



УДК: 621.039

DOI: 10.26277/SECNRS.2023.108.2.003

© 2023. Все права защищены.

ГЛУБИННОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В КОНТЕКСТЕ РАДИОЭКВИВАЛЕНТНОГО ПОДХОДА

Линге И. И.*, д-р техн. наук (linge@ibrae.ac.ru),

Уткин С. С.*, д-р техн. наук (uss@ibrae.ac.ru)

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2023 г.

Аннотация

Рассмотрены основные недостатки так называемого радиоэквивалентного подхода к захоронению радиоактивных отходов. На конкретных примерах выполнен анализ отказа от международно признанных методов и принципов обеспечения радиационной безопасности в пользу замены общепринятых операционных величин нефизичными функционалами от активности радиоактивных отходов и природного урана. В результате сопоставление получаемых результатов с фактическими и прогнозными данными, характеризующими реальную радиационную опасность обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами, показало, что радиоэквивалентный подход не позволяет корректно сравнивать опасность различных вариантов топливных циклов и, более того, делать на этом основании выводы о преимуществах отдельных реакторных и радиохимических технологий. Причины, в частности, состоят в том, что:

- вместо сравнений выгод и затрат (вреда) сравниваются две компоненты вреда, связанные с опасностью извлекаемого урана и подлежащих захоронению радиоактивных отходов;
- сценарий определения потенциальной опасности добываемого урана и отработавшего ядерного топлива через поступление их в организм с водой и вдыхаемым воздухом приводит к завышению значений получаемых доз, в сравнении с подтвержденными практикой оценками, в миллиарды раз;
- не принимаются во внимание последствия имеющих неопределенностей, а проблема наличия этих неопределенностей решается некорректно.

Фактические данные убедительно подтверждают, что на протяжении всех лет существования атомной энергетики основные дозы облучения от деятельности объектов ядерного топливного цикла и АЭС были связаны с добычей урана. При этом дозы от добычи и транспортировки урана на порядок выше, чем фактические и прогнозируемые дозы от захоронения отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов.

► **Ключевые слова:** радиоэквивалентный подход, радиоактивные отходы, отработавшее ядерное топливо, уран, выдержка, глубинное захоронение, дозы облучения.

Статья публикуется в порядке дискуссии.

Редакция журнала будет признательна авторам статей с альтернативными мнениями по данному вопросу.

* Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики» Российской академии наук, Москва, Россия.

DEEP DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE IN THE CONTEXT OF THE RADIOEQUIVALENT APPROACH

Linge I. I.*, D. Sc.

Utkin S. S.*, D. Sc.

Article is received on April 24, 2023.

Abstract

The paper considers the main drawbacks of the radioequivalent (radiotoxicity) approach to the disposal of radioactive waste based on the analysis of the case studies of applications of this approach. The results of the comparison with actual and forecast data show that the rejection of internationally recognized radiation safety principles in favor of non-physical functionals of radioactive waste and natural uranium activities radioequivalent approach gives neither correct comparison of hazard of various fuel cycle options nor valid conclusions on the advantages of various reactor and radiochemical technologies.

In particular, the reasons are as follows:

- instead of comparison of benefits and costs (hazard), the comparison of the two components of the hazard is carried out related to uranium mining and radioactive waste disposal;

- the scenario of evaluation of the potential hazards of the mined uranium and spent nuclear fuel via water intake and inhalation causes billion-fold overestimated exposure values compared to the practical evidence;

- implications of existing uncertainties are not considered with the uncertainty management problem itself being addressed incorrectly.

Actual data definitely confirm that throughout the nuclear power era, the major doses of radiation exposure from nuclear fuel cycle facilities and NPPs have been mainly associated with uranium mining. Exposure from uranium mining and transportation is several orders greater than the actual and forecasted doses from spent nuclear fuel and radioactive waste disposal.

► **Keywords:** *radioequivalent (radiotoxicity) approach, radioactive waste, spent nuclear fuel, uranium, decay storage, deep disposal, exposure dose.*

* Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Введение

Более пяти лет назад наметилась тенденция противопоставления радиоэквивалентного подхода (РЭ-подход) концепции геологического захоронения, принятой в мире и зафиксированной в документах МАГАТЭ, требованиях Объединенной конвенции [1] и российской нормативно-правовой базе, вплоть до предложений о внесении изменений в утвержденную в 2018 г. Стратегию создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов [2]. Более того, в стратегическом документе [3] было зафиксировано, что *«Безопасность захоронения РАО на сотни тысяч и миллионы лет вызывает вполне обоснованные сомнения относительно надежности столь долговременных прогнозов. Организация пережигания и трансмутации наиболее долгоживущих изотопов... позволяет сделать убедительными доказательства безопасности обращения с РАО»*. Риски практической реализации этих формулировок авторами статьи уже указывались в [4]. Мы также давно утверждаем [5], что никакие радиологические соображения не могут быть применены для обоснования выбора между открытым и замкнутым ядерным топливным циклом (ЯТЦ): дозы облучения слишком малы, а отличия между ними – незначительны.

В этот же период встал вопрос об отсутствии обоснованного и критического анализа РЭ-подхода и актуального, но краткого обзора работ в рамках традиционного подхода к геологическому захоронению радиоактивных отходов (РАО). Эти материалы были подготовлены и в 2019 г. переданы заинтересованным специалистам – первый в форме рукописи, а второй в форме препринта [6]. К сожалению, в последующий период в позиции сторонников РЭ-подхода не произошло никаких изменений в сравнении со специально подготовленной в тот период технической справкой [7]. Более того, участниками дискуссии по стратегии замыкания ЯТЦ и сегодня ставится вопрос об исключении работ по геологическому захоронению РАО из перечня базовых направлений развития.

В конце 2022 г. в работе [8] был дан критический анализ РЭ-подхода, который всецело нами поддерживается. По поводу этого анализа свое мнение изложили и авторы проанализированного подхода [9], оставляя без внимания или оспаривая все принципиальные замечания. Указанные обстоятельства побудили вернуться к развернутому анализу основных положений РЭ-подхода. Материалы 2019 г. составили основу настоящей статьи.

Далее излагаются основные спорные моменты РЭ-подхода и рассматриваются некоторые связанные с этим обстоятельства.

Рассмотрение основных положений радиоэквивалентного подхода

В общем виде РЭ-подход предполагает отказ от традиционных методов и принципов обеспечения радиационной безопасности и операционных величин [10], их замену некоторым функционалом от активности РАО и сравнение этого функционала с аналогичным функционалом для вовлекаемого в ЯТЦ природного урана. Достижение равенства (равновесия, эквивалентности) между ними оценивается как благополучное обстоятельство, к наступлению которого ищутся и находятся пути в форме технологических решений (трансмутация отдельных групп радионуклидов) или вычислительных процедур (переход от радиационной к радиологической эквивалентности).

Потенциальная биологическая опасность и пожизненный атрибутивный риск (LAR) как главные операционные величины подхода

Напомним, что РЭ-подход определяет потенциальную биологическую опасность (ПБО) как сумму величин активности отдельных радионуклидов, умноженных на дозовые коэффициенты из «Норм радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) [11]. В целом, с поправкой на подход к расчету коллективной дозы, этот подход известен и применялся рядом авторов, например в форме комплексного показателя опасности объектов [12] для целей ранжирования и выбора приоритетов в работах по ликвидации ядерного наследия. При этом форма его применения была гораздо более детальная: учитывались и агрегатное состояние радиоактивного материала, и состояние барьеров безопасности, и необходимость мониторинга состояния объекта, и ряд иных факторов. Обратим внимание, что в РЭ-подходе при определении ПБО не учитывается наличие ни одного из барьеров безопасности, а также агрегатные формы урановой руды и РАО или отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). При этом планировавшийся переход к расчету радиационно-миграционной эквивалентности, хоть как-то частично отражающей задерживающие свойства геологической среды и миграцию по трофическим цепочкам отдельных элементов, развития не получил. Простой учет в растворимой

части массы радионуклида, определенной с помощью коэффициента распределения K_d (отношения содержания радионуклида в твердой фазе к его содержанию в жидкой в условиях достигнутого равновесия), никоим образом не отражает основные механизмы развития геомиграции. Таким образом, РЭ-подход может быть охарактеризован как некая «радиационная» метафора, не имеющая отношения к безопасности конкретного объекта и конкретной когорты населения.

В последние годы получило развитие РЭ-подхода в сторону радиологической эквивалентности, от расчетов (оценки) эффективных доз к расчету доз на органы и рисков на их основе. Это развитие представляется еще одним шагом удаления от реальности, на котором к неопределенностям общего сценария облучения добавляются новые, связанные с оценкой доз на органы и определяемых ими рисков, в том числе с используемой медико-демографической основой (половозрастной состав населения, фоновая онкозаболеваемость). Апеллируя к необходимости принятия во внимание отличий в оценках рисков при учете органных доз, достигающих не более порядкового масштаба, авторы полностью игнорируют многопорядковые просчеты, связанные с принятой моделью расчета концентраций и облучения. Ключевые в данном случае вопросы правильного цитирования публикации Международной комиссии по радиологической защите [10] решаются волевым образом: критики РЭ-подхода указывают на некорректность, а его авторы в качестве довода приводят следующий: «в данной публикации отсутствует утверждение о том, что дозы в органах следует учитывать только при ретроспективных оценках дозы и риска». Аккуратно процитируем оригинал: «основными видами применения эффективной дозы в радиационной защите как для профессиональных работников, так и для населения в целом являются: оценка ожидаемой дозы (*prospective dose assessment*) для планирования и оптимизации защиты и оценка уже полученной дозы (*retrospective dose assessment*) для демонстрации соответствия предельным дозам или для сравнения с ограничениями дозы или контрольными уровнями» [10]. Таким образом, однозначно следует, что при планировании защиты в ситуации потенциального облучения населения, связанного с глубинным захоронением РАО, следует использовать эффективные, а не эквивалентные дозы. Аналогична ситуация и с документом МАГАТЭ [13], к которому апеллируют сторонники РЭ-подхода,

поскольку он якобы предназначен для оценки именно перспективных радиационных рисков и именно по органным дозам [9], и в нем используются именно органные дозы [14]. На самом деле эта работа посвящена расчету ожидаемых рисков (*future risk*), связанных исключительно с задокументированным плановым облучением персонала. Эта методика не имеет отношения к ситуации потенциального облучения населения [15]. Адресация сторонников РЭ-подхода к иным документам носит аналогичный характер.

Выбор критериального соотношения

Классический подход к комплексному сравнению технологий (*cost-benefit analysis* или анализ «отрицательных-положительных» эффектов) предусматривает рассмотрение набора альтернатив, в результате чего формируется критерий эффективности, принимающий оптимальное значение для приоритетной инициативы. Существует огромное множество вариантов преобразований, алгоритмов и методов расчета затрат, выгод и критериев эффективности, однако все они предусматривают наличие «затратной» и «доходной» составляющих в составе:

- выгоды: прямые или косвенные доходы, положительные социально-экономические эффекты и предотвращенный ущерб (опасности, риски);
- затраты: издержки, затраты, потери, недополученная прибыль, чистые остаточные риски (опасность, вред).

Современная система радиологической защиты [10, 16] также основана на подобном принципе. Он называется принципом обоснования – любое решение, изменяющее ситуацию облучения, должно приносить больше пользы, чем вреда. Это означает, что при введении нового источника излучения, снижении существующего облучения или риска потенциального облучения должна достигаться индивидуальная или общественная польза, во всех случаях существенно превышающая наносимый вред. Помимо этого, она использует еще два принципа – оптимизации защиты (вероятность облучения, число облученных лиц и величина индивидуальных доз должны быть удержаны на таком низком уровне, насколько это разумно достижимо с учетом социально-экономических факторов) и нормирования (использования пределов дозы). Можно было бы ожидать подобного подхода и в рамках РЭ-подхода.

Но в РЭ-подходе алгоритм обоснования иной. Сравняются ПБО: извлеченного урана и захо-

раниваемых РАО. А их соотношение трактуется так: «сравняя первое со вторым, можно наглядно видеть, насколько ядерная энергетика нарушает природный радиоактивный баланс». На наш взгляд, это некорректно применительно к решаемой задаче, поскольку на практике природный баланс нарушается и вследствие добычи урана, и вследствие производства топлива, эксплуатации АЭС и последующего захоронения ОЯТ и РАО. Таким образом, выполнение условий радиоэквивалентности – это не благо, а соотношение между различными компонентами вреда (затрат) от деятельности ЯТЦ. Радикально «зеленый» взгляд на атомную энергетику, например, предлагает иное решение, тоже определяемое в их понятийном аппарате как «благо», а именно приведение к нулю всех компонент, связанных с атомной энергетикой.

Указанные обстоятельства позволяют констатировать, что в существующем виде РЭ-подход игнорирует ключевые положения современной системы радиологической защиты. В ней, кстати, прямо указывается [10]: «...обоснование далеко выходит за рамки радиационной защиты. По этим причинам Комиссия может только рекомендовать, чтобы в процессе обоснования чистая польза была положительной. Поиск возможной наилучшей альтернативы лежит за пределами ответственности органов, занимающихся обеспечением радиационной защиты». И это понятно, принятие решений по энерготехнологиям должно опираться на гораздо больший объем оценок: и это не только себестоимость энергопроизводства и его безопасность, а и экологичность, общественная приемлемость и т. д.

Сценарий облучения

Этот компонент РЭ-подхода наиболее далек от реалистичности. Авторами предлагается в качестве ПБО использовать эквивалентную дозу, которую может получить человек при потреблении внутрь (с пищей или с воздухом) радиоактивного материала путем умножения соответствующих активностей на дозовые коэффициенты из «Норм радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) [11]. Этот прием известен, но для сравнительных задач, в которых имеет значение не относительное, а абсолютное значение оцениваемой величины, и применяется в иной постановке. Например, при установлении предельных значений уровней активности для решения вопроса об освобождении РАО и материалов, содержащих радиоактивные вещества, от радиационного контроля. В этом случае

сценарием предполагалось, что на месте размещения таких потенциальных РАО могут жить люди, и дети могут слизывать с загрязненной ладоней около 100 г почвы в год [17, 18]. Примеры, демонстрирующие реальные уровни потребления радиоактивного материала, рассеянного в природной среде, можно извлечь из опыта изучения последствий аварии на Чернобыльской АЭС. При загрязнении сельскохозяйственных земель уже через несколько лет уровни извлечения всеми традиционными продуктами питания (молоко, мясо, зерно, картофель, овощи) составляют величины в ~ 0,001 % от выпавшего количества активности, а через 20–30 лет они становятся еще на порядок ниже. Представить себе, чтобы урановая руда или тем более ОЯТ употреблялись внутрь сегодня или через столетия, просто невозможно. На этом фоне любой иной сценарий, даже такой, как ручная разделка ОЯТ и РАО, представляется более реалистичным. Однако ни одна из этих идей не имеет потенциала развития в сторону учета половозрастной структуры населения и органных рисков [19]. Единственно верным, по нашему мнению, подходом было бы использование фактических данных по облучению персонала и населения на различных этапах ЯТЦ. Эти данные присутствуют в большом количестве источников, причем с обобщениями как на мировом, так и на национальном уровнях. Главный вывод из них относительно открытого топливного цикла и цикла с переработкой ОЯТ уже сделан: отличия в дозах облучения столь невелики, а сами они настолько малы, что радиологические аспекты не могут рассматриваться в качестве оснований для выбора того или иного цикла [20].

Интересен вопрос об уровне «консерватизма» предусмотренного РЭ-подходом сценария облучения. В работе [7] указано, что «ПБО 1 тонны природного урана составляет $4,93 \cdot 10^4$ Зв, из них $4,821 \cdot 10^4$ Зв – цепочка распадов ^{238}U (собственная ПБО изотопов ^{234}U и ^{238}U составляет $1,196 \cdot 10^3$ Зв) и $1,131 \cdot 10^3$ Зв – цепочка распадов ^{235}U , т. е. 2,3 % от суммарной величины». Мировая добыча природного урана составляет (по U) примерно 60 тыс. т/год [21]. Одна тридцатая этой величины может быть соотнесена с г. Краснокаменском (53 тыс. жителей, добыча около 2 тыс. т/год). Для жителей г. Краснокаменска средние техногенные дозы облучения населения составляют 10 мкЗв/год [22], при том что основной вклад в эту величину дают выбросы Краснокаменской ТЭЦ [23]. В докладах Научного комитета по действию атомной радиации Организации объединенных наций [24]

приводится более консервативная оценка индивидуальной эффективной дозы на население при добыче урана в 25 мкЗв/год (см. таблицу). Но и в этом случае коллективная доза на население будет составлять примерно 1,3 чел.-Зв, а на персонал – около 10 чел.-Зв (около 3 тыс. работников). Можно предположить, что след от урана, добытого в конкретном году, продлится еще несколько десятилетий, пока радионуклиды урана не уйдут из зоны биологической доступности, что даст увеличение коллективной дозы на население, скажем, в 10 раз. В этом случае коллективные дозы для добычи 2 тыс. т урана составят 23 чел.-Зв. или, грубо, 10^{-3} чел.-Зв на 1 т урана. Как сопоставить это значение с $4,93 \cdot 10^4$ Зв не очень понятно. Также непонятно, как население сможет «освоить» подобные дозы облучения. Примерно на это же указывается и в работе [8]. Но понятно иное – РЭ-подход не является консервативной гипотезой на тему радиационной безопасности, а есть отвлеченное от действительности теоретическое построение. Действительность такова: в недрах земли находится более 5 млн т урана. Его малая часть расположена в районе Кавказских Минеральных Вод – может быть, порядка 10 000 т (большая часть уже извлечена). Часть населения получает повышенные дозы от природных радионуклидов, в том числе радона, источником которых был все тот же уран. Можно предположить, что около 100 тыс. жителей

получают повышенные дозы облучения порядка 4 мЗв. Итого получаем 0,04 чел.-Зв/год на 1 т урана, что меньше указанной ранее величины в миллион раз. Учтем прошлые года, умножив эту дозу на 500 с учетом того, что прошлую 1 000 лет заселенность местности была меньше, и добавим еще 10 000 лет в оптимистичном расчете на будущее. В этом случае получим 420 чел.-Зв, что опять-таки на 2 порядка меньше величины, фигурирующей в РЭ-подходе. Это главная проблема РЭ-подхода. Вместо оперирования актуальными и контролируруемыми для какого-то поколения людей величинами, РЭ-подход вовлекает их в отвлеченные понятия ПБО, которые не имеют отношения к безопасности данного поколения, да и любого другого.

Аналогичная ситуация и с оценкой ПБО в единицах дозы от захоронения ОЯТ или РАО. При захоронении РАО в геологических формациях, а именно оно и будет реализовано на практике, основные сложности [6] связаны с долгосрочной миграцией таких слабосорбируемых долгоживущих радионуклидов, как ^{129}I , ^{79}Se , ^{135}Cs , ^{36}Cl , ^{126}Sn , ^{107}Pd , ^{99}Tc . Их доля в текущей ПБО крайне невелика. Например, в ОЯТ после 50 лет выдержки их доля будет около $3 \cdot 10^{-5}$. Сыграют свою роль в формировании доз эти радионуклиды очень нескоро – через сотни тысяч лет, за счет миграции и рассеяния в геологической среде, дающих при глубинном захоронении еще 5–6 порядков уменьшения активности. В итоге

Таблица

Оценка среднегодовых индивидуальных доз облучения для населения при мирном использовании атомной энергии, мкЗв/год
Assessment of the annual individual exposure doses for population for the cases of peaceful use of nuclear energy, μSv/year

Пространственные уровни воздействия		
Локальный уровень		
Ядерный топливный цикл и производство энергии	Добыча урана	25
	Производство топлива	0,2
	Эксплуатация ядерной энергетической установки	0,1
	Переработка отработавшего ядерного топлива	2
Иное использование	Транспортировка радиоактивных отходов	< 0,1
	Побочные продукты	0,2
Региональный уровень		
Ядерный топливный цикл и производство энергии	Производство топлива	< 0,01
	Эксплуатация ядерной энергетической установки	< 0,01
	Переработка	0,02
Захоронение твердых радиоактивных отходов и глобальный уровень		
Ядерный топливный цикл и производство энергии	Глобальное распространение радионуклидов	0,2
	Захоронение радиоактивных отходов	< 0,01

и в данном случае вместо реальных факторов опасности, которые могут угрожать будущим поколениям при нормальной эволюции пункта глубинного захоронения РАО, при РЭ-подходе рассматривается величина в 10^{11} раз большая. Насколько уместен подобный подход при обосновании технических решений по переработке ОЯТ и трансмутации и с экономических, и со всех иных позиций? Авторы РЭ-подхода подобные сравнения обходят стороной.

Радиоэквивалентность в терминах фактических и прогнозных доз облучения от добычи урана и захоронения РАО фактически давно достигнута.

В качестве иллюстрации на рисунке представлены две зависимости из работы [7]. На их фоне приведены фактические данные по дозам от добычи урана [24] и прогнозны значения доз облучения от захоронения РАО. Для простоты начало добычи урана отнесено к началу временной шкалы. Прогнозные значения взяты из соответствующих проектов [25], содержание и методология обоснования безопасности которых приведена в работе [6]. Приведенная зависимость соответствует сценарию нарушения нормальной эволюции вследствие сейсмического воздействия через 10 000 лет с разрушением упаковки с ОЯТ [26].

На приведенном рисунке обращает на себя внимание разница в масштабах характеристики опасности РЭ-подхода и традиционной практики оценки опасности.

Роль радиационного и иных техногенных рисков

Сравнение оценок радиационных рисков как от всех видов излучения, так и от отдельных этапов ЯТЦ, а также сравнение их с оценками иных техногенных рисков для населения, проживающего в районах расположения объектов атомной энергии, проводится на протяжении десятков лет [27–29]. Более 99 % от общего значения доз облучения населения России и мира приходится на природные источники и медицинские процедуры, а вклад предприятий, использующих источники ионизирующего излучения, не превышает 0,05 % от этого значения [30]. Причем вклад современного предприятия – и АЭС, и ЯТЦ в целом – в дозу облучения населения, даже в непосредственной близости от него, не может быть определен инструментально на фоне естественного облучения. Все потенциальные значения радиационных рисков получают расчетным путем. Данные Научного комитета по действию атомной радиации Организации объединенных

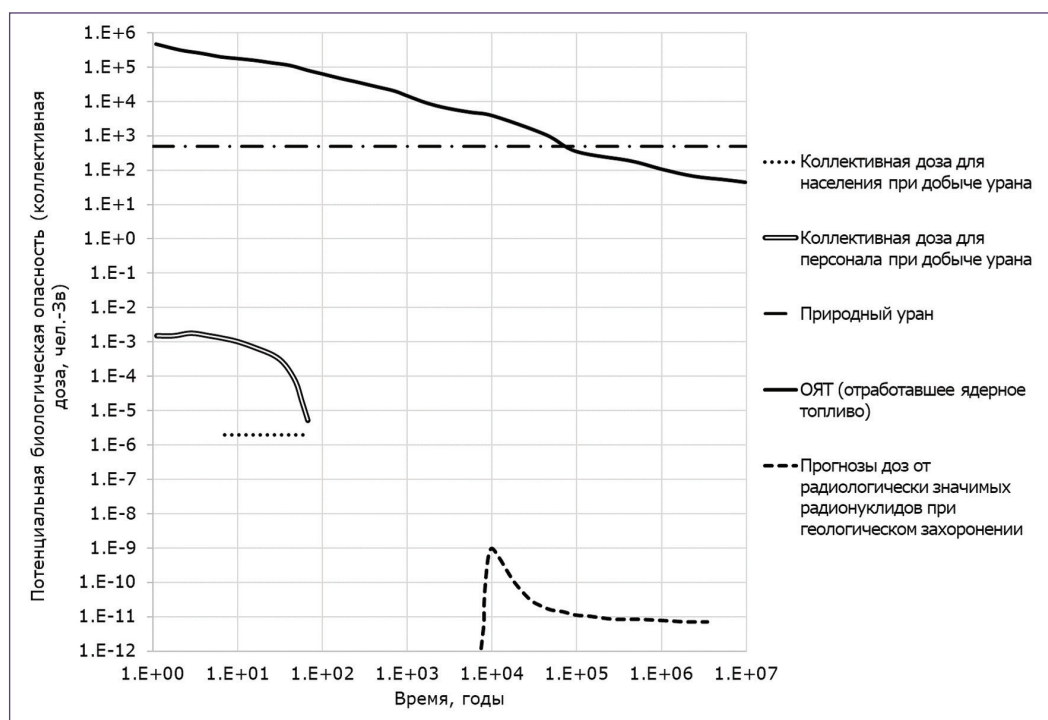


Рис. Потенциальная биологическая опасность от 1 кг отработавшего ядерного топлива ВВЭР-1000 и от 9,7 кг природного урана в сравнении с реальными коллективными дозами на персонал и население, нормированными на 10 кг добытого урана и дозами облучения при захоронении радиоактивных отходов [Fig. Potential biological hazard from 1 kg of VVER-1000 spent nuclear fuel and from 9,7 kg of natural uranium in comparison with the actual collective doses to personnel and the population, normalized to 10 kg of mined uranium and radiation doses during disposal of radioactive waste]

наций (см. таблицу) показывают, что основной вклад в дозы облучения населения от ЯТЦ дают выбросы естественных радионуклидов, в первую очередь радона и продуктов его распада, выделяемых при добыче и переработке урана и из хвостохранилищ, а также выбросы ^{14}C от АЭС и предприятий по переработке облученного топлива [24, 31]. Рассчитанное значение максимальной среднелетней дозы за счет работы всех АЭС мира составляет 0,01 мкЗв/год, т. е. на уровне 0,01 % от естественного фона [30]. Захоронение твердых РАО в глубоких геологических формациях обосновывается на сотни тысяч и миллионы лет [6]. К потенциальным источникам облучения населения для данных видов деятельности могут быть отнесены только авто- и железнодорожные перевозки упаковок с РАО. При этом оценки гипотетических рисков потенциального облучения также не превышают значение пренебрежимо малого риска [32]. Для РЭ-подхода это означает, что риски, связанные с добычей урана, давно и многократно превышают риски, связанные со всеми иными этапами ЯТЦ и в особенности с захоронением. Поэтому технологические усилия для снижения ПБО РАО не требуются.

Еще более выразительная картина сравнения радиационных рисков и рисков, связанных с загрязнением природной среды иными вредными веществами. Тут тотальное и многопорядковое доминирование нерадиационных факторов. Например, для района расположения ФГУП «ГХК» [28] ситуация ровно такая же. Только по оцененным нескольким химическим канцерогенам и взвешенным веществам индивидуальные годовые риски в 100–100 000 раз выше радиационных рисков. Такая ситуация наблюдается давно и будет сохраняться на протяжении столетий. Снижение выбросов загрязняющих веществ предприятиями и транспортом будет замещаться пылью, связанной с человеческой активностью, в том числе движением транспорта. Аналогичная ситуация с углеродными выбросами. В этой ситуации, казалось бы, надо решить первую задачу – отстоять право атомной энергетики на существование в ее реальном состоянии.

Выдержка и достижение радиоэквивалентности

Обрамляющие РЭ-подход тексты очень плотно насыщены понятиями «выдержка» и «достижение радиоэквивалентности». Между тем их содержание не раскрыто в приложении к оценке и обоснованию безопасности. Выдержка осуществляется в наземных хранилищах или нет? После достижения

эквивалентности РАО перестают быть опасными? Вовсе нет, и в их составе по-прежнему, практически в начальных концентрациях, содержатся все ранее перечисленные долгоживущие слабосорбируемые радионуклиды, которые требуют геологического захоронения. Без ясных ответов на поставленные вопросы и хоть каких-то экономических обоснований использование РЭ-подхода для выбора технических решений противопоказано. По этой причине нельзя не обратить внимание на тезис, присутствующий в последней работе [9]. Его краткое изложение может быть таким: оппонентам не следует противопоставлять РЭ-подход традиционному методу обоснования безопасности геологического захоронения. Далее дословно: *«Оба этих подходов должны дополнять друг друга, поскольку работают на разных уровнях агрегации информации по обеспечению экологической безопасности ядерной энергетики»*. Формулировки, мягко говоря, вызывающие, поскольку в документе [3] именно такое противопоставление ими же и зафиксировано.

Сроки решения проблемы накопленных радиоактивных отходов и глубинное захоронение радиоактивных отходов

Напомним одну цитату из фундаментальной работы более чем 30-летней давности [33], указывавшую, что *«проблемы переработки и регенерации ядерного топлива, захоронения радиоактивных отходов и снятия с эксплуатации отработавших ресурс ядерных энергоблоков станут действительно актуальными, по-видимому, к концу первого десятилетия следующего столетия, и к тому времени они должны быть решены»*. Напомним, что именно в конце первого десятилетия XXI века в России были начаты масштабные работы по выводу из эксплуатации объектов ядерного наследия и созданию современной системы обращения с РАО. Выполненный объем работ позволил в полной мере оценить трудности на этом пути и сроки возможного решения основного объема накопленных проблем. К сожалению, они очень велики и, по-видимому, будут затронут и следующий век. В этом смысле любые апелляции к большей эффективности простого хранения РАО, переименовыванию зарубежных проектов захоронения, оперирующих понятиями *retrivability* и *reversibility*, в проекты долговременного хранения, равно как и апелляция к достигаемой в будущем радиоэквивалентности, есть повторение пройденного этапа, а именно откладывания решения проблем по захоронению РАО.

Глубинное захоронение необходимо в отношении всех накопленных высокоактивных отходов и долгоживущих среднеактивных отходов, а также РАО, которые будут образовываться в ближайшие десятилетия, в том числе в рамках технологий реакторов типа БРЕСТ. РЭ-подход не предлагает решений в отношении целого ряда радионуклидов с высокой миграционной способностью. Исключение составляют Тс и I, в отношении которых также предлагается [34] трансмутация в боковом экране реактора типа БРЕСТ. При этом среди принятых ограничительных условий по изотопному составу, например только ^{129}I . Понятно, что задача выделения этого изотопа не является легкой и дешевой. Можно также напомнить, что анализ экономической целесообразности глубинного захоронения РАО выполнен и для обращения с РАО от переработки смешанного нитридного уранплутониевого ОЯТ реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 [35]: «*Полный отказ от глубинного подземного захоронения экономически не выгоден*». Аналогичный вывод сделан и другой группой авторов [36]. Ими показано, что «*на современном этапе развития технологий переработки облученного топлива тепловых реакторов и при существующем законодательстве, связанном с условиями использования матриц для отверждения отходов и условиями захоронения отходов, обойтись без глубинного подземного захоронения отходов не представляется возможным*».

Переработка отработавшего ядерного топлива с фракционированием и трансмутацией отдельных радионуклидов

В замыкании ЯТЦ есть стратегические преимущества. Фракционирование РАО также, по-видимому, может быть полезно при его организации, исходя из рациональных принципов достижения гибкости их захоронения. Однако в настоящее время эти технологии, как и технологии трансмутации, практически не освоены. Есть надежда, что в ближайшие годы ситуация изменится в части переработки ОЯТ в опытно-демонстрационном центре ФГУП «ГХК» и в рамках проекта «Прорыв», но до настоящего времени не решены вопросы создания эффективных технологий переработки РАО на заводе РТ-1, в том числе выделения альфа-излучающих нуклидов из высокоактивных жидких РАО и многих других.

Вопросы трансмутации исследовались и многими зарубежными специалистами, однако на данный момент убедительных доказательств того, что

минорные актиноиды вообще следует извлекать из РАО и ОЯТ, нет. Обилие идей по конструкциям ядерных установок и технологических переделов для этих целей не сопровождалось повсеместным признанием перспективности данного направления. В этом смысле интересен вывод французской Национальной комиссии по оценке (Commission Nationale D'Evaluation), в 2005 г. решившей отказаться от дальнейшего рассмотрения этой технологии.

Это обстоятельство тем не менее, на наш взгляд, говорит только о том, что по мере осознания технологических возможностей и стоимостных оценок процессов фракционирования, соответствующие требования неизбежно будут корректироваться.

Обсуждение радиоэквивалентного подхода в научно-технической литературе

Несмотря на большое количество публикаций авторов РЭ-подхода (в [7] в качестве таковых определено 15 публикаций, включая статьи и монографии), он практически не обсуждался среди специалистов. Уровень принятия научной или технологической идеи можно измерить по показателям цитирования. Анализ баз данных научного цитирования РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) и Scopus по состоянию на октябрь 2019 г. дал представление об очень скромных уровнях цитирования 15 упомянутых в [7] публикаций по теме радиоэквивалентности, определяемых авторами подхода как полностью раскрывающих его суть, назначение и практические приложения. Эти уровни составляют 31 (РИНЦ) и 21 (Scopus) цитирование за все годы (то есть более чем за 20 лет), но если исключить случаи цитирования в ряде работ авторами подхода и исполнителями работ по их заказу, то отмечено только одно цитирование работы по нейтронным спектрам. Анализ имеющихся публикаций и публичных выступлений позволяет сделать следующие выводы.

В последнее время разработчиками РЭ-подхода упоминается недавно опубликованный Технический документ МАГАТЭ [13], выводы которого якобы «*находятся в хорошем согласии с результатами исследований радиационной (радиологической) эквивалентности*» [2]. Но содержание этого документа не имеет отношения ни к расчетам доз, ни к оценке рисков. В списке факторов, которые МАГАТЭ рекомендует учитывать при выборе системы обращения с РАО для инновационных реакторов и ЯТЦ, есть радиотоксичность, в том числе оценки по ее снижению, есть профессиональное

облучение на объектах по обращению с РАО и другие, но пожизненных рисков при потенциальном облучении населения в этом документе нет [19]. При этом там же отмечено (с. 73), что «радиотоксичность вообще не коррелирует с предлагаемыми критериями эффективности систем захоронения (например, с дозой для человека)».

Относительно радиотоксичности как в корне неверном и даже дискредитирующем критерии для выбора технологических решений по фракционированию и шире – ЯТЦ, пишут и авторитетные специалисты в области оценок долговременной радиационной и экологической безопасности, участвовавшие во многих результативных проектах по созданию пункта захоронения РАО [37].

Заключение

Обобщение изложенных в статье замечаний и констатаций позволяет утверждать следующее.

1. Фактические данные убедительно подтверждают, что РЭ-подход к захоронению РАО де-факто уже состоялся. На протяжении всех лет существования атомной энергетики основные дозы облучения от деятельности объектов ЯТЦ и АЭС были связаны с добычей урана. При этом дозы от добычи и транспортировки урана на порядок выше, чем фактические и прогнозируемые дозы от захоронения ОЯТ и РАО. По уровням рисков для здоровья рассмотренные компоненты радиационных рисков, даже в самых худших случаях, оказываются на многие порядки меньшими, чем риски нерадиационной природы, связанные с загрязнением окружающей среды иными вредными веществами.

2. Глубина проработки обоснования РЭ-подхода в существующем виде не может быть признана соответствующей уровню решаемых с его использованием задач (в первую очередь связанных с предметными требованиями к фракционированию). Причины, в частности, состоят в том, что:

- вместо сравнений выгод и затрат (вреда) сравниваются две компоненты вреда, связанные с опасностью извлекаемого урана и подлежащих захоронению РАО;
- сценарий определения потенциальной опасности добываемого урана и ОЯТ через поступление

их в организм с водой и вдыхаемым воздухом приводит к завышению значений получаемых доз, в сравнении с подтвержденными практикой оценками, в миллиарды раз;

- не принимаются во внимание последствия имеющихся неопределенностей, а проблема наличия этих неопределенностей решается некорректно.

3. Утверждения о том, что РЭ-подход – это экстраполяция, позволяющая сравнить опасность различных вариантов обращения с ОЯТ и РАО, сделать на этом основании выводы о преимуществах отдельных технологий и выбрать оптимальную, являются заблуждением. При переходе к конкретным технологическим решениям и расчету затрат и опасностей результаты будут принципиально отличаться от полученных при применении РЭ-подхода, поскольку РЭ-подход является не консервативным, а несоответствующим протекающим процессам и явлениям, которые будут сопровождать замыкание ЯТЦ.

4. Необходимо зафиксировать изолированность РЭ-подхода от мировых данных и подходов в области радиационной безопасности и радиологической защиты.

5. Фракционирование радионуклидов, как и трансмутация минорных актиноидов, несмотря на имеющиеся технологические трудности, по-видимому, могут быть востребованы для целей дожигания ядерных материалов и повышения гибкости захоронения. Решающую роль в их востребованности будут играть прогресс технологий и комплексные экономические оценки.

6. Подготовка РАО к захоронению является длительным, ресурсоемким процессом. Практика откладывания решения проблем, связанных с завершением жизненного цикла ОЯТ и РАО, продемонстрировала существенные издержки. В последнее десятилетие в России работы по ядерному наследию успешно стартовали, в том числе идут работы по геологическому захоронению РАО. Любые препятствия их развитию могут поставить под вопрос само существование атомной энергетики как экологически безопасного способа производства электроэнергии, в рамках каких бы стратегических подходов она ни развивалась.

Литература

1. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами от 05.09.1997: ратифицирована Федеральным законом Российской Федерации от 04.11.2005 № 139-ФЗ.

2. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов: утв. генеральным директором Госкорпорации «Росатом» А. Е. Лихачевым 28.03.2018 // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114–120.
3. Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года: одобрено решением Президиума НТС Госкорпорации «Росатом» 26.12.2018. – М., 2018. – 62 с.
4. Большов Л. А., Линге И. И. О согласовании этапов развития атомного энергопромышленного комплекса и системы обращения с РАО // Радиоактивные отходы. 2019. № 3 (8). С. 14–27.
5. Большов Л. А., Арутюнян Р. В., Линге И. И., Павловский О. А. О роли радиационных факторов в экологических рисках для населения России // Бюллетень по атомной энергии. 2001. № 5. С. 29–33.
6. Абалкина И. Л., Большов Л. А., Капырин И. В., Линге И. И., Савельева Е. А., Свительман В. С., Уткин С. С. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние: Препринт / Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, № ИБРАЕ-2019-03 – М: ИБРАЭ РАН, 2019. – 40 с.
7. Лопаткин А. В. Исходные требования к фракционированию изотопов для обеспечения р/э захоронения РАО. Техническая справка № 01.2019 НРРЭ / ЧУ «Инновационно-технологический центр проекта «Прорыв», 2019. – 20 л.
8. Кудрявцев Е. Г., Шарафутдинов Р. Б., Курындин А. В., Шаповалов А. С. К вопросу о достижимости радиационной (радиологической) эквивалентности радиоактивных отходов и природного урана // Ядерная и радиационная безопасность. 2022. № 4 (106). С. 73–83. DOI 10.26277/SECNRS.2022.106.4.006.
9. Иванов В. К., Лопаткин А. В., Спиринов Е. В., Соломатин В. М. Радиационная (радиологическая) эквивалентность РАО и природного уранового сырья: технология обеспечения безопасности нынешнего и будущего поколений // Ядерная и радиационная безопасность. 2023. № 2 (108). С. 31–41.
10. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2–4). ICRP, 2007.
11. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47.
12. NDA Prioritization – Calculation of Safety and Environmental Detriment Scores, Doc. No. EGPR02 Rev. 6, April 2011.
13. Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles. A preliminary study. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.7. Vienna: IAEA, 2019.
14. Иванов В. К., Лопаткин А. В., Меняйло А. Н., Спиринов Е. В., Чекин С. Ю., Ловачёв С. С. и др. Достижимость радиологической эквивалентности в ЗЯТЦ на базе БР с учетом факторов неопределенности сценариев развития ядерной энергетики в России до 2100 г. Часть 1. Мощность ТР и БР // Радиация и риск. (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2021. Т. 30. № 2. С. 62–76.
15. Assessment of Prospective Cancer Risks from Occupational Exposure to Ionizing Radiation. IAEA-TECDOC-1985. – IAEA, Vienna, 2021. P. 44.
16. О радиационной безопасности населения: Федер. закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ.
17. Commission of the European Communities. Principles and Methods for Establishing Concentrations and Quantities (Exemption Values) below Which Reporting Is not Required in the European Directive, Radiation Protection 65, Doc. XI-028/93, CEC, Brussels, 1993.
18. European Commission. Radiation Protection № 157. Comparative Study of EC and IAEA Guidance on Exemption and Clearance Levels. Directorate-General for Energy. 2010.
19. Меняйло А. Н., Ловачёв С. С., Чекин С. Ю., Иванов В. К. Технология оценки радиационных рисков ОЯТ с учетом состава смесей радионуклидов и распределений органнх доз облучения // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2019. Том 28. № 1. С. 26–36.
20. Nuclear Energy Agency. Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management. NEA, 2006.
21. УРАМ-2018. Взлеты и падения: экономика уранодобывающего производства. URL: <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/uram-2018-vzlety-i-padeniya-ekonomika-uranodobyvayushchego-proizvodstva> (дата обращения: 04.04.2023).

22. Панченко С. В., Крышев И. И., Линге И. И. и др. Радиозоологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / Под общ. ред. И. И. Линге и И. И. Крышева. – М.: «САМ полиграфист», 2015. – 296 с.
23. Кириченко Т. Г. Анализ радиационного воздействия объектов ОАО «ППГХО» на окружающую природную среду в районе деятельности его по итогам 2012 года. – Краснокаменск: ОАО «ППГХО», 2013. – 26 с.
24. UNSCEAR, 2010. – UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly. Annex B, New York, 2010. 245 p.
25. Long-term Safety for the Final Repository for Spent Nuclear Fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Svensk Kärnbränslehantering AB. SKB TR-11-01. March 2011.
26. Fälth B., Hökmark H., Munier R. Effects of Large Earthquakes on a KBS-3 Repository: Evaluation of Modelling Results and Their Implications for Layout and Design. Svensk kärnbränslehantering (SKB), 2010.
27. Онкологическая «цена» тепловой и атомной электроэнергетики / Под ред. акад. Л. А. Ильина и проф. И. П. Коренкова. – М: Медицина, 2001. – 240 с.
28. Арутюнян Р. В., Воробьева Л. М., Панченко С. В. и др. Сопоставительный анализ радиационных и химических рисков для здоровья населения Красноярского края // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2014. Том 23. № 2. С. 123–136.
29. Панченко С. В., Аракелян А. А., Ведерникова М. В., Поцяпун Н. П., Каргин О. А., Сикора О. Н., Степанова У. Г. Сравнительная оценка радиационных и токсических рисков в Ангарске // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2017. Т. 26. № 2. С. 83–96.
30. Онищенко Г. Г., Попова А. Ю., Романович И. К., Барковский А. Н., Кормановская Т. А., Шевкун И. Г. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 2. Характеристика источников и доз облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 18–35.
31. UNSCEAR, 2016. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Scientific Annex B. Exposures of the public and workers from various sources of radiation. United Nations, New York, 2017. Pp. 135–240.
32. Ведерникова М. В., Пронь И. А., Савкин М. Н., Цебаковская Н. С. Дозы облучения персонала и населения при нормальной эксплуатации пунктов захоронения радиоактивных отходов // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10. № 3. С. 57–65.
33. Ядерная энергетика. Проблемы и перспективы. Экспертные оценки / Под ред. А. П. Александрова и др. – М.: Изд. ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1989. – 489 с.
34. Адамов Е. О., Ганев И. Х., Лопаткин А. В., Муратов В. Г., Орлов В. В. Трансмутационный топливный цикл в крупномасштабной ядерной энергетике России. – М.: ГУП НИКИЭТ, 1999.
35. Кашеев В. А., Шадрин А. Ю. Обращение с РАО от переработки смешанного нитридного уран-плутониевого ОЯТ / IX Российская конференция «Радиохимия-2018»: сборник тезисов. 2018. С. 265.
36. Кашеев В. А., Шадрин А. Ю., Рыкованов Г. Н., Дырда Н. Д., Макеева И. Р., Хмельницкий Д. В., Алексеев П. Н. Объем радиоактивных отходов от переработки облученного ядерного топлива ВВЭР-1000 и варианты фракционирования // Атомная энергия. Том 127. № 2 (8). 2019. С. 82–87.
37. Apted M., Kessler J., Kozak M., et al. “Radiotoxicity Index”: an Inappropriate Discriminator for Advanced Fuel Cycle Technology Selection, WM2012 Conference, February 26 – March 1, 2012, Phoenix, AZ. 2012.

References

1. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management of September 5, 1997.
2. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov (2018) [Strategy for the development of RW deep disposal facility]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste, No. 3 (4), pp. 114–120. [in Russian].
3. Strategiya razvitiya yadernoy energetiki Rossii do 2050 goda i perspektivy na period do 2100 goda [Strategy for the nuclear power development in Russia until 2050 and the prospects for the period up to 2100]. 2018.

4. Bolshov L. A., Linge I. I. (2019). O soglasovanii etapov razvitiya atomnogo ehnergopromyshlennogo kompleksa i sistemy obrashcheniya s RAO [Building consistency between development stages of nuclear power complex and RW management system]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste, No. 3 (8), pp. 14–27. [in Russian].
5. Bolshov L. A., Arutyunyan R. V., Linge I. I., Pavlovskiy O. A. (2001). O roli radiatsionnykh faktorov v ekologicheskikh riskakh dlya naseleniya Rossii [On the role of radiation factors in the environmental risks for the population of Russia]. Byulleten' po atomnoy energii – Atomic energy bulletin, No. 5, pp. 29–33. [in Russian].
6. Abalkina I. L., Bolshov L. A., Kapyrin I. V., Linge I. I., Saveleva E. A., Svitelman V. S., Utkin S. S. (2019). Obosnovaniye dolgovremennoy bezopasnosti zakhroneniya OYAT i RAO na 10 000 i boleye let: metodologiya i sovremennoye sostoyaniye [Long-term safety assessment of SNF and RW disposal covering a period of over 10 000 years: methodology and the state-of-art]. Preprint / Nuclear Safety Institute of RAS, No. IBRAE-2019-03. Moscow: Nuclear Safety Institute of RAS. 40 p. [in Russian].
7. Lopatkin A. V. (2019). Iskhodnyye trebovaniya k fraktsionirovaniyu izotopov dlya obespecheniya r/e zakhroneniya RAO [Initial requirements to isotope fractionation providing radioequivalent radioactive waste disposal]. Technical reference No. 01.2019 NRRE. Private Institution Innovation and Technology Center of the Proryv Project. 20 p. [in Russian].
8. Kudryavtsev E. G., Sharafutdinov R. B., Kuryndin A. V., Shapovalov A. S. (2022). K voprosu o dostizhimosti radiatsionnoy (radiologicheskoy) ekvivalentnosti radioaktivnykh otkhodov i prirodnogo urana [Discussion on the achievability of radiation (radiological) equivalence between radioactive waste and natural uranium]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 4 (106), pp. 73–83. [in Russian].
9. Ivanov V. K., Lopatkin A. V., Spirin E. V., Solomatin V. M. (2023). Radiatsionnaya (radiologicheskaya) ekvivalentnost' RAO i prirodnogo uranovogo syr'ya: tekhnologiya obespecheniya bezopasnosti nyneshnego i budushchego pokoleniy [Radiation (radiological) equivalence of radioactive waste and natural uranium raw materials as a method providing the safety of present and future generations]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 2 (108), pp. 31–41. [in Russian].
10. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2–4). ICRP, 2007.
11. Sanitarnye pravila i normativy SanPiN 2.6.1.2523-09 “Normy radiacionnoj bezopasnosti” (NRB-99/2009). [Sanitary rules and regulations SanPiN 2.6.1.2523-09 “Radiation safety standards” (NRB-99/2009)]. 2009.
12. NDA Prioritization – Calculation of Safety and Environmental Detriment Scores, Doc. No. EGPR02, Rev. 6. April 2011.
13. Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles. A preliminary study. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.7. IAEA, Vienna, 2019.
14. Ivanov V. K., Lopatkin A. V., Menyaylo A. N., Spirin E. V., Chekin S. Yu., Lovachov S. S., et al. (2021). Dostizhimost' radiologicheskoy ekvivalentnosti v ZYATTS na baze BR s uchotom faktorov neopredelonnosti stsenariyev razvitiya yadernoy energetiki v Rossii do 2100 g. Chast' 1. Moshchnost' TR i BR [Achievability of radiological equivalence associated with closed nuclear fuel cycle with fast reactors: impact of uncertainty factors in scenarios of Russian nuclear power development through to 2100. Part 1. Fast and thermal reactors]. Radiatsiya i risk – Radiation and Risk, V. 30, No. 2, pp. 62–76. [in Russian].
15. Assessment of Prospective Cancer Risks from Occupational Exposure to Ionizing Radiation. IAEA-TECDOC-1985. – IAEA, Vienna, 2021. P. 44.
16. Federal'nyi zakon No. 3-FZ “O radiatsionnoi bezopasnosti naseleniya” [Federal law No. 3-FZ “On the radiation safety of population”]. 1996.
17. Commission of the European Communities. Principles and Methods for Establishing Concentrations and Quantities (Exemption Values) below Which Reporting Is not Required in the European Directive, Radiation Protection 65, Doc. XI-028/93, CEC. Brussels, 1993.
18. European Commission. Radiation Protection No. 157. Comparative Study of EC and IAEA Guidance on Exemption and Clearance Levels. Directorate-General for Energy. 2010.
19. Menyaylo A. N., Lovachov S. S., Chekin S. Yu., Ivanov V. K. (2019). Tekhnologiya otsenki radiatsionnykh riskov OYAT s uchotom sostava smesey radionuklidov i raspredeleniy organnykh doz oblucheniya [Assessment of radiation risks from spent nuclear fuel depending on composition of radionuclides and radiation dose distribution in organs]. Radiatsiya i risk – Radiation and Risk, V. 28, No. 1, pp. 26–36. [in Russian].

20. Nuclear Energy Agency. Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management. NEA, 2006.

21. URAM-2018. Vzlety i padeniya: ehkonomika uranodobyvayushchego proizvodstva [URAM-2018. Ups and downs: the economics of uranium mining]. URL: <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/uram-2018-vzlety-i-padeniya-ekonomika-uranodobyvayushchego-proizvodstva> (reference date: 04.04.2023).

22. Linge I. I., Kryshev I. I. (Eds.) (2015). Radioekologicheskaya obstanovka v regionakh raspolozheniya predpriyatiy Rosatoma [Radioecological situation in the siting regions of Rosatom enterprises]. Moscow: "SAM poligrafist". 296 p. [in Russian].

23. Kirichenko T. G. (2013). Analiz radiatsionnogo vozdeystviya ob"yektov OAO "PPGKHO" na okruzhayushchuyu prirodnyuyu sredyu v rayone deyatelnosti yego po itogam 2012 goda [Analysis of the radiation impact of JSC PIMCU facilities on the environment in the area of its operation based on the results of 2012]. Krasnokamensk: JSC PIMCU. 26 p.

24. UNSCEAR, 2010. – UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly. Annex B, New York, 2010. 245 p.

25. Long-term Safety for the Final Repository for Spent Nuclear Fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Svensk Kärnbränslehantering AB. SKB TR-11-01. March 2011.

26. Fälth B., Hökmark H., Munier R. Effects of Large Earthquakes on a KBS-3 Repository: Evaluation of Modelling Results and Their Implications for Layout and Design. Svensk kärnbränslehantering (SKB), 2010.

27. Il'in L. A., Korenkov I. P. (Eds.) (2001). Onkologicheskaya "tsena" teplovoy i atomnoy elektroenerгии [Oncological "price" of thermal and nuclear power]. Moscow: Meditsina. 240 p. [in Russian].

28. Arutyunyan R. V., Vorobieva L. M., Panchenko S. V. et al. (2014). Sopostavitel'nyy analiz radiatsionnykh i khimicheskikh riskov dlya zdorov'ya naseleniya Krasnoyarskogo kraya [Comparative analysis of radiation and chemical risks to public health in Krasnoyarskiy kray]. Radiatsiya i risk – Radiation and Risk, V. 23, No. 2, pp. 123–136. [in Russian].

29. Panchenko S. V., Arakelyan A. A., Vedernikova M. V., Potsyapun N. P., Kargin O. A., Sikora O. N., Stepanova U. G. (2017). Sravnitel'naya otsenka radiatsionnykh i toksicheskikh riskov v Angarske [Comparative assessment of radiation and chemical risks in the city of Angarsk]. Radiatsiya i risk – Radiation and Risk, V. 26, No. 2, pp. 83–96. [in Russian].

30. Onishchenko G. G., Popova A. Yu., Romanovich I. K., Barkovsky A. N., Kormanovskaya T. A., Shevkun I. G. (2017). Radiatsionno-gigiyenicheskaya pasportizatsiya i YESKID – informatsionnaya osnova prinyatiya upravlencheskikh resheniy po obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti naseleniya Rossiyskoy Federatsii. Soobshcheniye 2. Kharakteristika istochnikov i doz oblucheniya naseleniya Rossiyskoy Federatsii [Radiation-hygienic passportization and Usidc-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 2: Characteristics of the Sources and Exposure Doses of the Population of the Russian Federation]. Radiatsionnaya gigiyena – Radiation Hygiene, V. 10, No. 3, pp. 18–35. [in Russian].

31. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Scientific Annex B. Exposures of the public and workers from various sources of radiation. UNSCEAR, 2016. United Nations, New York, 2017. Pp. 135–240.

32. Vedernikova M. V., Pron I. A., Savkin M. N., Tsebakovskaya N. S. (2017). Dozy oblucheniya personala i naseleniya pri normal'noy ekspluatatsii punktov zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Occupational and public exposure during normal operation of radioactive waste disposal facilities]. Radiatsionnaya gigiyena – Radiation Hygiene, V. 10, No. 3, pp. 57–65. [in Russian].

33. Aleksandrov A. P. (Ed.). Yadernaya energetika. Problemy i perspektivy. Ekspertnyye otsenki [Nuclear power. Problems and prospects. Expert assessments]. Moscow: NRC "Kurchatov Institute", 1989. 489 p. [in Russian].

34. Adamov E. O., Ganev I. Kh., Lopatkin A. V., Muratov V. G., Orlov V. V. (1999). Transmutatsionnyy toplivnyy tsikl v krupnomasshtabnoy yadernoy energetike Rossii [Transmutation fuel cycle in the Russian large-scale nuclear power industry]. Moscow: GUP NIKIET. [in Russian].

35. Kashcheev V. A., Shadrin A. Yu. (2018). Obrashcheniye s RAO ot pererabotki smeshannogo nitridnogo uran-plutoniyevego OYAT [Management of radioactive waste from the reprocessing of mixed nitride uranium-plutonium SNF]. IX Rossiiskaya koferentsia "Radiokhimiya-2018" – IX Russian conference "Radiochemistry-2018": collection of abstracts. P. 265. [in Russian].

36. Kashcheev V. A., Shadrin A. Yu., Rykovanov G. N., Dyrda N. D., Makeyeva I. R., Khmel'nitskii D. V., Alekseyev P. N. (2019). Ob"yem radioaktivnykh otkhodov ot pererabotki obluchennogo yadernogo topliva

VVER-1000 i varianty fraktsionirovaniya [Radwaste volume from VVER-1000 spent fuel reprocessing and fractionation variants]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, V. 127, No. 2, pp. 82–87. [in Russian].

37. Apted M., Kessler J., Kozak M. et al. “Radiotoxicity Index”: An Inappropriate Discriminator for Advanced Fuel Cycle Technology Selection, WM2012 Conference, February 26 – March 1, 2012, Phoenix, AZ. 2012.

Сведения об авторах

Линге Игорь Иннокентьевич, заместитель директора, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики» Российской академии наук (115191, Москва, ул. Большая Тульская, д. 52).

Уткин Сергей Сергеевич, заведующий отделением анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики» Российской академии наук (115191, Москва, ул. Большая Тульская, д. 52).

Authors credentials

Linge Igor Innokentevich, Deputy Director, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая str., Moscow, 115191), e-mail: linge@ibrae.ac.ru.

Utkin Sergey Sergeevich, Head of Department for Analysis of Long-term Risks in the Field of Provision of Nuclear and Radiation Safety, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая str., Moscow, 115191), e-mail: uss@ibrae.ac.ru.

Для цитирования

Линге И. И., Уткин С. С. Глубинное захоронение радиоактивных отходов в контексте радиоэквивалентного подхода // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2023. № 2 (108). С. 42–56. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.108.2.003.

For citation

Linge I. I., Utkin S. S. Deep disposal of radioactive waste in the context of the radioequivalent approach. *Nuclear and Radiation Safety Journal*, 2023, No. 2 (108), pp. 42– 56. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.108.2.003.

