

# СТАТЬИ

## КРИТЕРИИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНИЛИЩ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

- В. И. Величкин, д-р геол.-минер. наук (Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минерологии и геохимии РАН),  
П. П. Полуэктов, д-р физ.-мат. наук (ГНЦ "Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А. Бочвара"),  
А. А. Строганов, канд. физ.-мат. наук (Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности),  
Р. Б. Шарафутдинов (Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности)

### Введение

Образовавшиеся в результате предыдущей деятельности и образующиеся в настоящее время радиоактивные отходы (РАО) должны быть надежно изолированы от окружающей человека среды. Действующая в Российской Федерации система обращения с РАО и отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) создавалась в соответствии с существовавшими в 50-60-е годы подходами к обеспечению безопасности.

В 1991-1995 гг. в Российской Федерации приняты законодательные акты общего характера, направленные на обеспечение ядерной и радиационной безопасности [1,2,3]. Они содержат не только общие положения правовой системы по предотвращению вредного воздействия хозяйственной и иной деятельности, но и конкретные статьи, относящиеся к обеспечению безопасности при обращении с ядерными материалами, радиоактивными веществами и, в частности, с РАО.

Статья 47 "Хранение и переработка ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов" Федерального закона "Об использовании атомной энергии" устанавливает, что при хранении и переработке РАО должна обеспечиваться надежная защита работников объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), населения и окружающей среды от недопустимого радиационного воздействия и радиоактивного загрязнения. В статье 48 "Хранение или захоронение радиоактивных отходов" установлено, что при хранении или захоронении РАО должны быть обеспечены их надежная изоляция от окружающей среды, защита **настоящего и будущих поколений**, биологических ресурсов от радиационного воздействия сверх установленных пределов.

Таким образом, закон выделяет для различных этапов обращения с РАО (ОЯТ) различные аспекты обеспечения безопасности.

Принципиальной и существенной особенностью обеспечения безопасности хранилищ РАО (ОЯТ) (далее - хранилищ) в отличие от ядерных установок и радиационных источников является обязательность обеспечения их безопасности как в периоды эксплуатации и вывода из эксплуатации (как правило, 30-50 лет), так и в период после вывода из эксплуатации, поскольку в общем случае радиоактивные изотопы, содержащиеся в РАО (ОЯТ), особенно альфа-активные трансурановые элементы, сохраняют свою радиотоксичность на протяжении от сотен до миллионов лет<sup>1</sup>.

Эта особенность является также и главной отличительной чертой анализа (оценки) безопасности хранилищ по сравнению с анализом (оценкой) безопасности ядерных установок и радиационных источников, чья потенциальная радиационная опасность для человека и окружающей среды сохраняется только в течение периода времени их эксплуатации и вывода из эксплуатации и по завершении надлежащим образом разработанных и выполненных мероприятий по выводу из эксплуатации должна быть полностью устранена.

Ряд положений указанного закона отражает существующие в Российской Федерации тенденции к гармонизации подходов к обеспечению безопасности при захоронении (долговременном хранении) РАО с принятыми международным сообществом принципами и критериями безопасного захоронения [4]. Указанное также подтверждается фактом присоединения Российской Федерации в январе 1999 г. к Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами (далее - Объединенная конвенция), положения которой являются сформулированным изложением современного мировоззрения на вопросы обеспечения и регулирования безопасности при обращении с РАО (ОЯТ) [5].

Однако существующая практика обеспечения безопасности хранилищ не вполне согласуется с рядом важных принципов обеспечения безопасности, принятых в последние годы международным сообществом, а именно "Защита будущих поколений" и "Невозложение бремени на будущие поколения"

---

<sup>1</sup> В статье рассматриваются аспекты безопасности долговременного хранения (захоронения) РАО и ОЯТ.

[4,5].

Практика нормативного регулирования безопасности хранилищ также не выделяет аспектов долговременной безопасности и не учитывает ряд важных положений, вытекающих из существующего в международном сообществе подхода, в частности :

- установление требований к оценке всех относящихся к хранилищу факторов, которые могут оказать влияние на безопасность хранилища не только в течение срока его эксплуатации, но и в период после его закрытия;
- установление требований к оценке вероятного воздействия хранилища на безопасность отдельных лиц, населения и окружающей среды с учетом возможных изменений состояния хранилища после его закрытия<sup>2</sup>.

Таким образом, несмотря на то, что в настоящее время в Российской Федерации имеются правовые основы, однако отсутствует современная методология регулирования долговременной безопасности хранилищ, учитывающая специфику отечественного ядерного топливного цикла.

Принятый международным сообществом императив радиологической защиты ("индивидуумы, живущие в будущем, должны быть защищены в не меньшей степени, что и люди в настоящем") Российская Федерация установила законодательно.

Проблема состоит в том, как это воплотить в практику. И, в первую очередь, как установить такие критерии радиологической защиты, чтобы:

- их выполнение действительно гарантировало бы безопасность для всего интервала времени существования потенциальной опасности для человека содержащихся в РАО (ОЯТ) радионуклидов;
- их можно было бы реально использовать для корректного обоснования и оценки безопасности хранилища на всем этом интервале времени с учетом резкого возрастания со временем погрешности оценки;
- они были бы достаточно убедительны и понятны широкой научной и общественной аудитории.

Международным сообществом признано [6,7], что одной из важнейших научно-практических проблем регулирования долговременной безопасности хранилищ является разработка или определение наиболее приемлемой для данного государства научно обоснованной системы критериев радиационной безопасности хранилищ, позволяющей выполнять надежные обоснование и оценку их безопасности для удаленных в будущее диапазонов времени.

Вытекающие из принципиальной общей специфики обеспечения и регулирования долговременной безопасности хранилищ проблемы и возможные пути их решения рассматриваются ниже.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РАБОТЫ

Представляется очевидным, что при совершенном проекте хранилища (инженерных сооружениях, геологической формации и площадки размещения), при любых мерах по обеспечению качества систем (элементов) и оборудования хранилища, при сколь угодно высокой квалификации работников (персонала), осуществляющих прием и размещение РАО (ОЯТ) в хранилище, а также работы по закрытию хранилища, при принятии других реально осуществимых мер по обеспечению его безопасности для удаленных в будущее диапазонов времени, всегда остается ненулевой вероятностью внешнего воздействия природного и (или) техногенного происхождения. Неумышленное вторжение человека в область расположения хранилища или маловероятные процессы и факторы природного происхождения (землетрясение и др.) приведут к разрушению одного или нескольких физических барьеров хранилища и к ускоренному поступлению радионуклидов в биосферу.

Специфическими негативными последствиями таких воздействий на хранилище являются так называемые потенциальные (вероятностные) облучения лиц из населения, которые могут произойти (если эти разрушительные события происходят в действительности), а могут и не произойти (если указанные события не происходят).

В этом состоит принципиальное отличие потенциального облучения от детерминированного облучения, которое имеет место всегда (точнее, с вероятностью, очень близкой к единице) при нормальной эволюции хранилища и вмещающих (несущих) его грунтов (горных пород).

При рассмотрении вопросов безопасности хранилища в диапазонах времени после прекращения активного и пассивного контроля площадки расположения хранилища<sup>3</sup> из консервативных соображений следует принять, что маловероятные внешние воздействия природного и (или) техногенного происхождения могут произойти тогда, когда информация о существовании данного хранилища будет уже утрачена, несмотря на все принятые меры по ее сохранению.

<sup>2</sup> Для того чтобы отметить период жизненного цикла хранилища после вывода его из эксплуатации, т. е. выделить аспекты долговременной безопасности, в статье 2 Объединенной конвенции используется понятие "закрытие" - завершение всех операций в определенный момент после помещения ОЯТ или РАО в установку для захоронения (хранилище). Оно включает окончательные инженерно-технические или другие работы, необходимые для приведения хранилища в состояние, которое будет оставаться безопасным в течение продолжительного времени.

<sup>3</sup> См. статью 17 Объединенной конвенции.

По этой причине рассмотрение вопросов безопасности хранилища ни в коей мере не может основываться на допущении возможности проведения специальных мероприятий по ограничению облучения населения (так называемых корректирующих вмешательств) в случае, если упомянутые внешние воздействия все-таки произойдут<sup>4</sup>. Для учета этой специфики при рассмотрении вопросов безопасности хранилищ необходимо дополнить установленные критерии безопасности нормального (детерминированного) облучения населения в отдаленном будущем критериями безопасности потенциального (вероятностного) облучения.

Второй из специфических проблем, относящихся к предмету настоящей статьи, является значительная (и возрастающая со временем) погрешность оценки показателей радиационного воздействия (дозы и риска) на человека радионуклидов из хранилищ для отдаленных диапазонов времени в будущем (тысячи и десятки тысяч лет) из-за существенных неопределенностей характеристик состояния биосферы и популяции человека. Это обстоятельство обуславливает существенное различие в длительностях диапазонов времени, на которых возможно корректное применение показателя риска, по сравнению с показателем дозы даже при анализе и оценке безопасности нормального (детерминированного) облучения населения в отдаленном будущем.

На еще больших диапазонах времени в будущем (миллионы лет и более) указанная оценка абсолютных значений показателей радиационного воздействия (дозы и риска) на человека радионуклидов из хранилища не может быть получена со сколько-нибудь приемлемой точностью из-за практически полной неопределенности значений почти всех исходных параметров, необходимых для проведения этой оценки. В статье задача разработки специальной методологии оценки долговременной безопасности хранилищ для столь отдаленных в будущее диапазонов времени не рассматривается.

Отметим, что система критериев радиационной безопасности для всех этапов жизненного цикла хранилища вплоть до его закрытия включительно может быть принята полностью идентичной установленной Нормами радиационной безопасности (НРБ-96)<sup>5</sup> [8]. Весь изложенный ниже материал относится только к периоду времени после закрытия и прекращения активного и пассивного ведомственного контроля хранилища.

## **2. ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНИЛИЩ ДЛЯ БУДУЩИХ ПОКОЛЕНИЙ И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ**

Принципы защиты индивидуумов и населения от воздействия радиации, принятые в разных странах, одинаковы и основаны на принятии в качестве исходного положения, что любая доза радиации может причинить вред.

Поэтому они нацелены на ограничение вероятности причинения этого вреда индивидууму пределами приемлемых уровней и на снижение до разумного минимума суммарного вреда для всей популяции человека.

Однако конкретная формальная реализация этих принципов в системе обеспечения радиационной безопасности разных стран может быть различна. Это различие прежде всего проявляется в форме принятых критериев радиационной безопасности. Будучи несущественным при регулировании безопасности ядерных установок и радиационных источников, а также хранилищ вплоть до их закрытия включительно, оно может серьезно влиять на формальную применимость системы критериев при решении задачи обоснования (оценки) долговременной безопасности хранилищ за пределами времени после закрытия хранилища. Этот вопрос подробно рассмотрен в следующих разделах.

### **2.1. Возможные формы критериев радиационной безопасности**

#### **2.1.1. Риск и доза как показатели радиационной безопасности**

Наиболее универсальным и непосредственным показателем потенциальной опасности (ущерба) для человека любого фактора воздействия, вида человеческой деятельности и даже просто жизни при существующем неблагоприятном состоянии внешней и внутренней сред обитания человека является риск  $r$ , определяемый обычно как среднестатистическая вероятность дополнительных смертей, вызываемых именно этим фактором или видом человеческой деятельности. Существуют хорошо обоснованные подходы, позволяющие дополнительно количественно учесть в значении этого риска ущерб для здоровья, не связанный с вероятностью смерти [9]. В зависимости от контекста риск может быть величиной размерной (например,  $[r]=1/\text{год}$ ,  $[r]=1/\text{событие}$ ) или безразмерной (полный риск в течение всей жизни).

При рассмотрении опасности радиационных факторов воздействия (т. е. риска, связанного с воздействием этих факторов, - радиационного риска) в соответствии с достигнутым международным

<sup>4</sup> Проведение корректирующих вмешательств является важным элементом системы обеспечения радиационной безопасности ядерных установок и радиационных источников, для которых, в отличие от хранилищ, возможность уменьшения негативных последствий запроектной аварии посредством управления аварией или реализацией планов мероприятий по защите населения должна быть предусмотрена и реализована.

<sup>5</sup> В 1999 г. вышел отредактированный вариант НРБ-96 - НРБ-99, однако это не меняет существа рассмотренных в статье вопросов.

консенсусом принято считать, что:

- для значений уровней облучения ниже определенного порога (так называемого порога возникновения детерминированных эффектов облучения) вероятность возникновения негативных последствий облучения пропорциональна уровню облучения, а тяжесть проявления этих последствий не зависит от него<sup>6</sup>;
- для значений уровней облучения выше этого порога вероятность возникновения негативных последствий не зависит от конкретного значения уровня облучения и принимается равной единице, а тяжесть проявления этих последствий зависит от него.

При определении опасности возникновения отдаленных недетерминированных негативных последствий радиационного воздействия практически эквивалентным риску показателем считается индивидуальная эффективная эквивалентная доза<sup>7</sup> облучения  $E$ , связанная со значением риска  $r(E)$  простым линейным соотношением:

$$r(E) = r_E E, \quad (1)$$

где  $r_E$  - коэффициент, достаточно хорошо определенный в широком диапазоне изменения значений  $r$  и  $E$  ( $0 < E < E_{пор}$ ), в котором с достоверностью еще не могут возникнуть детерминированные неблагоприятные эффекты облучения. Существует международный консенсус консервативного значения порога возникновения детерминированных эффектов облучения  $E_{пор}$ . Во всех странах оно принимается равным 0,5 Зв. Это значение признано максимально консервативным, поскольку реальное значение порога заведомо выше.

Что касается зависимости, связывающей значение риска со значением эффективной дозы  $E$  при  $E_{пор} < E$ , то существует несколько различных подходов к ее определению и принятые в странах нормы и стандарты радиационной безопасности регламентируют ее по-разному с большей или меньшей степенью консерватизма.

Отметим, что во всех без исключения случаях наличие регламентированной зависимости  $r_{рег}(E)$  радиационного риска  $r$  от дозы облучения  $E$ , определенной во всем возможном диапазоне изменения дозы, обуславливает принципиальную возможность выражать как дозу в терминах риска, так и риск в терминах дозы.

### 2.1.2. Особенности использования критериев безопасности, основанных на ограничении риска и дозы

Принятие дозового критерия радиационной безопасности основано на использовании индивидуальной дозы облучения и формально определяет состояние безопасности населения достигнутым в том случае, когда значение средней (за определенный период времени  $T$  лет) суммарной годовой индивидуальной дозы облучения любого лица из населения  $E$  от всех техногенных источников излучения (за исключением источников излучения, используемых в медицине) для любого из таких определенных периодов времени не превышает установленного нормативами данной страны предельного значения  $E_0$ :

$$E < E_0. \quad (2)$$

Значение  $E_0$  называется основным дозовым пределом облучения лиц из населения.

Поскольку проведение инструментального определения значения реальных доз облучения каждого лица из населения (в отличие от работников ОИАЭ) практически невозможно, международным сообществом в результате почти полувековой практики регулирования радиационной безопасности принят следующий весьма важный принцип: индивидуальная доза облучения населения определяется по среднему (а не по максимальному, что очень важно) значению дозы облучения ограниченной группы лиц из населения (так называемой критической группы лиц), однородной по полу, возрасту и виду деятельности, подвергающейся в данных условиях максимальному облучению.

Аналогично принятие критерия риска основано на использовании индивидуального риска  $r(E)$  возникновения негативных последствий для здоровья индивидуума в результате его облучения всеми техногенными источниками. Соответственно критерий риска ограничивает именно этот индивидуальный риск установленными нормативами разных стран предельным значением приемлемого (считающегося безопасным) риска  $R_0$ :

$$r(E) < R_0. \quad (3)$$

В этом случае значение соответствующего дозового предела дозы  $E_0$  в явном виде определяется как производное от значения допустимого риска  $R_0$  в соответствии с выражением (1).

В большинстве случаев в разных странах по сложившейся традиции предпочтение отдается терминам дозы, т. е. устанавливается именно предел эффективной дозы облучения от всех контролируемых источников радиации  $E_0$ . Однако само значение этого предела всегда определено

<sup>6</sup> Значение коэффициента пропорциональности, принятое при оценке риска облучения “допороговых уровней”, а также явный вид зависимости радиационного риска от характеристики воздействия облучения “запороговых” уровней, принятые в разных странах, могут различаться, причем в ряде случаев весьма существенно.

<sup>7</sup> Изначально “доза радиации” (поглощенная доза) - это мера энергии, переданной радиацией веществу, но будучи взвешена по типу излучений и чувствительности различной человеческой ткани (эффективная доза), она может быть соотнесена с вероятностью возникно

(явным или неявным образом, роли не играет) в соответствии с выражением (1), т. е. исключительно на основе значения приемлемого уровня риска для здоровья индивидуума  $R_0$ .

Таким образом, хотя во всех странах принципом обеспечения радиационной безопасности населения является ограничение риска радиационных последствий облучения приемлемыми уровнями, только в некоторых из них этот принцип используется в качестве критерия радиационной безопасности, т. е. в явном виде. В большинстве стран традиционно используется дозовый критерий.

### 2.1.3. Особенности использования критериев риска и дозы при оценке безопасности вероятностных (потенциальных) облучений

В случаях, если облучение происходит с высокой вероятностью  $P$  (практически равной единице), критерий ограничения дозы по ряду причин значительно более удобен для применения, чем критерий риска. При возникновении маловероятных аварий, при которых потенциально возможно переоблучение отдельных лиц из населения свыше установленных дозовых пределов, законодательства разных стран определяют необходимость проведения специальных корректирующих мероприятий по защите населения, направленных на предотвращение переоблучения. Критерии принятия решений (критерии вмешательства) о реализации таких мероприятий также установлены в форме набора дискретных значений доз облучения населения, возможных при различных аварийных ситуациях. Но, как минимум, часть этих дискретных значений всегда выше, чем произведение  $E_0T$ , и это косвенно подтверждает, что при определении указанного набора в неявном виде был (и должен был быть) использован критерий риска.

Однако, несмотря на сколь угодно совершенные планы мероприятий по защите населения и средства радиационной защиты населения на случай радиационных аварий, вероятность  $P(E)$  для индивидуумов получить в результате аварии эффективную годовую дозу облучения  $E$ , превышающую установленное допустимое значение  $E_0$ , будет оставаться отличной от нуля.

В странах, где в качестве критерия безопасности установлен критерий риска, вышеописанная ситуация не создает проблем при проведении количественного анализа безопасности, поскольку полностью укладывается в рамки связанного с концепцией риска математического аппарата теории вероятностей.

Так, оценка безопасности маловероятных аварий, влекущих за собой облучение индивидуумов большими дозами, сводится к проверке выполнения этого критерия, записанного в следующей форме, справедливость которой следует из основных определений математической статистики:

$$r(E; P(E)) = P(E)r_{reg}(E) < R_0, \quad (4)$$

где  $r(E; P(E))$  - безусловный индивидуальный радиационный риск, которому подвергаются в силу возможности возникновения аварии индивидуумы, принадлежащие к критической группе лиц из населения;

$P(E)$  - вероятность облучения (в результате возможной аварии) этих индивидуумов дозой  $E$ ;

$r_{reg}(E)$  - связанный с этим облучением (при условии, что оно уже произошло) так называемый условный радиационный риск.

Не вызывает трудностей использование критерия риска при оценке индивидуального радиационного риска, обусловленного возможностью реализации для одного и того же индивидуума нескольких сценариев облучения<sup>8</sup>, например, одного так называемого "нормального" (т. е. связанного с облучением его при нормальной эксплуатации хранилища, которое предположительно будет иметь место с вероятностью, почти равной единице) и одного или нескольких сценариев потенциального облучения в результате маловероятных процессов и факторов техногенного или природного происхождения:

$$r(\{E_i\}; \{P_i(E_i)\}) = \sum_i P_i(E_i)r_{reg}(E_i), \quad (5)$$

где  $\{P_i(E_i)\}$  - значения вероятностей реализации этих сценариев;

$\{E_i\}$  - связанные с ними значения возможных доз облучения индивидуума;

$i = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  - число сценариев;

$r(\{E_i\}; \{P_i(E_i)\})$  - полный радиационный риск индивидуума.

В странах, где установлен дозовый критерий, рассматриваемая ситуация (необходимость анализа вероятностных сценариев облучения населения) может создать определенные проблемы при проведении количественного обоснования и оценки безопасности.

Эти проблемы не возникают до тех пор, пока все значения доз облучения  $\{E_i\}$  не превышают

<sup>8</sup> Орган государственного регулирования ядерной безопасности Швеции (Swedish Nuclear Power Inspectorate) в техническом отчете (SKI Project 90 Volume I. SKI Technical Report TR 91:23, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, Sweden, 1991) определяет термин "сценарий" следующим образом: "Сценарий есть гипотетическая последовательность процессов и событий, сконструированная с целью проиллюстрировать диапазон возможных в будущем поведения и состояний системы захоронения РАО для разработки методики проведения оценки безопасности и выполнения этой оценки". Нет необходимости описывать все возможные сценарии. Однако рассмотрение полного набора сценариев должно позволить выполнить адекватную разумную (и устойчивую в математическом смысле) проверку безопасности системы по отношению как к наиболее вероятному, так и к менее правдоподобию будущему.

порога возникновения детерминированных последствий  $E_{пор}$ , т.е. не выходят за пределы диапазона линейной зависимости риска от дозы (1), поскольку в этом (и только в этом) случае выражение (5) может быть преобразовано к виду:

$$r(\{E_i\}; \{P_i(E_i)\}) = r_E[\sum_i P_i(E_i)E_i] . \quad (6)$$

Величина  $\sum P_i(E_i)E_i$  - это не что иное, как сумма доз  $E_i$ , усредненных с весами, равными значениям вероятностей  $P_i(E_i)$  получения этих доз одним и тем же индивидуумом, т. е. математическое ожидание или среднее значение дозы, иногда называемое "взвешенной" дозой  $E_{взвеш}$ :

$$E_{взвеш} = \sum_i P_i(E_i)E_i . \quad (7)$$

Выражения (5) и (7) тривиальным образом обобщаются на случай учета непрерывного распределения плотности вероятности облучения индивидуума с данным значением дозы (риска) заменой всей суммы (или ее части) соответствующим интегралом по диапазону изменения возможных значений доз  $[E_{ср} - \Delta E, E_{ср} + \Delta E]$ :

$$E_{ср} + \Delta E_+ \\ \int_{E_{ср} - \Delta E_-} r_{рег}(E)p(E)dE . \quad (5 a)$$

$$E_{ср} + \Delta E_+ \\ E_{взвеш} = E_{ср} = \int_{E_{ср} - \Delta E_-} Ep(E)dE . \quad (7 a)$$

Этот общий случай достаточно важен, если учесть, что такие непрерывные распределения необходимо корректно интерпретировать всякий раз, когда результат оценки значения дозы облучения (или обусловленного ею радиационного риска) характеризуется существенной погрешностью и, следовательно, фактически полученная данным индивидуумом доза (и связанный с ней условный риск) могут с некоторой вероятностью отличаться от средних значений.

Таким образом, в указанном диапазоне изменений значений дозы замена дискретной или непрерывной плотности вероятности распределения значений дозы облучения средним значением дозы (значением "взвешенной" дозы) не приводит к изменению значения оценки радиационного ущерба, причиненного облучением, - единственной представляющей интерес характеристики радиационного воздействия.

Ситуация существенно меняется, если хотя бы одно из дискретных значений доз потенциального облучения  $\{E_i\}$  или верхнее граничное значение дозы ( $E_{ср} + \Delta E_+$ ) непрерывного распределения плотности вероятности  $p(E)$  превысит значение порога возникновения детерминированных последствий облучения  $E_{пор}$  и линейная зависимость риска от дозы (1) нарушится.

Безусловно, критерий риска и здесь может быть успешно использован для обоснования и оценки безопасности данного потенциального облучения, более того, значение риска в самом общем виде может быть выражено в терминах дозы (назовем это значение  $E_r$ ) согласно выражению, близкому по смыслу выражению (7):

$$E_r = \frac{\sum_i P_i(E_i)r_{рег}(E_i)}{r_E} . \quad (8)$$

Отметим, что если все значения доз облучения  $\{E_i\}$  не превышают  $E_{пор}$ , определения "взвешенной" дозы  $E_{взвеш}$  и "риска, выраженного в терминах дозы"  $E_r$ , совпадают.

В рассматриваемом же случае, когда возможны значения индивидуальных доз, большие, чем  $E_{пор}$ , определение "взвешенной" дозы (7) и формально и по существу отличается от определения "риска, выраженного в терминах дозы" (8).

Соответственно применение дозового критерия с использованием в качестве показателя безопасности "риска, выраженного в терминах дозы" вместо значения средней или "взвешенной дозы" формально становится некорректным (будучи безусловно правильным по существу, поскольку это эквивалентно использованию соответствующего значения риска при проверке выполнения критерия риска).

Поэтому в странах, где в качестве критерия безопасности принят дозовый критерий, определение "взвешенной" дозы (7) иногда расширяют так, чтобы оно совпадало с определением (8), чтобы формально избежать использования термина "риск", поскольку для населения этот термин менее понятен и приемлем, чем термин "доза".

В ряде стран (в том числе и в Российской Федерации) регламентированная соответствующими нормативными актами зависимость  $r_{рег}(E)$  радиационного риска  $r$  от дозы облучения  $E$  не является взаимно однозначной функцией. В этих случаях определение "риска, выраженного в терминах дозы", если его решено использовать, подлежит уточнению.

Возможно поэтому в большинстве стран, в которых принят дозовый критерий, используется альтернативный способ избежать термина "риск" при оценке безопасности неизбежно возможных, хотя и маловероятных аварий, влекущих за собой облучение индивидуумов большими дозами. Безопасность таких ситуаций регулируется введением дополнительного требования к ограничению вероятности  $P(E > E_0)$

реализации этих аварий. Формально (с математической точки зрения) это означает введение дополнительного критерия безопасности:

$$P(E > E_0) < P_0, \quad (9)$$

где  $P_0$  - предельно допустимое значение вероятности возникновения указанных аварийных ситуаций.

В странах, принявших критерий риска, во введении такого дополнительного независимого ограничения, строго говоря, нет никакой необходимости.

#### 2.1.4. Минимизация коллективных риска и дозы

В большинстве стран в соответствии с общими принципами радиационной защиты населения (любая доза радиации может причинить вред), наряду с рассмотренными выше основными критериями радиационной безопасности, ограничивающими индивидуальные риски и/или дозы лиц из населения, устанавливается также дополнительное требование к минимизации коллективных рисков  $\Gamma_{\text{колл}}$  и(или) доз  $E_{\text{колл}}$ , определенных следующим образом:

$$\Gamma_{\text{колл}} = \sum_j N_j(r_j) \cdot r_j, \quad (10)$$

$$E_{\text{колл}} = \sum_j N_j(E_j) E_j, \quad (11)$$

где  $N_j(r_j)$ ,  $(N_j(E_j))$  - соответственно количество человек, которые подвергаются или будут подвергаться радиационному риску с данным значением  $r_j$ , (получивших или могущих получить в будущем дозу облучения, равную  $E_j$ ), а суммирование ведется по всей (или по всем) потенциально облучаемой (облучаемым) за счет данного источника излучения популяции (популяциям) человека.

При установлении требования минимизации коллективных рисков или доз (обычно называемого принципом ALARA - так низко, как это разумно достижимо), как правило, устанавливаются также нижние границы диапазона значений рисков или доз (так называемые незначимый риск или незначимая доза), при достижении которых дальнейшей оптимизации (минимизации значений коллективных рисков или доз) проводить не требуется.

#### 2.1.5. Специфика обоснования и оценки долговременной безопасности хранилищ

Одной из специфических особенностей оценки безопасности хранилищ в отдаленном будущем является то, что негативные последствия потенциальных облучений лиц из населения, связанные с возможными маловероятными воздействиями на хранилища, не могут быть скомпенсированы проведением специальных мероприятий (корректирующих вмешательств) по ограничению облучения населения.

Как было показано в разделе 2.1.3, это обстоятельство не оказывает никакого влияния на порядок проведения обоснования и оценки безопасности хранилищ в случае, если критерии радиационной безопасности населения сформулированы в терминах риска. Если же они сформулированы в терминах дозы, формальное выполнение оценки безопасности становится весьма затруднительным или вообще невозможным без дополнительного введения специальной системы критериев радиационной безопасности потенциального облучения - полной, внутренне непротиворечивой и согласованной с существующей системой критериев радиационной безопасности детерминированного облучения.

Уместно отметить, что критерии радиационной безопасности (детерминированного облучения) населения в Российской Федерации установлены в виде ограничения эффективной эквивалентной дозы облучения допустимыми предельными значениями, т.е. именно в терминах дозы. При этом критерии радиационной безопасности потенциального облучения в отечественных нормативных документах не установлены, несмотря на то, что в НРБ-96 приводится определение потенциального облучения и отмечается, что связанный с этим облучением риск не включен в установленное критериями радиационной безопасности детерминированного облучения населения значение дозовых пределов.

В связи с тем, что в НРБ-96 детально определены критерии проведения корректирующего вмешательства, то отпадает необходимость введения критериев радиационной безопасности потенциального облучения только по отношению к оценке безопасности ядерных установок и радиационных источников. Однако такие критерии остаются необходимыми для безопасности хранилищ в удаленных в будущем периодах времени после их закрытия, когда информация о существовании и особенностях данных хранилищ может быть уже утрачена.

В разделе 3 приведены предложения авторов о принятии для регулирования долговременной безопасности хранилищ необходимых критериев радиационной безопасности потенциального облучения населения в форме, полностью согласованной со всеми положениями радиационной безопасности.

Но существует и другая сторона общей проблемы регулирования безопасности хранилищ, связанная с отмеченной в разделе 2.1.3 неприменимостью дозового критерия даже для оценки безопасности нормального (детерминированного) облучения населения, если погрешность определения дозы облучения будет так велика, что характеризующее ее распределение плотности вероятности ожидаемых значений дозы будет распространяться в область значений, превышающих порог возникновения детерминированных эффектов облучения (табл. 1). Эта сторона проблемы рассмотрена в

разделе 2.2.

Таблица 1

Возрастание неопределенности значений различных параметров, используемых при оценке безопасности системы захоронения, в зависимости от времени прогноза

Диапазон времени прогноза, лет	Наст. время 0-300	300- 1000	1000-10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	>10 <sup>6</sup>
Ущерб здоровью человека	Абсолютные значения		Усред- ненные значе- ния	Относительные значения по отношению к естественным фоновым	Непредсказуемо
Риск					
Индивидуальная доза					
<u>Популяция человека в районе хранилища</u>	Прогнозируемо для конкретной популяции человека		Непрогнозируемо		
<u>Осредненный образ жизни популяции человека</u>	Прогнозируемо для осредненной популяции человека		Непрогнозируемо		
Концентрации радионуклидов в окружающей среде	Абсолютные значения		Относительные значения		
Поток радионуклидов через биосферу	Абсолютные значения		Относительные значения		
<u>Климат и ландшафт</u>	Стабильно или прогнозируемо		Непрогнозируемо		
Поток радионуклидов из геосферы в биосферу	Абсолютные значения		Относительные значения	Непредсказуемо	
<u>Состояние геосферы</u>	Стабильно или прогнозируемо		Непрогнозируемо		
Поток радионуклидов через барьеры безопасности	Абсолютные значения			Непредсказуемо	
<u>Состояние инженерных барьеров</u>	Стабильно или прогнозируемо		Непрогнозируемо		
Радиоактивные отходы	Диапазон времени сохранения потенциальной опасности радионуклидов				

## **2.2. Влияние различных факторов на изменения элементов системы “хранилище - популяция человека” во времени**

Следует обратить внимание на неоднозначность понятий “биосфера” и “окружающая среда”, используемых в законодательстве Российской Федерации, в документах и публикациях международных организаций при рассмотрении вопросов безопасности захоронения РАО.

В. И. Вернадский под “биосферой” понимал всю часть планеты, в которой существует жизнь в любых своих проявлениях. Биосфера включает в себя часть литосферы (начиная с глубины несколько километров, где еще находят определенные виды микроорганизмов) и полностью охватывает гидросферу и атмосферу.

В соответствии с Законом РСФСР “Об охране окружающей природной среды” окружающая среда включает в себя:

- естественные экологические системы, озоновый слой атмосферы;
- землю, ее недра, поверхностные и подземные воды, атмосферный воздух, леса и иную растительность, животный мир, микроорганизмы, генетический фонд, природные ландшафты.

Таким образом, установленное законом понятие “окружающая природная среда” более емко, чем понятие “биосфера”, предложенное В.И. Вернадским.

Иной смысл вкладывается в эти два определения в документах и публикациях международных организаций, а также в научных работах, связанных с вопросами безопасности захоронения РАО.

Прежде всего под “биосферой” подразумевают непосредственное приповерхностное окружение популяции человека, в котором люди осуществляют (и которое влияет на) обычную жизнедеятельность [10]. Это нижний слой атмосферы, почва, приповерхностные подземные воды, сеть поверхностных водоемов (включая донные отложения относительно мелких водоемов и исключая глубокозалегающие донные отложения крупных водоемов), а также биота (сообщества живых организмов, существующие во всех элементах определенной таким специальным образом биосферы). Отметим, что в данном контексте система захоронения РАО (т.е. само хранилище и ближняя зона вмещающих (несущих) его грунтов (пород) даже при глубине захоронения всего несколько сотен метров рассматривается как не входящая в биосферу.

В статье эти два термина употребляются в узкоспециальном смысле и как идентичные.

При оценке безопасности нормального облучения населения за счет влияния хранилища возникают проблемы, связанные с очень большой и быстро возрастающей со временем погрешностью определения показателей радиационного воздействия (дозы и риска) на человека радионуклидов из хранилища.

Основная причина, приводящая к последовательному (по мере удаления рассматриваемого промежутка времени в далекое будущее) возрастанию погрешности результата оценки безопасности хранилища, - это невозможность корректно оценивать параметры цепочки переноса радионуклидов, содержащихся в захороненных РАО, от хранилища к популяции человека (см. схему) через различные элементы окружающей среды из-за изменчивости их свойств в геологических масштабах времени.

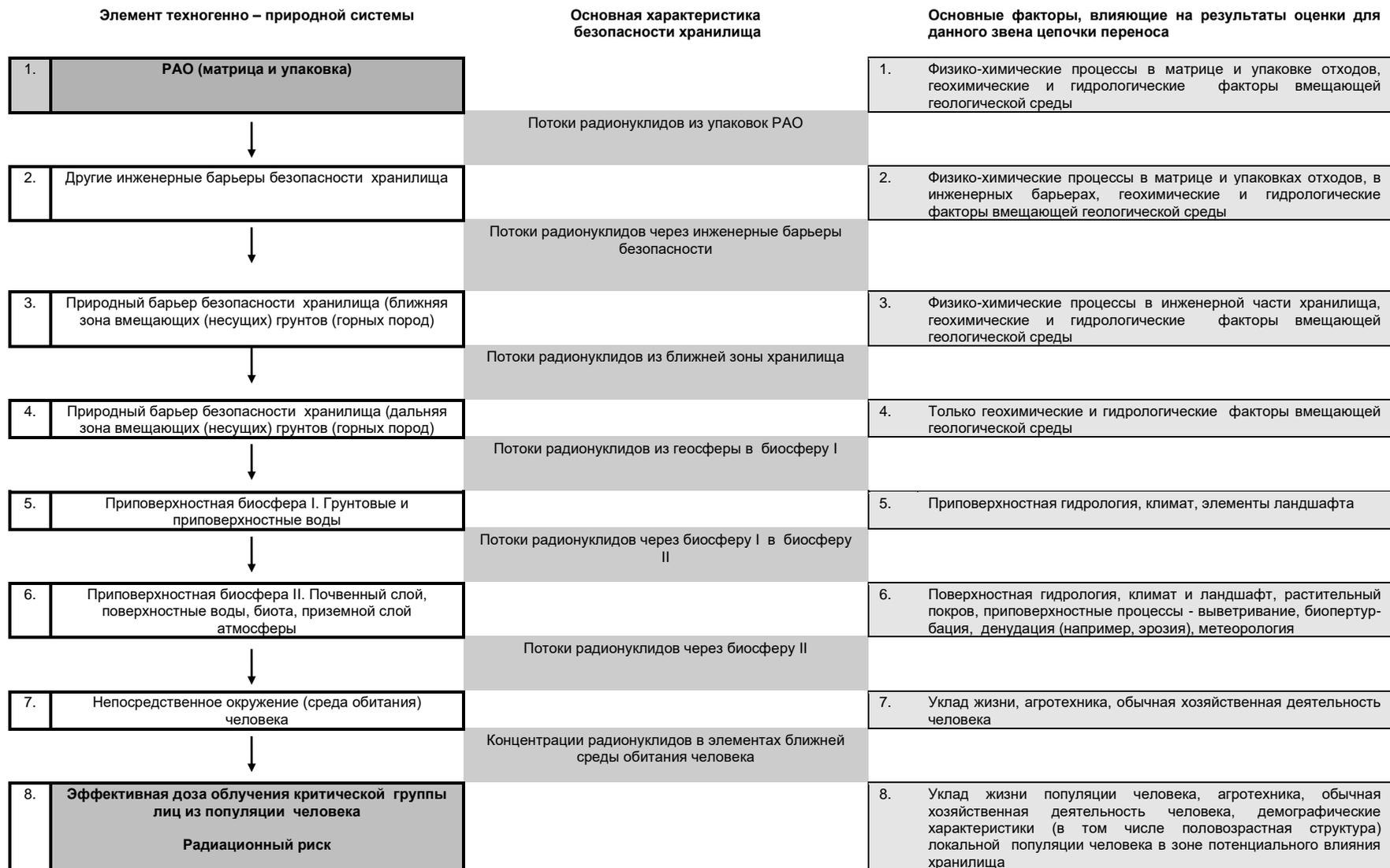
При моделировании последовательного ряда процессов результаты расчетов характеристик каждого предыдущего процесса служат исходными данными для расчета характеристик последующего. В этом случае погрешность расчетных прогнозов радиационного воздействия на человека радионуклидов из хранилища увеличивается тем в большей мере, чем большее количество этих процессов и их этапов вовлечено в моделирование и чем дальше в будущее удалено значение времени, для которого проводится оценка. Поэтому (см. схему) для любого отдельного значения времени самые большие неопределенности будут связаны с оценками воздействия на здоровье, а для любого отдельно взятого процесса неопределенности расчета его характеристик - возрастают по мере удаления в будущее значения времени, для которого проводится оценка. При этом характер (и скорость) увеличения неопределенностей результатов моделирования различных процессов миграции радионуклидов (в хранилище, в ближней и дальней зонах геосферы, в биосфере, по пищевым цепочкам и т. д.) существенно различен.

### **2.2.1. Образ жизни и деятельности популяции человека. Биосфера**

Формирование дозы облучения конкретных индивидуумов по всем возможным путям (внешнее и внутреннее облучение, в том числе доза при ингаляции, дозы, обусловленные пищевыми цепочками) зависит прежде всего от особенностей существования ограниченной популяции человека в районе потенциального влияния хранилища (типичные для данной местности биоценозы, расположение населенных пунктов на территории района, половозрастная структура населения, структура природопользования и потребления продуктов питания местного производства, система водоснабжения и т. д.). Максимальное время, для которого возможен прогноз развития такой локальной популяции, не превышает нескольких сотен лет (300 - 500), причем время достаточно достоверного прогноза тем меньше, чем меньше численность популяции (см. пункт 8 схемы).

В более широком смысле, т. е. осредненно по типичной популяции человека, формирование дозы облучения зависит от уклада жизни живущей в данный момент популяции, типичной структуры производства и потребления продуктов питания, принятых сельскохозяйственных технологий (см. пункт 7 схемы). Очевидно, что эти осредненные характеристики в значительно меньшей степени изменяются со временем, чем особенности существования локальной популяции человека. Но они существенно

**Последовательность проведения расчетной оценки формирования дозовых нагрузок на население, живущее в зоне потенциального влияния хранилища**



зависят от состояния биосферы в целом.

В соответствии с рекомендациями международных организаций указанные характеристики (так же, как и состояние биосферы) могут быть приняты в целом сходными с ныне существующими для периодов времени порядка 1000 лет. Иногда рассматривают периоды времени до 10 000 лет, поскольку примерно таков нынешний, начавшийся с концом последнего ледникового периода, период существования человека на Земле.

Предсказать и оценить возможные со временем изменения в биосфере значительно труднее, чем изменения защитных свойств инженерных барьеров безопасности и природных геологических барьеров (см. пункт 6 схемы). В монографии [10] отмечено, что причины этого достаточно многочисленны, но основными являются две, рассмотренные ниже.

Первая. Биосфера подвержена существенным естественным изменениям в течение промежутков времени, незначительных в геологических масштабах. При прочих равных условиях состояние биосферы и связанный с этим состоянием образ жизни популяции человека значительно влияют на уровень облучения человека.

Вторая. Одним из важных факторов, определяющих изменения биосферы (в узкоспециальном смысле), является собственно человеческая деятельность. В отличие от эволюции неживой природы или развития естественных биоценозов различные изменения характера человеческой деятельности трудно прогнозируемы даже для ближайшего будущего, в геологических же масштабах времени они практически непредсказуемы.

На этом основании в монографии [10] сделаны следующие выводы:

- риск или дозы для индивидуумов в далеком будущем не могут быть предсказаны со сколько-нибудь разумной точностью, поскольку они зависят не только от предположений относительно целостности матрицы, содержащей РАО, целостности искусственных барьеров безопасности, геологии, распределения грунтовых вод и т. д., но и от будущих условий существования биосферы и (в наибольшей степени) от образа жизни человечества;
- непредсказуемость изменений человеческой деятельности в значительной мере обусловлена самой природой человека, и нет оснований полагать, что возможно когда-либо разработать совершенные модели для прогноза его поведения в отдаленном будущем.

### **2.2.2. Климат и ландшафт**

При заданном осредненном образе жизни популяции человека интенсивность и характер облучения в основном будут определяться значениями концентраций радионуклидов в биосфере (окружающей среде), а те, в свою очередь, - значениями потоков радионуклидов через биосферу (см. пункт 5 схемы).

Но потоки радионуклидов крайне чувствительны даже к относительно локальным изменениям климата и ландшафта - при одинаковых потоках радионуклидов из геосферы в биосферу их потоки через биосферу могут меняться в десятки и сотни (!) раз при смене влажного климата засушливым за счет связанных с этой сменой изменений характеристик грунтовых вод и сети поверхностных водоемов.

В течение 10 000 лет нынешнего послеледникового периода изменение климата происходило не монотонно. Считают, что за это время имели место минимум два глобальных потепления. Что касается настоящего времени, то, по данным научных прогнозов, влияние парникового эффекта может существенно изменить уровень Мирового океана и очертания береговой линии уже через несколько сотен лет. Тем не менее большинство ученых сходится на том, что упрощающее предположение о стабильности климата на Земле в период до 10 000 лет может быть принято при проведении качественных оценок [7].

### **2.2.3. Геосфера**

При глобальных и существенных изменениях климата, вполне вероятных в отдаленном будущем (через десятки и сотни тысяч лет), начнут существенно изменяться характеристики основных областей питания и разгрузки подземных вод для геологических формаций средних глубин заложения. Соответственно изменятся и условия, влияющие на формирование потоков радионуклидов из геосферы в биосферу, даже при том, что есть основания считать состояние геосферы в этот период достаточно стабильным и сходным с существующим ныне. Подчеркнем, что изменение характера движения подземных вод уже не позволяет считать достаточно достоверными результаты оценок абсолютных значений потоков радионуклидов из геосферы в биосферу. Возможна более или менее корректная оценка всего лишь отношений значений этих потоков к значениям аналогичных потоков в биосферу радионуклидов естественного происхождения. При принятии ряда дополнительных допущений для периода времени до 1 миллиона лет еще возможны весьма условные осторожные оценки не абсолютных, а относительных значений (по отношению к соответствующим естественным, фоновым значениям) и других физических величин - потоков радионуклидов через биосферу, концентраций радионуклидов в биосфере, в биоте, и наконец, доз облучения гипотетических популяций человека (см. пункты 3 и 4 схемы).

Но, наконец, само состояние геосферы, под влиянием неотектонических процессов, движения литосферных плит, интенсивного выветривания с последующей денудацией (в основном эрозией),

связанных отчасти и с глобальными механическими воздействиями чередующихся ледниковых и межледниковых периодов в течение времени порядка 1 миллиона лет, за пределами этого периода должно измениться непредсказуемо с позиций сегодняшних дней.

Поэтому, по мнению экспертов МАГАТЭ [7], за пределами 1 миллиона лет не может быть никакого доверия к любым, выполненным с использованием сколь угодно сложных математических моделей количественным оценкам как абсолютных, так и относительных (по отношению к соответствующим естественным, фоновым значениям) не только доз (рисков) облучения, но и промежуточных физических величин - концентраций радионуклидов в биоте, в биосфере, потоков радионуклидов через биосферу, потоков их из геосферы в биосферу и т. д.

Поскольку обоснование безопасности хранилища должно предусматривать рассмотрение его радиационного воздействия на человека и окружающую среду в отдаленном будущем, то для проведения такой оценки могут быть использованы только математические модели, описывающие перенос радионуклидов из хранилища через инженерные барьеры и геосферу в биосферу и в окружающую среду ("ближнюю среду обитания") человека в соответствии со схемой.

Эти модели могут быть усовершенствованы так, чтобы обеспечить максимально корректный учет всех особенностей описываемых ими физико-химических процессов.

Значения большинства входящих в указанные модели параметров, относящиеся к настоящему времени или ближайшему будущему, как правило, также могут быть определены с достаточной точностью (например, за счет подробных экспериментальных исследований состояния вмещающих (несущих) грунтов (пород)).

Однако когда речь идет о прогнозе облучения населения в периоды времени в будущем, отдаленные от сегодняшних дней тысячами и десятками тысяч лет, погрешность оценки дозы или риска, связанная с неточностью прогноза будущих условий проведения этой оценки, становится определяющей, и, что важно, - принципиально не устранимой компонентой полной погрешности расчета.

Указанная погрешность характеризуется распределением плотности вероятности значений дозы около ее математического ожидания (среднего значения), отражающим как методическую составляющую погрешности оценки этого значения, так и принципиально не устранимую компоненту погрешности, связанную с неопределенностью значений исходных данных. Если даже незначительная часть распределения "перекрывает" порог возникновения детерминированных эффектов облучения (см. раздел 2.1.2), то дозовый критерий формально не может быть применен, в то время как критерий риска может быть еще успешно использован.

С учетом отмеченного выше возрастания погрешности со временем можно утверждать, что критерий риска во всех случаях при прочих равных условиях "работает" на существенно более длительных промежутках времени, чем любой дозовый критерий (в том числе использующий "взвешенную" дозу).

Важность этого утверждения трудно переоценить с учетом необходимости использования системы критериев долговременной безопасности хранилища, которая может быть корректно использована именно на как можно более длительных промежутках времени после закрытия хранилища. Более того, сделанное утверждение справедливо не только для вероятностных сценариев облучения населения, но и для нормального (детерминированного) облучения. Поэтому отмеченное выше безусловно должно быть учтено в явном виде в структуре предлагаемой системы критериев безопасности хранилища.

#### **2.2.4. Желательные качества критериев долговременной безопасности хранилищ. Рекомендации международных организаций**

Общие критерии радиационной безопасности должны являться фундаментальной основой и для оценки приемлемости захоронения РАО в хранилище. Однако сохранение долгоживущими радионуклидами своей потенциальной опасности для человека на протяжении миллионов лет предъявляет специфические требования как к структуре, так и к содержанию возможной системы критериев долговременной безопасности хранилищ. Это было отмечено в ряде основных рекомендаций международных организаций.

В [11] и [12] признано, что при создании нормативного базиса для регулирования безопасности захоронения РАО необходимо введение новых критериев радиационной безопасности, в той или иной мере основанных на ограничении радиационного риска, дополнительно к дозовому критерию или вместо него.

В [13] было рекомендовано ограничить максимальный индивидуальный риск от всех источников излучения значением, равным  $10^{-5}$   $1/\text{год}$ , а наилучшими критериями для оценки долговременной безопасности хранилищ предложено считать индивидуальный риск и дозу. АЯЭ ОЭСР не выработал определенной единой позиции по использованию принципа ALARA для оптимизации хранилищ.

Международными организациями отмечено, что наиболее приемлемым для регулирования безопасности хранилищ критерием безопасности является критерий, ограничивающий в явном виде только индивидуальный радиационный риск.

Однако применение "чистого" критерия риска может быть сопряжено с определенными социальными (в основном психологическими) издержками, связанными с неприятием термина "риск" непрофессионалами.

Для решения этой проблемы в 1985 г. в Публикации 46 МКРЗ [14] предложено принятие в качестве

критерия радиационной безопасности хранилищ "гибридного" критерия дозы и риска и рекомендовано при регулировании безопасности для хранилищ твердых РАО одновременно ограничивать индивидуальные дозу и риск:

а) для наиболее вероятных сценариев эволюции системы захоронения твердых РАО (в которых к выходу радионуклидов из хранилища приводят нормальные процессы) не должно быть превышено значение индивидуальной годовой дозы  $1 \text{ мЗв/год}$  для любого лица из населения;

б) для маловероятных ("разрушительных") сценариев выхода радионуклидов из хранилища не должно быть превышено значение предела индивидуального риска, равного  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$  для любого лица из населения.

МКРЗ обосновывает целесообразность введения отдельных (независимых) ограничений для "нормальных" и маловероятных сценариев тем, что "проектные решения и регламент эксплуатации, направленные на ограничения двух различных видов риска могут быть весьма различны, и не очевидно, что общество захочет принять уменьшение уровня обыденного (повседневного) риска в качестве компенсации за увеличение вероятности маловероятных событий, но с серьезными последствиями".

В Публикации 46 МКРЗ [14] отмечено также, что как дозы, так и риск должны быть снижены в соответствии с принципом АЛАРА.

МАГАТЭ в своих рекомендациях [15] следует именно подходу МКРЗ [14], заключающемуся в раздельном ограничении дозы и риска.

Указанные рекомендации Публикации 46 МКРЗ [14] и МАГАТЭ [15] уже реализованы (с измененными в свете новых данных Публикации 60 МКРЗ численными значениями критериев) в соответствующих регламентирующих документах ряда стран, причем именно и исключительно в связи с необходимостью проведения оценки безопасности хранилища в периоды времени, удаленные в будущее [16].

### **2.2.5. Зарубежный опыт решения проблем регулирования долговременной безопасности хранилищ**

Сегодня в различных странах мира эксплуатируются приповерхностные хранилища низкой (НАО) и средней (САО) активности. Высокоактивные отходы (ВАО), а также ОЯТ, содержащие в значительных количествах долгоживущие альфа-активные радионуклиды в соответствии с современными воззрениями в наземных и приповерхностных инженерных сооружениях, подлежат только длительному хранению, но не захоронению. Только захоронение в стабильные геологические формации считается достаточно безопасным для этих РАО, но такие хранилища пока находятся в стадии проектирования или сооружения. Единственным примером окончательного захоронения РАО в стабильные геологические формации - применявшаяся только в бывшем СССР (для НАО, САО и частично ВАО) и применяющаяся в Российской Федерации (только для НАО и САО) технология закачки жидких РАО в глубоководные изолированные от биосферы подземные пористые пласты - коллекторы.

Нормативные базы большинства развитых стран уже полностью подготовлены к решению задач регулирования долговременной безопасности хранилищ. Критерии радиационной безопасности хранилищ долгоживущих высокоактивных РАО, принятые в этих странах, представлены ниже на основании данных Секретариата АЯЭ (Агентства по ядерной энергии) ОЭСР, обобщивших итоги Парижского Совещания стран ОЭСР в 1990 г. [17], с учетом изменений, произошедших в последнее время в ряде этих стран, связанных с выпуском Публикации 60 МКРЗ, уточнившей отдельные фундаментальные радиологические константы и основные положения и рекомендации по радиологической защите.

**Канада.** Регулирующий документ R104 [18] 1987 г. Максимальный индивидуальный риск за счет хранилища принят равным  $10^{-6} \text{ 1/год}$ . Период времени для "демонстрации" безопасности определен  $10^4$  лет с дополнительным требованием - не должно быть никакого внезапного возрастания скорости выхода радионуклидов в период времени, превышающий  $10^4$  лет. Не установлено четких требований к оптимизации.

**Франция.** "Гибридный" критерий, предложенный в [14]. Принят в качестве национальных нормативов в 1991 г., после Парижского Совещания 1990 г.

**Германия.** § 45, Часть 3, глава 2 действующей с 01.11.89 редакции Постановления о радиационной защите от 30.06.1989. Индивидуальная доза облучения населения ограничена значением  $0,3 \text{ мЗв/год}$  для всех разумных сценариев. Вычисления индивидуальных доз ограничены периодом времени до  $10^4$  лет, но изолирующая способность хранилища должна быть оценена и за пределами  $10^4$  лет.

**Северные страны.** Консультативный документ (1989) [19]. Индивидуальная доза - менее  $0,1 \text{ мЗв/год}$  (для нормальных сценариев). Индивидуальный риск - менее  $10^{-6}/\text{год}$  (для разрушительных событий). Принят дополнительный критерий, ограничивающий поток активности в биосферу долями от естественных потоков природных радионуклидов. В дальнейшем (1993 г.) подтверждено в межгосударственном нормативном документе скандинавских стран [16].

**Испания.** Постановление Совета по ядерной безопасности (1987). Индивидуальная доза - менее  $0,1 \text{ мЗв/год}$ . Индивидуальный риск - менее  $10^{-6}$  в год в любой ситуации.

**Швейцария.** Регулирующий документ R-21 (1980). Индивидуальная доза - менее  $0,1 \text{ мЗв/год}$  в любое время (для разумно вероятных сценариев). Хранилище должно быть спроектировано так, чтобы оно могло в любое время быть закрыто и после этого не требуется проведение ведомственного контроля. Регулирующий документ 1993 г. [20] (после выхода Публикации 60 МКРЗ) подтвердил ранее принятые

критерии.

**Англия.** Специальные критерии безопасности захоронения ВАО не установлены, но возможно применение принципов, подобных принятым для НАО (САО), а именно уровень индивидуального риска одного хранилища менее  $10^{-6}$ /год. Временные рамки для количественных оценок не установлены<sup>9</sup>, после 1 миллиона лет расчеты риска можно не проводить. Должен быть использован принцип ALARA [21]. После выхода Публикации 60 МКРЗ обновленная версия регулирующего документа [22] подтвердила ранее установленные критерии.

**США.** Агентство по охране окружающей среды (40 CFR Part 191, 1985 [23]). Индивидуальная доза лиц из населения оценивается в период до 1000 лет после закрытия хранилища и должна быть менее 0,25 мЗв/год. Установлен предел вероятности выхода радионуклидов из хранилища в окружающую среду ( $10^{-4}$ ) в год с целью ограничения серьезного влияния на здоровье в первые  $10^4$  лет после удаления каждой 1000 т ОЯТ или ВАО (в течение указанного времени и от указанного количества захороненных РАО - не более 10 случаев серьезного ущерба для здоровья отдельных лиц из населения). Установлен ряд дополнительных требований к уровням загрязнения питьевой воды.<sup>10</sup>

**США.** Комиссия по ядерному регулированию (10 CFR Part 60 [24]). Упаковка РАО должна обеспечивать полное удержание радиоактивности в первые 300-1000 лет. Допустимая вероятность разрушения системы инженерных барьеров должна быть менее  $10^{-5}$  1/(упаковка-год) в течение первых 1000 лет после закрытия хранилища.

**США.** Комиссия по ядерному регулированию (10 CFR Part 61 "Лицензионные требования для хранилищ радиоактивных отходов на поверхности земли (Land Disposal)"). После захоронения РАО низкого уровня активности должна быть обеспечена разумная уверенность в том, что население не будет получать индивидуальных годовых доз облучения от хранилища, превышающих 0,25 мЗв/год на все тело, 0,75 мЗв/год - на щитовидную железу и 0,25 мЗв/год - на любой другой орган.

В целом анализ состояния нормативного регулирования долговременной безопасности хранилищ в развитых западноевропейских странах позволяет, по мнению авторов, сделать следующие выводы, подтверждающие справедливость изложенного в разделе 2 (эквивалентность критериев "риск" и "доза" в диапазоне значений доз, не выходящих за пределы индуцирования только стохастических эффектов облучения, формальная неприемлемость дозового критерия для оценки безопасности хранилищ в удаленных периодах времени в будущем).

1. В странах, где в качестве основного критерия радиационной безопасности принят "чистый" критерий риска (Канада, Великобритания), нет необходимости вводить специальные критерии долговременной безопасности хранилищ - достаточно только определить конкретное значение квоты хранилища в общем допустимом уровне облучения населения страны от всех источников.

2. Принятие в упомянутых нормативных документах ряда стран "гибридного" критерия радиационной безопасности для регулирования долговременной безопасности хранилищ не изменяет уровень обеспечения радиационной безопасности населения. Это политическое решение, которое является более "социально" приемлемым, чем принятие критерия риска, несмотря на то, что принятие "гибридного" критерия в определенной мере менее выгодно экономически, так как ограничивает возможности оптимизации проектов хранилищ, предоставляемые за счет использования "чистого" критерия риска.

3. Несмотря на то, что, как было показано выше, область применимости дозового критерия ограничена во времени в значительно большей степени, чем область применимости критерия риска, ряд стран (Германия, Швейцария, США) предпочитают использовать преимущественно именно дозовый критерий для регулирования безопасности хранилищ (очевидно из-за того, что большинство населения неадекватно воспринимает выражение опасности радиационных воздействий в терминах риска). В принятые в указанных странах критерии долговременной безопасности хранилищ дополнительно к критерию "дозы" включены наборы предельных значений вероятностей, ограничивающих вероятности реализации различных разрушительных событий, относящихся к безопасности хранилища (минимальное время полного удержания радионуклидов в упаковках РАО, вероятность разрушения системы защитных барьеров, ограничение случаев серьезного ущерба для здоровья лиц из населения и т. д.). Таким образом, через наборы дискретных значений этих вероятностей в указанных странах неявно введен дополнительно к дозовому критерию и критерий риска, т. е. по существу в этих странах тоже принят "гибридный" критерий долговременной безопасности хранилищ. Отметим также, что из формулировок типа "...должна быть обеспечена разумная уверенность в том, что население не будет получать... ..чрезмерных доз облучения.." следует, что даже для относительно близкого периода времени в будущем (1000 лет) принятый дозовый критерий скорее всего является на самом деле критерием риска, выраженным в терминах дозы, и уж во всяком случае в качестве значения показателя безопасности в этом критерии должно быть использовано только значение "взвешенной" дозы.

<sup>9</sup> На самом деле неявно установлена верхняя граница временного диапазона для проведения анализа безопасности - 100 млн. лет.

<sup>10</sup> Установлено ограничение возможных концентраций радионуклидов в наиболее значимых в аспекте радиационной безопасности природных средах.

### 3. ПРЕДЛОЖЕНИЯ АВТОРОВ О КРИТЕРИЯХ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНИЛИЩ РАО (ОЯТ) В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

#### 3.1. Принципы, принятые при разработке предложений и следующая из них структура предлагаемого критерия

Авторы статьи рекомендуют для принятия в Российской Федерации специально разработанную систему критериев долговременной безопасности хранилищ, как это сделано в большинстве развитых западноевропейских стран, а не пытаться обеспечить регулирование безопасности хранилищ, ограничиваясь только основными критериями радиационной безопасности, установленными НРБ -96.

Такой подход обеспечит достаточную эффективность регулирования безопасности хранилищ и гармонизацию отечественной нормативной базы с международными правовыми документами.

В практике обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации уже используются в дополнение к дозовому критерию безопасности дополнительные ограничения вероятности реализации разрушительных сценариев для потенциально радиационно опасных объектов. Такие ограничения установлены, например, в качественной форме в нормативных документах [25,26,27]. Документ [27] содержит свод общих положений по учету внешних воздействий природного и техногенного происхождения при размещении, проектировании, эксплуатации и выводе из эксплуатации ОИАЭ, соблюдение которых позволит обеспечивать безопасность ОИАЭ при природных и техногенных катастрофах. Требования документа нацелены на исключение недопустимого риска ядерной и (или) радиационной аварии и распространяются, в частности, на захоронение РАО.

Следовательно, система действующих в Российской Федерации нормативных документов, распространяющихся и на регулирование безопасности хранилищ, предусматривает (наряду с ограничением дозы облучения в "нормальных" сценариях) ограничение риска маловероятных аварий в хранилищах, поэтому отечественной практике регулирования безопасности наиболее полно будет соответствовать принятие именно "гибридного" критерия долговременной безопасности хранилищ.

Таким образом, с учетом результатов анализа международных рекомендаций, примера ряда развитых стран и отечественной практики авторы статьи считают целесообразным рекомендовать использование в качестве критерия безопасности хранилищ в Российской Федерации именно "гибридного" критерия.

Дополнительно авторы считают необходимым учитывать, что введение новых нормативных требований всегда должно основываться на принципе "неснижения уровня требований по сравнению с уже существующей практикой". Далее сформулированы предложения авторов о детализации структуры (расширении) "гибридного" критерия, позволяющие, по их мнению, соблюсти указанный принцип для специфических условий, которые установлены НРБ-96. Рассмотрим это более подробно.

В своей "обычной" форме (состоящей из двух неравенств) "гибридный" критерий безопасности хранилища устанавливает совместное с ограничением индивидуальной дозы ограничение уровня потенциального радиационного риска населения, связанного с облучением соответствующей критической группы лиц из населения в случае реализации возможных разрушительных событий  $r_F$ .

Но значения доз этого потенциального облучения могут быть, в зависимости от условий реализации таких событий, как ниже, так и выше значения порога возникновения детерминированных эффектов облучения. Эти значения могут не превосходить и значения Т-кратного (см. раздел 2.1.2) установленного дозового предела  $E_0$ , что в полном соответствии с НРБ-96 является безопасным даже согласно установленному критерию безопасности нормального облучения, но такие незначительные потенциальные облучения должны быть учтены особо, поскольку риск, связанный с указанными двумя видами облучения, нормируется отдельно (в частности, при использовании "чистого" критерия риска их следует суммировать).

В п.4.10 НРБ-96 из консервативных соображений установлено выражение для определения (и соответственно отдельного ограничения уровня) радиационного риска, связанного с возможными разрушительными событиями ( $r_F, > 0,5 z_B$ ), приводящими к облучению лиц из населения дозами  $E_{>0,5 z_B}$ , превышающими значение порога возникновения детерминированных эффектов облучения.

Согласно консервативному подходу НРБ-96, радиационный риск определен как сумма (по  $j = 1, 2, \dots$ ) вероятностей таких событий:

$$r_{F, > 0,5 z_B} = \sum_j p(E > 0,5 z_B, j) . \quad (12)$$

Соответственно риск, обусловленный всеми (сумма по  $i = 1, 2, \dots$ ) разрушительными событиями, приводящими к облучению лиц из населения дозами  $E_{<0,5 z_B}$ , не превышающими значение порога возникновения детерминированных эффектов облучения, согласно п.4.9 НРБ-96, должен быть определен по выражению:

$$r_{F, < 0,5 z_B} = \sum_i p(E < 0,5 z_B, i) E_{<0,5 z_B, i} . \quad (13)$$

Безусловно, не составляет проблем учесть вышеупомянутую специфику НРБ-96 в рамках "традиционной" формулировки "гибридного" критерия, определив значение полного потенциального радиационного риска, связанного с маловероятными разрушительными событиями, следующим образом:

$$\Gamma = \Gamma_{F, < 0,5 Z_{в}} + \Gamma_{F, > 0,5 Z_{в}} = \sum_i p(E < 0,5 Z_{в}, i) \Gamma E < 0,5 Z_{в}, i + \sum_j p(E > 0,5 Z_{в}, j) \Gamma E > 0,5 Z_{в}, j \quad (14)$$

С целью исключения сложности, связанной с возможной не вполне корректной интерпретацией положения п.4.10 НРБ-96 при применении “гибридного” критерия в его “традиционной” формулировке (возможно неверное толкование этого положения, как распространяющегося на все потенциальные облучения или на потенциальные облучения со значением дозы, превышающим значение Т-кратного (см. раздел 2.1.2) установленного дозового предела  $E_0$  и т. д.) авторы предлагают несколько детализировать структуру “гибридного” критерия, включив в него отдельное ограничение суммы вероятностей возможных разрушительных событий, могущих привести к потенциальному облучению лиц из населения дозами  $E_{>0,5 Z_{в}}$ , превышающими значение порога возникновения детерминированных эффектов облучения. В указанную сумму предлагается включить также значение вероятности того, что оцененное значение дозы нормального облучения населения превысит этот порог, что в принципе возможно при очень большой величине погрешности оценки значения дозы в сценарии нормальной эволюции хранилища, как показано в разделах 2.1.2 и 2.2.3.

Уместно отметить следующее обстоятельство. Для крайне маловероятных катастрофических событий с тяжелыми последствиями (например, землетрясений в несейсмичном районе) и соответственно маловероятных сценариев потенциального облучения населения от хранилища получить достаточно точные оценки очень малых ( $10^{-6}$  и менее) значений вероятности их реализации практически невозможно. Поэтому принимаемые на самом деле значения этих запредельных вероятностей в лучшем случае отражают уровень неопределенности того, что указанные вероятности равны нулю.

Иной подход используется при оценке значений вероятности реализации множества других потенциально возможных событий, для которых эта вероятность может быть достаточно велика (хотя и существенно меньше единицы), а тяжесть негативных радиационных последствий относительно незначительна. К подобным событиям могут быть отнесены, например, ошибка в определении изолирующих свойств какого-либо элемента вмещающих (несущих) хранилища грунтов (горных пород), или неумышленное вторжение человека в занимающую (в отдаленном будущем) обширную площадь область горной породы - “дальней зоны” хранилища, радиоактивно загрязненной радионуклидами из хранилища незначительных концентраций. В таких случаях для оценки требуемых значений вероятностей используются соответствующие достаточно сложные и хорошо обоснованные методы математической статистики, а значение погрешности этих оценок, как минимум, сравнимо с собственно оцененным значением.

Представляется очевидной целесообразность разделения этих существенно различных анализируемых характеристик безопасности на группы в соответствии с предложенной детализацией структуры “гибридного” критерия, что позволит упростить обоснование (оценку) безопасности хранилища, повысить их качество, избежать случайных ошибок.

Принятие предложений о структуре критерия долговременной безопасности хранилищ, вытекающих из вышеперечисленных принципов, по мнению авторов, должно обеспечить:

- полную непротиворечивость этого критерия НРБ;
- совместимость его с действующей отечественной нормативной базой;
- его согласие с рекомендациями международных организаций;
- его согласие с системой критериев, принятой в других странах;
- принятие его широкой общественностью;
- неснижение уровня требований по сравнению с существующей отечественной практикой;
- применимость критерия в том же (максимально длительном) временном диапазоне, что и применимость “чистого” критерия риска.

### 3.2. Предложения о количественных значениях параметров, определяющих явный вид предлагаемого критерия долговременной безопасности хранилищ

В случае принятия предложений о структуре критерия долговременной безопасности хранилищ, рекомендуемого к использованию в Российской Федерации при регулировании долговременной безопасности хранилищ, установление требуемых количественных значений параметров, относящихся к явному виду расширенного “гибридного” критерия “доза-риск”, сводится:

- к определению таковых как для предельно допустимой годовой индивидуальной эффективной дозы, обусловленной реализацией основного сценария нормального облучения населения за счет хранилища, так и для предельного годового индивидуального риска  $R_p$ , обусловленного всеми маловероятными “разрушительными” сценариями;
- к “распределению” значения  $R_p$  между двумя существенно различными компонентами этого риска в соответствии с предложенным в разделе 3.1.

При решении этой задачи авторы статьи предлагают не вводить никаких “допустимых пределов доз (риска) потенциального облучения”, дополнительных к установленному НРБ-96 пределу дозы нормального облучения населения, как предлагается в рекомендациях всех международных организаций и уже сделано во всех развитых странах, а включить значение допустимого риска потенциального облучения в квоту, выделенную для хранилища в рамках указанного предела дозы. Основанием для такого предложения является следующее обстоятельство. При установлении конкретных значений предельного годового индивидуального риска, связанного с потенциальным облучением  $R_p$ , обусловленного маловероятными сценариями облучения отдельных лиц из населения, следует

учитывать, что любой индивидуум из населения, проживающего в зоне влияния хранилища, будет одновременно подвергаться как риску  $R_n$ , так и радиационному риску, связанному с “нормальным” сценарием облучения. Поэтому значение предельно допустимого полного индивидуального риска от хранилища должно ограничивать сумму значений вышеуказанных рисков.

При установленном НРБ-96 предельно допустимом значении годовой индивидуальной эффективной дозы облучения от всех техногенных источников нормального облучения населения (1 мЗв/год) остается определить значение квоты  $\eta(0 < \eta < 1)$ , выделенной для единичного хранилища как источника облучения. Для захоронения долгоживущих РАО в глубокие геологические формации это значение с очевидностью должно быть установлено единожды и на федеральном уровне, быть одинаковым для всех возможных проектов хранилищ, а не определяться местной администрацией индивидуально в каждом конкретном случае. Указанное положение, по мнению авторов, вытекает из принципа “безопасность без опоры на контроль”. В большинстве стран, сформировавших собственную нормативную базу регулирования безопасности захоронения РАО, сделано именно так.

С учетом принятого в отечественных нормативных документах значения квоты на одну АЭС, равного 25%, представляется целесообразным для условий нашей страны принять для одного хранилища то же значение ( $\eta = 0,25$ , что соответствует значению предельно допустимой дозы 0,25 мЗв/год), имея в виду, что в него, как предложено в разделе 3.2, будет включено не только нормальное, но и потенциальное облучение населения.

Для сравнения приведем установленные значения предельно допустимой годовой индивидуальной эффективной дозы за счет хранилища для лиц из населения в тех странах, где для регулирования безопасности хранилищ формально используется только дозовый критерий. В США это значение принято равным 0,25 мЗв/год, в Германии - 0,3 мЗв/год.

В случае принятия предложенного значения предельно допустимого полного радиационного воздействия на население единичного хранилища, эквивалентного годовой дозе облучения 0,25 мЗв/год, необходимо определить, как это полное радиационное воздействие должно быть распределено между воздействием хранилища при нормальном сценарии его эволюции (реализующимся с вероятностью, близкой к единице) и воздействиями, обусловленными маловероятными сценариями потенциального облучения отдельных лиц из населения как без серьезного ущерба для здоровья, так и с таковым в соответствии с предложенным в разделе 3.

С учетом изложенного выше предлагаемая авторами статьи формулировка “гибридного” критерия дозы и риска принимает следующий вид (табл. 2) :

а) для наиболее вероятных сценариев эволюции хранилища (при которых к выходу радионуклидов из хранилища приводят нормальные, постепенные процессы) не должно быть превышено значение индивидуальной годовой дозы 0,1 мЗв/год для любого лица из населения;

б) для маловероятных (“разрушительных”) сценариев выхода радионуклидов из хранилища, не приводящих к переоблучению индивидуума сверх порога возникновения детерминированных эффектов, не должен быть превышен предел индивидуального риска, эквивалентный значению индивидуальной годовой дозы 0,1 мЗв/год (т. е. равный  $5,0 \cdot 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>) для любого лица из населения;

с) вероятность для индивидуума быть переоблученным в результате маловероятных “разрушительных” событий, произошедших в хранилище, дозой, превышающей порог возникновения детерминированных эффектов, должна быть ограничена значением  $2,5 \cdot 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>.

Возможен несколько отличающийся вариант задания входящих в критерий предельно допустимых значений дозы (риска). Если принять в качестве значения предельно допустимого полного радиационного воздействия на население единичного хранилища значение, эквивалентное годовой дозе облучения 0,2 мЗв/год (квота  $\eta = 0,2$ ), то в части с) предлагаемого критерия следует принять в качестве значения предельно допустимого риска, связанного с возможным переоблучением лиц из населения выше порога возникновения детерминированных эффектов облучения, величину  $1,0 \cdot 10^{-7}$  год<sup>-1</sup>, а не  $2,5 \cdot 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>, т. е. ограничить указанный риск одной десятой долей значения пренебрежимого индивидуального риска. Тогда нет необходимости включения значения этого риска в установленную квоту от дозового предела. Предложенный критерий в этом случае будет идентичен аналогичным системам критериев, принятым в большинстве стран мира.

Таблица 2

## Рекомендации по обоснованию (оценке) безопасности хранилищ для различных диапазонов времени прогноза

Диапазон времени прогноза, лет	Настоящее время - 300(500)	300(500) - 1000	1000 - 10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>6</sup>	>10 <sup>6</sup>
Уровень обоснования безопасности	Анализ и оценка безопасности			Обоснование относительной безопасности	
Цель обоснования безопасности	Доказательство безопасности			Качественное обоснование малой вероятности снижения уровня безопасности	
Допущения, принимаемые при обосновании безопасности	Информация о хранилище известна, сценарий неумышленного вмешательства (интрузии) исключен	Информация о хранилище может быть утрачена, не исключено неумышленное вмешательство (интрузия)	Реальные условия существования в будущем популяции человека в районе хранилища РАО могут непредсказуемо отличаться от сегодняшних	Возможен прогноз эволюции вмещающих пород	Отсутствие возможности прогнозирования эволюции биосферы и геосферы
Требования к исходным данным	Детальное описание и прогноз развития реально существующей популяции человека	Обоснованный прогноз развития реально существующей популяции человека	Использование регламентированного набора сценариев развития биосферы и гипотетических критических групп популяции человека	Обоснование стабильности вмещающих пород	Обоснование сорбционных свойств минералов вмещающих пород
Требуемый результат	Индивидуальная доза ("взвешенное" значение) Для реальной популяции человека с учетом прогноза ее развития	Индивидуальный риск, выраженный в терминах дозы  Для реальной популяции человека с учетом прогноза ее развития	Индивидуальный риск, выраженный в терминах дозы  Для гипотетической популяции человека и моделей развития биосферы ("ссылочных" биосфер)	Оценки отношений вида А/В, где А - значения концентраций радионуклидов хранилища в биосфере, потоков радионуклидов хранилища через биосферу, потоков радионуклидов хранилища из геосферы в биосферу, концентраций радионуклидов хранилища во вмещающей породе, В – значения соответствующих величин, создаваемых радионуклидами естественного происхождения	

## Выводы

1. Проиллюстрирована основная специфика обоснования и оценки безопасности хранилищ, заключающаяся в необходимости корректного учета потенциального облучения населения, связанного как с возможностью реализации в отдаленном будущем маловероятных внешних воздействий природного и (или) техногенного происхождения в зоне потенциального влияния хранилища, так и с возрастающей со временем принципиально не устранимой компонентой погрешности оценки значений показателей радиационной безопасности хранилища.

2. На основании формализованного сопоставления возможных форм основных критериев радиационной безопасности (риска и дозы) и по результатам анализа рекомендаций международных организаций по проблеме разработки специальной гибкой и эффективной системы критериев долговременной безопасности хранилищ для периода времени после их закрытия показано, что указанная система критериев во всех случаях должна включать в себя критерий, сформулированный (явным или неявным образом) в терминах риска.

3. На основании выполненного анализа и с учетом действующей в Российской Федерации нормативной базы регулирования радиационной безопасности сформулированы предложения:

- об оптимальной для условий Российской Федерации структуре системы критериев долговременной радиационной безопасности хранилищ для периода времени после их закрытия;
- о рекомендованных предельно допустимых значениях входящих в эту систему основных показателей безопасности, позволяющих полностью гармонизировать предложенную систему критериев с аналогичными системами критериев, принятыми в большинстве развитых стран.

4. Требуется отдельного рассмотрения проблема оценки долговременной безопасности хранилища для таких беспрецедентно длительных значений времени после его закрытия (миллион лет и более), для которых оценка абсолютных значений показателей радиационного воздействия (риск и дозы) хранилища на человека вообще не может быть выполнена со сколько-нибудь приемлемой точностью из-за практически полной неопределенности значений почти всех исходных параметров, необходимых для проведения этой оценки.

## Литература

1. Закон РСФСР "Об охране окружающей природной среды".
2. Федеральный закон "Об использовании атомной энергии".
3. Федеральный закон "О радиационной безопасности населения".
4. Принципы обращения с радиоактивными отходами. Серия изданий по безопасности №1111-F. МАГАТЭ, Вена (1996 г.).
5. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. МАГАТЭ, GOV/INF/821-GC(41)/12, 24 сентября 1997 г.
6. OECD/NEA The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-lived Radioactive Wastes, 1995.
7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Indicators in Different time frames for the safety assessment of underground radioactive waste repositories. IAEA-TECDOC-767 (First report of the INWAC Subgroup on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal), ISSN 1011-4289 October 1994, IAEA, Vienna (1994).
8. Нормы радиационной безопасности (НРБ-96). Гигиенические нормативы ГН 2.6.1.054 - 96. Госкомсанэпиднадзор России. М., 1996.
9. Е.Е. Ковалев. Радиационный риск на Земле и в Космосе, 1976, М., Атомэнергоиздат.
10. The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste. Edited by D. Savage, John Wiley & Sons, Inc., 605 Third Avenue, New York, NY 10158-0012, USA (1995).
11. World Health Organisation Regional Office for Europe. Management of High-Level Radioactive Waste. WHO Regional European Series N 13, World Health Organisation, Copenhagen, Denmark (1982).
12. Criteria for Underground Disposal of Radioactive Wastes. IAEA Safety Series Report N 60, International Atomic Energy Agency, IAEA, Vienna, Austria (1983).
13. Long Term Radiation Protection Objectives for Radioactive Waste Disposal. OECD / NEA, Paris (1984).
14. Radiation Protection. Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste. ICRP Publ. N 46, Ann. ICRP 15(4). ICRP (1985).
15. Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes. IAEA Safety Series Report N 99, International Atomic Energy Agency, IAEA, Vienna, Austria (1989).
16. THE RADIATION PROTECTION AND NUCLEAR SAFETY AUTHORITIES IN DENMARK, FINLAND, ICELAND, NORWAY AND SWEDEN, Disposal of High Level Radioactive Waste, Consideration of some Basic Criteria (1993).
17. NEA/IAEA/CEC, Radiation Protection and safety Criteria, Disposal of High Level Radioactive Waste. Note distributed with Proceedings of an NEA workshop, November 1990. OECD/ NEA, Paris (1991).
18. Regulatory Objectives, Requirements and Guidelines for the Disposal of Radioactive Wastes, Long-

Term Aspects, Atomic Energy Control Board (AECB), Canada (1987).

19. THE RADIATION PROTECTION AND NUCLEAR SAFETY AUTHORITIES IN DENMARK, FINLAND, ICELAND, NORWAY AND SWEDEN, Disposal of High Level Radioactive Waste, Consideration of Some Basic Criteria, a Consultative Document (1989).

20. Protection Objectives for the Disposal of Radioactive waste. Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (HSK) and Federal Commission for the Safety of Nuclear Installations (KSA), Villingen, Switzerland (1993).

21. Radiological Protection Objectives for solid Radioactive waste Disposal. Document of the NRPB, vol. 3, N 3, HMSO, UK (1992).

22. Statement on Radiological Protection Objectives for the land-based Disposal of Solid Radioactive wastes. Documents of the NRPB, vol. 3, N 3, National Radiological Protection Board, Chilton, UK (1992).

23. US Environmental Protection Agency, Part 11, 40 CFR Part 191, Environmental Standards for the Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High Level and Transuranic Radioactive Wastes; Final Rule, Washington (1985).

24. US Nuclear Regulation Commission, Title 10, Part 60 - Disposal of High Level Radioactive Wastes in Geological Formations, Washington (1984).

25. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ - 88/97. НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97).

26. Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. ПНАЭ Г-03-33-93.

27. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно- и радиационно опасные объекты. ПНАЭ Г-05-035-94.