих требований.

Дополнительным критерием было условие, что если ОСП не могут быть обоснованно исключены из рассмотрения при оценке долговременной безопасности, то их следует оставить. Лучше учесть неважные ОСП, чем пропустить что-то существенное.

Процесс отбора ОСП разбивается на два этапа – первичный и более детальный отбор. В рамках первичного отбора сразу могут быть исключены из рассмотрения ОСП, относящиеся к явлениям в прибрежной зоне, геологические геотермальные процессы и вулканизм, которые не имеют отношения к эксплуатируемым ПГЗ ЖРО в силу их географического положения, а такие как диапиризм – в силу отсутствия в геологической формации солевых отложений. Однако главная задача первичного отбора ОСП состоит в распределении предварительных оценок уровня влияния факторов и оценки частоты (вероятности) проявления для событий или процессов.

Второй уровень отбора ОСП ориентирован на рассмотрение ОСП, которые могут быть исключены из детального изучения в силу низкой вероятности их проявления или низкого уровня влияния на безопасность системы захоронения РАО. Например, низкой вероятностью проявления могут характеризоваться такие ОСП, как падение крупного космического тела.

Слабое воздействие на ПГЗ ЖРО могут оказывать факторы, связанные с процессами на поверхности, такими как, например, эрозия почв или изменения флоры и фауны. К процессам, оказывающим слабое воздействие на ПГЗ ЖРО, можно также отнести сейсмические явления, так как уровень воздействия землетрясений не только зависит от балльности, но и затухает с глубиной по экспоненциальному закону. Однако некоторые из событий на поверхности, например, изменение гидрологических условий, могут оказать влияние на режим подземных вод, а следовательно, на состояние системы захоронения РАО, поэтому не могут быть исключены из рассмотрения просто по факту проявления на поверхности.

Для обоснования возможности исключения ОСП, где это вызывает сомнение, требуется проведение специальных расчетов, либо дополнительных исследований, подтверждающих уровень влияния данного фактора. Так, в программу дополнительных исследований могут быть внесены аспекты, связанные с химическими и микробиологическими процессами в геологической породе ПГЗ ЖРО, коллоидным переносом радионуклидов и другими аспектами.

ОСП, важные с точки зрения обоснования безопасности ПГЗ ЖРО, используются при разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО. Разрабатываются сценарии нормальной эволюции, отражающий наиболее вероятную (естественную) эволюцию системы захоронения РАО, и набор альтернативных сценариев, учитывающих маловероятные события, но способные оказать существенное влияние на долговременную безопасность системы захоронения РАО.

При принятии решений по результатам оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО не рекомендуется рассматривать в качестве определяющих сценарии, вероятность которых не может быть адекватно оценена (например, террористический акт, боевые действия, вторжение человека в систему захоронения РАО), или сценарии, основанные на изменении условий, адекватный прогноз которых в настоящее время не может быть сделан (например, изменение образа жизни и рациона питания населения, повышение безопасности за счет научно-технического прогресса). Подобные расчеты следует рассматривать только как дополнительную информацию.

## 6. Выводы

В данной работе продемонстрирован подход к разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО на основе международной базы факторов АЯЭ ОЭСР, с учетом требований законодательства РФ.

Выполнен анализ положений ФНП и РБ на соответствие рекомендациям международных организаций (МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР), который показал, что методические аспекты учета ОСП при обосновании долговременной безопасности системы захоронения РАО, представленные в тех и других документах, совпадают.

Разработан перечень ОСП для оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО с учетом положений как международных документов, так и законодательства РФ.

Результаты работы могут быть использованы при оценке долговременной безопасности ПГЗ ЖРО.

## Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-14: утверждены приказом Ростехнадзора от 22 августа 2014 г. № 379.
2. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ.
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-17: утверждены приказом Ростехнадзора от 30 ноября 2017 г. № 514.
4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. НП-100-17: утверждены приказом Ростехнадзора от 23 июня 2017 г. № 218.

5. Руководство по безопасности при использования атомной энергии. Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов. РБ-117-16: утверждено приказом Ростехнадзора от 14 декабря 2016 г. № 531.
6. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности, SSR-5. Международное агентство по атомной энергии, Вена, 2011.
7. Yucca Mountain Review Plan, Final Report. NUREG-1804, Revision 2. Washington, D.C.: U.S.
8. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Guide. International Atomic Energy Agency. SSG-23. Vienna, 2012.
9. Scenario Development Workshop Synopsis. Integration Group for the Safety Case. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. June 2015.
10. Features, Events, and Processes for the Total System Performance Assessment: Methods. Sandia National Laboratories. ANL-WIS-MD-000026 REV 00, 2008.
11. Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2000.
12. NEA. Disposal of Radioactive Waste: Can Long-term Safety be Evaluated? An International Collective Opinion, NEA/IAEA/CEC. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 1991.
13. NEA International FEP Database: Version 2.1 User Guide, Nuclear Energy Agency, 2014.
14. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Specific Safety Guide. International Atomic Energy Agency. SSG-14. Vienna, 2011.
15. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований. Методические рекомендации. МР 2.6.1.0098-15, М., 2015.
16. Руководство по безопасности при использования атомной энергии. Состав и содержание отчета по обоснованию безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. РБ-139-17: утверждено приказом Ростехнадзора от 18 января 2018 г. № 20.
17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14: утверждены приказом Ростехнадзора от 15 декабря 2014 г. № 572.
18. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Размещение пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. НП-060-05: утверждены постанов. Ростехнадзора от 31 августа 2005 г. № 3.

## References

1. Federal Safety Regulations in the Field of the Use of Atomic Energy. Disposal of Radioactive Waste. Principles, Criteria and Main Safety Requirements. NP-055-14: Approved by Rostechnadzor Order № 379 of August 22, 2014.
2. On Management of Radioactive Waste and Amendment of Some Legislative Acts of the Russian Federation: Federal Law № 190-FZ of July 11, 2011.
3. Federal Safety Regulations in the Field of the Use of Atomic Energy. Consideration of Natural and Human-Induced External Impacts at Nuclear Facilities. NP-064-17: Approved by Rostechnadzor Order № 514 of November 30, 2017.
4. Federal Safety Regulations in the Field of the Use of Atomic Energy. Requirements for the Structure and Contents of Safety Analysis Report for Radioactive Waste Disposal Facilities. NP-100-17: Approved by Rostechnadzor Order № 218 of June 23, 2017.
5. Safety Guide for the Use of Atomic Energy. Assessment of the Long-Term Safety of Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste. RB-117-16: Approved by Rostechnadzor Order № 531 of December 14, 2016.
6. Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Requirements, SSR-5. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2011.
7. Yucca Mountain Review Plan, Final Report. NUREG-1804, Revision 2. Washington, D.C.: U.S.
8. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Guide. International Atomic Energy Agency. SSG-23. Vienna, 2012.

9. Scenario Development Workshop Synopsis. Integration Group for the Safety Case. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. June 2015.
10. Features, Events, and Processes for the Total System Performance Assessment: Methods. Sandia National Laboratories. ANL-WIS-MD-000026 REV 00, 2008.
11. Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2000.
12. NEA. Disposal of Radioactive Waste: Can Long-term Safety be Evaluated? An International Collective Opinion, NEA/IAEA/CEC. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 1991.
13. NEA International FEP Database: Version 2.1 User Guide, Nuclear Energy Agency, 2014.
14. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Specific Safety Guide. International Atomic Energy Agency. SSG-14. Vienna, 2011.
15. Assessment of the Radiological Risk for Patients Subjected to Imaging. Guidelines. MR 2.6.1.0098-15, M., 2015.
16. Safety Guide on the Use of Atomic Energy. Structure and Contents of a Safety Analysis Report for a Deep Disposal Facility for Liquid Radioactive Waste. RB-139-17: Approved by Rostekhnadzor Order № 20 of January 18, 2018.
17. Federal Safety Regulations in the Field of the Use of Atomic Energy. Acceptance Criteria for the Disposal of Radioactive Waste. NP-093-14: Approved by Rostekhnadzor Order № 572 of December 15, 2014.
18. Federal Safety Regulations in the Field of the Use of Atomic Energy. Siting of Nuclear and Radioactive Material Storage Facilities. Basic Criteria and Safety Requirements. NP-060-05: Approved by Rostekhnadzor Resolution № 3 of August 31, 2005.

