

О РАЦИОНАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ОБРАЩЕНИЯ С РАО И ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

И. И. Линге

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 30 марта 2023 г.

Рассмотрены вопросы разделения систем обеспечения радиационной безопасности и обращения с радиоактивными отходами. Отмечена необходимость рационализации нормативных и методических документов, регламентирующих отнесение отходов к радиоактивным, в части перечней радионуклидов и численных значений; отнесения РАО к особым, определения периода потенциальной опасности, стратегий вывода из эксплуатации, ориентации на приоритетные изотопы. Показана безальтернативность глубинного захоронения РАО для всех вариантов переработки отработавшего ядерного топлива.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, радиационная безопасность, отработавшее ядерное топливо, вывод из эксплуатации, перечни радионуклидов, переработка топлива, захоронение РАО.

Целью статьи является рассмотрение отдельных аспектов функционирования систем обращения с радиоактивными отходами (РАО) и обеспечения радиационной безопасности (РБ), которые, по мнению автора, отличаются иррациональностью реализуемых практик. Многие из них уже многократно фиксировались, а некоторые отмечаются впервые, поэтому размышления о рационализации, как о более разумной организации деятельности, представляются вполне актуальными.

Рамки рассмотрения этих задач задает Объединенная конвенция [1], номинируемая МАГАТЭ как единственный юридически обязательный международно-правовой документ, посвященный вопросам безопасности обращения с отработавшим топливом и РАО на глобальном уровне. В ней, помимо собственно обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и РАО, упомянуты также сбросы и выбросы

радиоактивных веществ, вывод из эксплуатации (ВЭ), аварийная готовность и одобренные на мировом уровне нормы в области радиационной защиты.

Как правило, причины иррациональности реализуемых практик кроются не в технических ошибках обоснования соответствующих регламентаций, а в более сложных совокупностях факторов, связанных с особенностями восприятия радиационных рисков, недостаточно четком понимании принципов и современной стоимости мер по радиационной защите, фрагментарном восприятии рекомендаций международных организаций, непоследовательности в осуществлении дифференцированного и системного подхода к регулированию вопросов безопасности использования атомной энергии, обращения с РАО и обеспечения РБ. В этой связи мы не ставим задачу полноценного определения данных причин, а лишь обозначаем

проблему и указываем на способ ее решения. Для рассмотрения выберем несколько групп вопросов: восприятие радиационных рисков и затраты на обеспечение РБ; перечни радионуклидов для обеспечения РБ и обращения с РАО; критериальные значения для отнесения отходов к радиоактивным; классификация РАО как особых; период потенциальной опасности; приоритетные радионуклиды, фракционирование и глубинное захоронение РАО; вывод из эксплуатации (ВЭ).

Восприятие радиационных рисков и затраты на обеспечение РБ

Особенности общественного восприятия радиационных рисков играют решающую роль в принятии обществом очень высокой стоимости затрат на обеспечение РБ и зачастую инициируют их дальнейший рост без адекватного сопоставления рисков различной природы. По-видимому, понятно и не требует развернутого объяснения утверждение о том, что потенциальная опасность таких объектов, как «действующий энергоблок АЭС, хранилища отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) или РАО», на порядок снижается. Вопреки этому, восприятие населения и активной части антиядерной общестственности является прямо противоположным. Его наиболее емко выразил В. В. Жириновский при обсуждении законопроекта по РАО на заседании фракции ЛДПР, чья завершающая фраза была примерно следующей: «РАО — это страшно, народ боится РАО. Мы за народ и против РАО. Фракция не будет поддерживать законопроект». Интересен также и тот факт, что неуверенность в возможности безопасного захоронения РАО встречается и в документах по стратегии развития атомной энергетики России [2], где указывается на сомнения относительно надежности долговременных прогнозов на сотни тысяч и миллионы лет. Не будем детально останавливаться на технологиях подобных обоснований, которые обстоятельно изложены в работе [3] и, по нашему убеждению, соответствуют самым лучшим практикам рассмотрения и предупреждения долгосрочных рисков различной природы, включая уже реализующиеся, связанные с химически вредными веществами и вирусными инфекциями, а также долгосрочными рисками, в том числе в связи с глобальным изменением климата. В части восприятия рисков общественность выделяет как особо значимые риски, связанные с использованием атомной энергии. На практике ситуация совсем иная. Современная система обеспечения РБ с высокой надежностью гарантирует защиту не только населения,

но и профессиональных работников [4]. В это же время основными источниками облучения населения повсеместно является естественный фон, который в отдельных регионах дает многократно более высокие дозы облучения, например от воздействия радона, образующегося от природных радиоактивных изотопов, хотя в данном случае следует отметить наличие общей тенденции к уменьшению этой компоненты за счет повышения этажности и улучшения качества сооружения жилых зданий. В отношении медицинского облучения ситуация принципиально иная — его интенсивность возрастает прямо пропорционально росту применения высокотехнологичных методов диагностики и лечения с неочевидными перспективами увеличения рисков для здоровья. Приведем один характерный пример. Суммарные дозы облучения, получаемые человеком, проживающим в течение всей жизни вблизи АЭС, лежат в диапазоне 0,5–0,7 мЗв, а доза облучения от одной диагностической процедуры компьютерной томографии, в зависимости от исследуемой области, составляет 0,3–10 мЗв.

Риски различной природы сопровождают нас повсеместно, и в большинстве случаев технологические решения, будь то строительство или применение новых лечебных методик, основываются на каких-то допущениях о вероятности негативных последствий. При этом органы регулирования безопасности во всех сферах деятельности соглашаются с допустимостью определенных негативных последствий, называя подобные риски приемлемыми или социально приемлемыми.

В концепции системы радиационной безопасности пределы доз определены исходя из значений индивидуального пожизненного риска: 10^{-3} — для персонала и $5 \cdot 10^{-5}$ — для населения. В качестве ущерба в диапазоне малых доз устанавливается соответствие потери 1 чел.-года жизни населения коллективной эффективной дозе в 1 чел.-Зв и величине соответствующего экономического ущерба, устанавливаемого на уровне не ниже годового душевого дохода [5]. Последний, по данным статистики за 2013–2019 годы, вырос и достиг к 2019 году 35 тыс. рублей. Реальные затраты в атомной отрасли на обеспечение РБ на много порядков выше. Для АЭС, например, к ним следует отнести часть стоимости ее сооружения, соотносимую с затратами на системы безопасности (порядка 20%), эксплуатацию систем обеспечения РБ, мониторинга радиационной обстановки и аварийного реагирования и до 50% от стоимости вывода ее из эксплуатации. Очень приблизительно,

за жизненный цикл энергоблока эти затраты могут составить не менее 30 млрд рублей. При этом реализация мер по РБ позволяет удерживать суммарные дозы облучения за весь период эксплуатации АЭС, который составляет около 100 лет, в пределах 100 чел.-Зв. Подобная оценка денежного эквивалента в 1 чел.-Зв величиной порядка 0,3 млрд руб. отличается от ранее приведенных затрат в 10 тыс. раз. Столь высокая цена не должна удивлять — именно в этом диапазоне лежат удельные (на предотвращенную дозу) стоимости работ по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии и захоронению РАО, и при их рациональной организации они могут быть финансово обеспечены именно за счет атомной генерации [6].

Устранение коллизий общественного восприятия радиационных рисков представляется очень сложной задачей, для решения которой необходима устойчивая политика государства и многие иные меры. Одним из важных условий осуществления этого процесса является рациональность регулирования и практической деятельности в области обеспечения РБ, в том числе при обращении с ОЯТ, РАО и выводе объекта атомной энергетики из эксплуатации, а именно: строгое следование принципам оптимизации и дифференцированного подхода, то есть соответствия мер предупреждения и защиты уровням рисков. К сожалению, сегодня можно утверждать, что существующие требования в сфере обеспечения РБ и обращения с ОЯТ и РАО установлены без учета реалистичной оценки потенциального вредного воздействия и фактической стоимости поддержания радиационной безопасности при использовании атомной энергии. Что касается обращения с РАО, в той или иной форме эти вопросы уже рассматривались в работах [7], [8], [9]. Однако изменения реализуются очень медленно, а текущее состояние вопроса становится все более обременительным для практической деятельности по захоронению РАО, а следовательно, и обеспечению РБ. Во многом это связано с неудовлетворительной структуризацией правовых основ регулирования радиационной безопасности и различных видов деятельности по использованию атомной энергии.

Обеспечение РБ и обращение с РАО: перечни радионуклидов

РБ населения как состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения важно для: персонала (1) и населения (2) при использовании атомной

энергии, в том числе при авариях; медицинских работников, пациентов и помогающих им при лечебных процедурах (3); населения и работников добывающих предприятий в связи с облучением от радона (4); отдельных профессиональных категорий специалистов — космонавтов и летного состава авиации (5) и др.; для охраны окружающей среды (6). Для каждой из групп населения или объектов окружающей среды характерны свои механизмы радиационного воздействия и защиты от них. Например, для космонавтов и летного персонала арсенал мер защиты исчерпывается в основном учетом накопленных доз и ограничением времени в полетах. В отношении населения, с учетом использования АЭС, он гораздо шире и включает требования к размещению и конструкции ядерной установки, а также всех важных для безопасности систем, в том числе регламентацию сбросов и выбросов радиоактивных веществ достаточно компактного перечня. На следующем рубеже защиты — система аварийного реагирования и средства профилактики от воздействия отдельных радионуклидов, таких, например, как радиойод.

Основным способом обеспечения РБ является установление допустимых пределов радиационного воздействия и контроль за их соблюдением. В области использования атомной энергии безопасность реализуется в форме многочисленных требований к объекту и видам деятельности, в том числе федеральных норм и правил, процедур обоснования безопасности и лицензирования. Именно эти, направленные в конечном счете на защиту здоровья и жизни людей и охрану окружающей среды, задачи решает закон об использовании атомной энергии [10]. Обращение с РАО является одним из видов деятельности в области использования атомной энергии. Соответствующий закон предусматривает создание и функционирование Единой государственной системы обращения с РАО для обеспечения безопасного и экономически эффективного обращения с ними, а также их утилизацию. Именно захоронение РАО, в том числе образующихся от переработки ОЯТ и при ВЭ объектов использования атомной энергии, должно обеспечить РБ на долгосрочный период.

Первым шагом на пути рационализации является идентификация источников облучения в форме перечня радионуклидов, наиболее опасных для человека. Задача определения такого общего перечня для обеспечения РБ в основном успешно решена — из более чем трех тысяч наименований радионуклидов отобраны наиболее значимые. В настоящее время Основные

стандарты безопасности включают коэффициенты, позволяющие оценить дозовые нагрузки на персонал и население от 736 радионуклидов [11]. Действующие российские НРБ-99/2009 [12] содержат нормирующие показатели радиационной безопасности персонала для 728 позиций, а если учитывать и формы, и соединения отдельных радионуклидов, то список расширится до 1401 наименования. В отношении населения в НРБ-99/2009 перечень нормируемых веществ, охватывающий все возможные соединения радионуклидов, которые потенциально могут поступить в организм с воздухом, пищей и водой, состоит из 352 наименований. В роли граничных значений, определяющих необходимость соблюдения соответствующих правил, выступают так называемые минимально значимые удельные активности (МЗУА) и минимально значимые активности на рабочем месте (МЗА), представленные в соответствующих приложениях к НРБ.

При решении вопросов отнесения отходов к РАО за основу был взят тот же перечень из НРБ [13] с небольшим сокращением и добавлением инертных радиоактивных газов (15 наименований). Произошедшие в 2022 году рациональные изменения этого законодательного нормативного акта [14] практически не коснулись перечня радионуклидов (добавлено два, а также более десятка граничных значений — заполнены пробелы и изменены показатели для жидких радиоактивных отходов по изотопам). Вопрос о том, насколько оправдан перечень, по нашему мнению, имеет отрицательный ответ. В работе [15] были представлены данные о значимости радионуклидов в практической деятельности по использованию атомной энергии и проведению мероприятий по радиационной защите для нескольких направлений деятельности (обращение с РАО, регулирование выбросов и сбросов). В качестве значимых при обращении с РАО был определен 31 радионуклид (^3H , ^{14}C , ^{22}Na , ^{36}Cl , ^{59}Ni , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{192}Ir , ^{226}Ra , ^{230}Th , ^{232}Th , ^{235}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am , ^{241}Pu , ^{242}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am , ^{243}Cm); для регулирования и контроля сбросов — 23 радионуклида (^3H , ^{32}P , ^{54}Mn , ^{65}Zn , ^{90}Sr , ^{105}Ru , ^{106}Ru , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{125}Sb , ^{129}I , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}Ru , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am , ^{241}Pu); выбросов — 35 радионуклидов (^3H , ^{14}C , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{41}Ar , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{91}Y , ^{95}Nb , ^{95}Zr , ^{105}Ru , ^{106}Ru , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{125}Sb , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}Xe , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{222}Rn , ^{238}Pu , ^{238}U , ^{239}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am , ^{241}Pu).

Рассмотрим более детально основания для подобного или более скромного, но серьезного сокращения сегодняшнего перечня радионуклидов.

Во-первых, это — назначение системы обращения с РАО, преследующей цель их захоронения и обеспечения РБ будущих поколений. Понятно, в ней не место отходам, загрязненным только очень короткоживущими радионуклидами, период потенциальной опасности которых меньше срока реализации основных стадий обращения (сбор, учет, промежуточное и временное хранение, кондиционирование, передача на захоронение и захоронение). Этот диапазон в самых оптимистичных предположениях составляет месяцы, а в более реалистичных, предполагающих полное функционирование системы захоронения РАО, — год и более. Для сравнения: в сегодняшнем перечне четверть радионуклидов с периодом полураспада менее суток, и их активность всего за месяц снизится на 6 порядков и более. Еще половина радионуклидов — с периодом полураспада до года, но у трех четвертей из них он составляет менее 50 суток. В отношении подобных короткоживущих изотопов трудноисполнимы процедуры учета и контроля. Целесообразно исключить их из сферы действия ЕГС РАО. Пострадает ли безопасность? Нет, так как содержащие их материалы останутся радиоактивными веществами, в отношении которых должны выполняться все требования РБ. В эту группу входят и большинство радионуклидов, используемых в радиотерапии, в том числе не включенных в утвержденный перечень. Все они существенно осложняют деятельность медицинских учреждений при их отнесении к категории РАО [16], а не радиоактивных веществ.

В ЕГС РАО также не место материалам и веществам, в отношении которых не могут быть проведены или крайне трудно реализуемы процедуры изоляции. Среди них: уже упомянутые инертные газы, в силу того, что перечень технологических решений по их удержанию очень ограничен и используется для снижения выбрасываемой активности очень короткоживущих радионуклидов; продукты жизнедеятельности человека, образующиеся после применения процедур радиотерапии и ядерной медицины; малые количества отходов с низкими значениями активности, которые сопровождают значительную часть научных исследований; газообразные отходы, поскольку в их отношении существенно сложнее реализовывать функцию удержания. Если подобным радикальным образом поступить с рядом радионуклидов, то мы придем к компактному перечню, уже приведенному в работе [15], или близкому к нему. Однако даже короткий список радионуклидов не будет до конца рациональным, поскольку он должен быть сопровожден многочисленными

оговорками, связанными с исключительными ситуациями, в отношении которых необходимо создать специальные условия или осуществлять ручное управление со стороны органа регулирования безопасности. Собственно, все международные документы пронизаны подобными оговорками. Например, в руководстве № RS-G-1.7 [17] утверждается, что в отношении концентраций активности, которые превышают соответствующие значения удельных активностей техногенных радионуклидов (УАНИ) в несколько раз (иногда до десяти), в соответствии с принципом оптимизации может быть принят дифференцированный подход, при котором регулирующий орган может решить (когда это позволяет национальная регламентирующая основа), что оптимальный вариант сводится к неприменению жестких требований к юридическому лицу, ответственному за материал. Другой пример — пункты I-10 и I-11 Приложения I к документу GSR Part 3 [18]. В I-13 дана отсылка на два вышеупомянутых пункта в следующем контексте: «Освобождение от контроля может предоставляться регулирующим органом в случае конкретных ситуаций на основе критериев, изложенных в пунктах I-10 и I-11, с учетом физической или химической формы радиоактивного материала и его использования или средств, применяемых для его захоронения» (там же в сноске отдельным предложением указано, что, например, конкретные уровни освобождения могут устанавливаться для металлов, обломков зданий и отходов, утилизируемых на специальных полигонах).

Подобные же вопросы о рациональности могут быть адресованы к перечню загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды [19]. Во время межведомственного обсуждения этого проекта представителями Госкорпорации «Росатом» и ИБРАЭ РАН приводилось немало доводов относительно целесообразности и необходимости его сокращения. Только в этом случае был бы возможен реальный контроль, а также учитывались бы практические возможности контролируемых ведомств, их служб и зарубежный опыт. Тем не менее в части контроля атмосферного воздуха в перечень было включено 94 радионуклида, в области водных объектов — 80. Только в отношении почв был почти реализован прагматичный подход, учитывающий период полураспада, актуальность и приборные возможности контроля (в перечень вошли только 4 радионуклида — ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{90}Sr и ^{137}Cs), потому что для надзора и регулирования достаточно фиксации

одного изотопа плутония или их суммы, что, как правило, и делается на практике. Более детально эти вопросы рассмотрены в работе, написанной по итогам дискуссий [20].

Численные значения активности для включения механизмов системы обеспечения РБ и ЕГС РАО

Для целей обеспечения РБ человека (категории 1 и 2 для условий нормальной эксплуатации) данная тема в определенной мере разрешена. В ее рамках сформулированы определения и области применения следующих величин:

- годовое поступление радионуклидов через органы дыхания и их среднегодовая объемная активность во вдыхаемом воздухе для персонала (приложение 1 к НРБ) и населения (приложение 2 к НРБ);
- значение уровней вмешательства (УВ, Бк/кг) по содержанию отдельных радионуклидов в питьевой воде — приложение 2а к НРБ;
- минимально значимая удельная активность (МЗУА) и активность радионуклидов в помещении или на рабочем месте (МЗА) — приложение 4 к НРБ;
- УАНИ, при которых допускается неограниченное использование твердых материалов — приложение 3 к ОСПОРБ [21];
- допустимые удельные активности основных долгоживущих радионуклидов для неограниченного использования металлов и изделий на их основе — приложение 4 к ОСПОРБ.

Документами санитарного нормирования также дублируются предельные значения удельной и объемной активностей радионуклидов (ПЗУА) в отходах для отнесения их к радиоактивным — приложение 5 к ОСПОРБ, изначально они были определены нормативным актом Правительства России.

Рассмотрим численные значения этих величин на примере нескольких радионуклидов (табл. 1).

Показатели МЗУА, МЗА, УАНИ для твердых материалов и металла получены на основе анализа различных сценариев облучения, в том числе самых неблагоприятных. Как результат — существенные отличия в значениях, достигающие 10 тыс. раз, и порядковое определение (одна значащая цифра в количественных значениях). Величины УВ, $\text{DOA}_{\text{перс}}$ и $\text{DOA}_{\text{нас}}$ рассчитаны на основе дозовых коэффициентов и характеристик метаболизма для различных соединений химических элементов, а в случае населения — еще и с учетом критических групп. Именно это и различия во времени экспозиции определяют широкие диапазоны значений и тот факт, что почти всегда $\text{DOA}_{\text{нас}}$ меньше $\text{DOA}_{\text{перс}}$. Эти показатели

Таблица 1. Численные значения, регламентированные НРБ и ОСПОРБ для радионуклидов, значимых при обращении с РАО

Нуклид	МЗУА, Бк/г	УАНИ, Бк/г	ДУА в металле Бк/г	ПЗУА Бк/г	УВ, Бк/г	ДОО _{перс} , Бк/м ³	ДОО _{нас} , Бк/м ³
¹⁴ C	10 000	1	–	10 000	0,24	14–10 000	55
³⁶ Cl	10 000	1	–	10 000	150	1 200–24 000	16
⁶⁰ Co	10	0,1	0,3	10	0,04	280–830	11
⁵⁹ Ni	10 000	100	–	10 000	2,2	9 600–44 000	850
⁶³ Ni	100 000	100	–	100 000	910	4 000–18 000	260
¹²⁹ I	100	0,01	–	100	1,3	83–220	2,9
¹³⁷ Cs	10	0,1	1,0	10	0,011	1 700	27
²³⁸ U	10	–	4,0	10	0,003	1,1–2 400	0,04
²³⁹ Pu	1	0,1	–	1	0,00055	0,53–32 000	0,0025
²⁴³ Am	1	0,1	–	1	0,00069	21	0,003

дают однозначное представление об опасности радионуклидов именно для особенностей их назначения: любые условия размещения твердого материала (УАНИ) или только на рабочем месте (МЗУА), нахождение радиоактивных веществ во вдыхаемом воздухе (ДОО) или в питьевой воде (УВ) — и не более. Любые рассуждения об опасности какого-либо радионуклида за рамками этих регламентных ситуаций представляются мало уместными, поскольку на пути радиационного воздействия на человека находятся соответствующие барьеры безопасности. Оценить эффективность действующей системы на практике можно на основе фактических данных, которые убедительно и на разных стадиях экспертной оценки показывают, что РБ при использовании атомной энергии обеспечивается на принципиально более высоком уровне [22], чем в отношении иных вредных химических веществ.

Отнесение твердых отходов к РАО на протяжении длительного периода осуществлялось на основе значений МЗУА без какой-либо сепарации по периоду полураспада. В ходе обсуждения первой версии [13] были предприняты попытки их снижения до значений УАНИ, но они не были поддержаны. В итоге в Постановлении Правительства № 1069 значения ПЗУА были приняты как соответствующие значениям МЗУА. При подготовке новой версии этого документа также прилагались усилия по переходу на УАНИ, но они были доказательно отклонены [23]. С учетом объема накопленных и образующихся РАО, РАО от вывода из эксплуатации, а также диапазонов рисков, связанных с отходами с повышенным содержанием техногенных радионуклидов, можно утверждать, что никаких предпосылок для снижения значений ПЗУА нет.

Еще раз обратим внимание на необходимость структуризации регулирования. На протяжении многих десятилетий обеспечение безопасности при обращении с РАО осуществлялось исключительно с гигиенических позиций, при отсутствии обязательных требований по захоронению и, как следствие этого, без рассмотрения практической необходимости некоторых из устанавливаемых требований. Соответствующие санитарные документы (СПОРО и др.) были привычны и понятны для работников отрасли. Появление закона об обращении с РАО и формирование ЕГС РАО во многом изменило ситуацию — основные требования к ним, в том числе их подготовке к захоронению и захоронению, стали определяться федеральными нормами и правилами. Тем не менее до настоящего времени критерии отнесения отходов к РАО присутствуют в санитарных документах, иногда в не совсем корректной форме. Например, в ОСПОРБ не содержится указаний на то, что приложение 5 соответствует действовавшему документу Правительства России [13]. Не будем повторять в полном объеме замечания, изложенные в работе [9]. Отметим только, что все поднятые в статье вопросы — повторное использование радиоактивных материалов; установление уровней минимально значимых удельных активностей и дозовых коэффициентов для отдельных радионуклидов; выдержка короткоживущих РАО, критерии реабилитации радиационно загрязненных территорий и дезактивации строительных сооружений; нормирование допустимого радиационного воздействия на население от пункта захоронения радиоактивных отходов — актуальны, а последний принципиально важен для создания системы захоронения отходов. Ограничение дозовой нагрузки на население при захоронении

РАО в 10 мкЗв, появившееся в санитарных документах несколько десятилетий назад, почти не имело практического смысла, поскольку в 99,99 % случаев этот критерий соблюдался, в том числе даже при плачевном состоянии объектов их хранения (захоронения). Совсем иная ситуация складывается в случае рассмотрения сценариев эволюции ПЗРО на долгосрочном периоде и при анализе и оценке различного рода нарушений, в том числе таких как вмешательства в систему захоронения, что принято в международной практике. Технические решения, ограничивающие дозу величиной 10 мкЗв, в данном случае очень и очень дороги либо невозможны. Мировой опыт демонстрирует примеры установления подобного ограничения на уровнях 0,3–1 мЗв, то есть 30–100 раз выше. При этом безопасность будущих поколений будет обеспечиваться на уровне принятых в настоящее время значений. С учетом изложенных доводов представляется важным добиться ситуации, в которой будут четко сбалансированы требования систем обеспечения РБ человека и ЕГС РАО. Как это лучше сделать? Система обеспечения РБ человека должна продолжить свое функционирование и быть в подавляющей части ситуаций инвариантной относительно того, с чем имеет дело человек — с РВ или РАО, с объектом использования атомной энергии или ПЗРО.

Важен также отказ от отождествления отнесения материалов к сфере ЕГС РАО и исключения из нее. Именно оно сопровождало недавнюю дискуссию о нижней границе для ТРО. Большая часть аргументов сторонников снижения уровней доз при отнесении отходов к РАО адресовалась к документам по освобождению от регулирующего контроля. Рациональной представляется иная ситуация, когда данные уровни для очень короткоживущих РАО много выше этого показателя для их исключения из сферы ЕГС РАО, которая обеспечивает либо их выдержку для снижения уровней активности при временном хранении, либо захоронение. Причем такая разница для критериев отнесения отходов, содержащих очень короткоживущие радионуклиды, к РАО может нарастать с уменьшением периода их полураспада, если такие изотопы останутся в списке.

Вопрос уровня отнесения жидких отходов к РАО имеет более сложную историю, в которой в последние десять лет наблюдалось максимальное количество недоразумений, связанных с предложениями по его повышению со значений 10 УВ до уровня МЗУА, которое было реализовано в первой версии ОСПОРБ-2009. Негативные последствия подобного подхода для практики

обращения с ЖРО и решения проблем наследия детально рассмотрены в [24]. Основная причина этих положений санитарного документа лежала в его оторванности от реальных технологий обращения с жидкими радиоактивными средами, которые зачастую преждевременно называют ЖРО. Если говорить о действующих численных значениях, то представляется обоснованным их сохранение на достаточно долгий период времени до полного перехода на технологии отверждения всех ЖРО.

Критерии отнесения газообразных отходов к радиоактивным с уровня, соответствующего $ДОА_{нас}$, не имеют никаких рациональных объяснений и не реализуемы на практике. Такие отходы нельзя проконтролировать. Наверное, имеет смысл зафиксировать возможность отнесения к газообразным РАО изолированных объемов газов с такими высокими значениями объемной активности, которые могли бы быть опасными в случае разгерметизации и 1000-кратного или большего разбавления.

Отдельным и важным вопросом являются требования к точности измерений. В этом смысле новая редакция [13] не дала сколь-либо положительных изменений. Например, дополнение п. 1 относительно не учета радионуклидов, если сумма отношений удельных (для твердых и жидких отходов) или объемных (для газообразных РАО) активностей радионуклидов в отходах к их предельным значениям не превышает 0,01, выглядит достаточно абсурдным без указания на то, что не учитываются очень короткоживущие радионуклиды. Формулировка «не превышает 0,01» воспроизводится и в иных документах, в частности в ГОСТе [25]. При наличии очень короткоживущих радионуклидов, вследствие постоянного изменения активности, проведение подобных оценок нереализуемо из-за продолжительности выполнения измерений (часы, десятки часов). В отношении газообразных отходов, содержащих радиоактивные вещества, для которых установлены значения на уровне $ДОА_{нас}$, оперативное проведение измерений и на уровнях в десятки и сотни раз больших, чем $ДОА_{нас}$, проблематично, а на уровне $ДОА_{нас}$ — просто невозможно для объемов газа даже в сотни кубометров.

Отнесение РАО к особым

Фундаментальные ограничения, связанные с происхождением и местонахождением РАО, устранены осенью 2022 года [14]. Однако в полном объеме ситуация далека от разрешения. Это обусловлено тем, что значимую роль в отнесении

РАО к особым играют эксплуатирующие организации, которые с завидной легкостью, без проведения соответствующих критериальных оценок доз, рисков и затрат, принимают решение о классификации накопленных РАО как удаляемых. При этом за рамками рассмотрения остается то обстоятельство, что ответственность и расходы на обеспечение безопасности таких объектов ложится на них, а реалистичные сроки утилизации исчисляются многими десятилетиями. Рациональный подход в данном случае представляется следующим: на эксплуатирующую организацию возлагается ответственность за качественную оценку критериальных показателей, а решение об отнесении остается исключительно на органе управления в области обращения с РАО, с полным пониманием объема дополнительных расходов, связанных с их удалением.

О периоде потенциальной опасности

Законом определено, что период потенциальной опасности РАО — это срок, в течение которого их уровни радиоактивности снижаются до показателей, при которых не требуется радиационный контроль. Упрощенное понимание этого промежутка времени как периода, за который активность всех радионуклидов снизится до значений УАНИ, приводит к некоторым коллизиям для долгоживущих радионуклидов, поскольку речь идет о бесконечности. Между тем в законе есть и иное понятие — периодический радиационный контроль, который начинается после закрытия пункта захоронения. В отношении продолжительности этого срока и его завершения в законе нет никаких указаний, так же как и по его взаимоувязыванию с радиоактивным распадом. Очевидно, что это — тема гипотетических предположений о далеком будущем. Таким образом, целесообразно четкое разграничение понятия периода потенциальной опасности для РАО, которые могут быть возвращены в гражданский оборот (это УАНИ или более высокие уровни для отдельных форм типа металллома и др.), и для размещенных в ПЗРО. В последнем случае ни о каком-либо вторичном использовании материалов в гражданском обороте речи не должно быть. Периодический радиационный контроль также должен планироваться не на бесконечность, а на какие-то исторически обозримые сроки, например 300 лет, с возможностью их продления. Интересен и не раскрыт вопрос о содержании периодического радиационного контроля. По моему мнению, он не должен включать собственно измерений

активности объектов окружающей среды, а необходимо, чтобы он был ориентирован на контроль стабильности (в многолетнем цикле) системы барьеров безопасности захоронения, как природных, так и инженерных, и геометрических параметров наземной части объекта.

О приоритетных радионуклидах, фракционировании и глубинном захоронении

Большинство требований относительно определения радионуклидного состава РАО, в том числе для целей паспортизации и определения соответствия критериям приемлемости, не содержат указаний на конкретные радионуклиды. Между тем для большинства технологических переделов объектов атомной энергетики и ядерного топливного цикла могут быть определены ключевые из них [26], [27]. Очевидно, что акцент должен делаться на них и радионуклидах, важных для долгосрочной безопасности, в том числе таких, как долгоживущие продукты деления и активации с высокой миграционной способностью (^{129}I , ^{79}Se , ^{126}Sn). Для отдельных видов РАО, например графита, наиболее актуальны ^{14}C , ^{136}C . В ряде случаев, в том числе при переработке ОЯТ, возникает вопрос о тепловыделении отходов, по которому есть принципиальное ограничение для захоронения — это, прежде всего, цезиево-стронциевая фракция. Заметим, что среди них нет так называемых минорных актинидов, которые в ряде работ [28] указываются как наиболее опасные и в отношении которых предлагаются сложные технологии фракционирования и трансмутации. Причина отсутствия актинидов проста: для них при низких значениях окислительно-восстановительного потенциала в условиях подземного пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) характерны высокие коэффициенты межфазового распределения, а также формирование малорастворимых твердых минеральных фаз, что не способствует переносу далее чем на первые десятки и сотни метров от места захоронения. Редким исключением является площадка объекта Якка-Маунтин, расположенного выше уровня грунтовых вод. В таких аэробных условиях уран будет обладать высоким потенциалом переноса в виде карбонатных комплексов уранила.

Тем не менее в последние годы наблюдается ажиотажное предложение новых технологий переработки ОЯТ, фракционирования отходов и трансмутации миноров. Причем во всех предложениях по трансмутации единственным выигрышем указывается устранение уже упоминавшихся трудностей с обоснованием

долгосрочной безопасности геологического захоронения и наступление через какое-то время радиационного равновесия между активностью или потенциальной опасностью извлеченного урана и РАО без минорных актиноидов. Более того, в качестве требования к технологиям замкнутого ядерного топливного цикла декларируется радиационно-миграционный и онкологический баланс (риск развития раковых заболеваний) между добываемым топливным сырьем и захораниваемыми радиоактивными отходами [29]. В этой связи отметим, что радиологическая метафора об эквивалентности имеет критикуемое обоснование [30] и не является принципом. Вдобавок уже давно фактические коллективные дозы работников и населения от добычи урана превышают дозы от всех остальных переделов ядерного топливного цикла. Между тем детальные и комплексные оценки стоимости подобной альтернативы безтрансмутационному захоронению РАО до последнего времени не предъявлялись, и только в начале 2023 года на одном из семинаров А. М. Гулевиным впервые была озвучена стоимость миссии по минорам. Затраты на выжигание 1 т Am были оценены в 0,16–0,75 млрд \$. Им же было дано рациональное предложение по разделению понятий дожигания ядерных материалов, в том числе миноров, и их выжигания (трансмутации) для целей обеспечения безопасности будущих поколений. Если говорить о рационализации отношения к переработке ОЯТ, то, по-видимому, следует рассматривать три базовых варианта. Первый — это планирующееся во многих странах прямое захоронение ОЯТ, в пользу которого говорят минимизация объемов захораниваемых отходов и радиационных нагрузок на персонал и население вследствие отказа от переработки и низкое качество отдельных видов ОЯТ. Принятая в России ориентация на его переработку затрудняет детальное рассмотрение возможности захоронения ОЯТ РБМК. Второй — это его переработка с целью выделения делящихся компонентов и их экономически обоснованного повторного или многократного использования. К этому варианту относятся и все предложения по дожиганию и выжиганию миноров. Для него характерно уменьшение объемов РАО, подлежащих глубинному захоронению. Третий — промежуточные решения, если на них найдется спрос за рубежом. Это может быть выделение короткоживущих фракций и реализация различных компромиссных решений с зарубежными партнерами с целью исключения необходимости создания геологических объектов захоронения отходов в этих странах. Остальная часть РАО

при этом может быть переработана и захоронена в ПГЗРО. В основе выбора варианта должны быть глубокая научно-техническая проработка и экономика полного цикла, поскольку с точки зрения обеспечения РБ населения ни один из вариантов не имеет выраженных преимуществ. В наиболее общей форме этот вывод был сделан в рамках исследования Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) еще двадцать лет тому назад [31]. Для всех вариантов остается актуальной задача глубинного захоронения РАО. Ведущиеся в настоящее время работы и исследования [32] по созданию подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» в районе Железногорска в значимой своей части актуальны для любых видов обращения с ОЯТ.

Вывод из эксплуатации

В течение 10–20 лет объем РАО, образующихся при выводе из эксплуатации, может стать сопоставимым или превысит объемы эксплуатационных РАО, поэтому вопрос о рационализации этого процесса является ключевым. Сегодня традиционная организация ВЭ предполагает длительную выдержку и начало работ с помещений и оборудования с низкими уровнями загрязнения, а также нуждается в осмыслении. В ее основе — ожидание улучшения обстановки за счет радиоактивного распада, и, как правило, оно оказывается неоправданным, поскольку через 10–15 лет после выдержки это происходит очень медленно. Целесообразно начинать работы с удаления наиболее активных компонент конструкций и оборудования с помощью дистанционно управляемых механизмов. Соответствующий опыт накоплен и описан, например, в публикациях по реакторным установкам РНЦ КИ [33]. Заслуживает и более детального рассмотрения вывод из эксплуатации по варианту «зеленая лужайка». При всей своей «экологической привлекательности» он не всегда оправдан. Рационально ограничить его применение только теми случаями, когда все объекты промышленной площадки планируются к ликвидации в исторически обозримые сроки.

Заключение

Отмеченные в статье ситуации и предложения имеют различные стоимости и, конечно, ограничения в реализации, а в ряде случаев заслуживают и более кропотливого, многостороннего обсуждения. Некоторые из них могут быть разрешены с помощью легких корректировок

нормативных и методических документов, а также за счет практического изменения подходов и применяемых технологий, какие-то требуют более сложных комплексов мер, в том числе внесения изменений в нормативно-правовые и концептуальные документы. Тем не менее во всех случаях задачи выхода на рациональные практики требуют глубокого и всестороннего обоснования безопасности и доказательного объяснения общественности рациональности изменений.

Литература

1. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами от 5 сентября 1997 г.
2. Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года / Одобрено решением Президиума НТС ГК «Росатом» 26 декабря 2018 г. — М., 62 с.
3. 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 ИБРАЭ № 2019-03. — М. : ИБРАЭ РАН, 2019. 40 с.
4. Линге И. И., Уткин С. С. Радиационные и экологические аспекты атомной энергетики будущего // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 5. С. 113—121. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-113-121.
5. Романович И. К., Балонов М. И., Барковский А. Н. и др. Комментарий к Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009) / Под ред. академика РАМН Г. Г. Онищенко. — М., 2012. 216 с.
6. Абалкина И. Л., Агапов А. М., Большов Л. А., Ерма А. А., Казаков С. В., Линге И. И., Малышев А. Б. Анализ зарубежного опыта финансирования работ по долгосрочному обращению с ОЯТ, РАО и выводу ядерно и радиационно опасных объектов из эксплуатации: Препринт ИБРАЭ № 2006-10. — М. : ИБРАЭ РАН, 2006. 29 с.
7. Дорофеев А. Н., Линге И. И., Самойлов А. А., Шарафутдинов Р. Б. К вопросу финансово-экономического обоснования повышения эффективности нормативной базы ЕГС РАО // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 24—33.
8. Линге И. И., Самойлов А. А. Возможности оптимизации нормативного регулирования единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами // Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 4. С. 12—20.
9. Самойлов А. А., Стрижова С. В., Блохин П. А., Александрова Т. А. Актуальные потребности развития санитарно-гигиенического нормирования в контексте деятельности по совершенствованию системы обращения с РАО // Вопросы радиационной безопасности. 2021. № 2. С. 3—13.
10. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии».
11. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. STI/PUB/1578. — Vienna, International Atomic Energy Agency, 2014.
12. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. — М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
13. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 ноября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения РАО к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых РАО».
14. Бочкарёв В. В., Дорофеев А. Н., Курьиндин А. В., Линге И. И., Понизов А. В., Самойлов А. А., Уткин С. С., Шаповалов А. С., Шарафутдинов Р. Б. К вопросу внесения изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» // Ядерная и радиационная безопасность. 2022. № 4 (106). С. 59—72. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.106.4.005.
15. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Развитие системы обращения с радиоактивными отходами в России / Под общ. ред. Большова Л. А., Лаверова Н. П., Линге И. И. Т. 2. — Москва, 2013. С. 37—42.
16. Наркевич Б. Я. Актуальные вопросы обращения с радиоактивными отходами в ядерной медицине // Радиоактивные отходы. 2022. № 1 (18). С. 28—37. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-1-28-37.
17. Серия норм по безопасности. № RS-G-1.7 Применение концепций исключения, изъятия и освобождения от контроля. Руководство по безопасности. — Вена, МАГАТЭ, 2006.
18. Серия норм безопасности МАГАТЭ. № GSR Part 3. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. STI/PUB/1578. — Вена, МАГАТЭ, 2015.

19. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 №1316-р (ред. от 10.05.2019) «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды».
20. Линге И. И., Панченко С. В., Горелов М. М. О радиационном контроле радионуклидов для целей государственного регулирования в сфере охраны окружающей среды // АНРИ. 2017. №1 (88). С. 12–19.
21. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). — М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 83 с.
22. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» / Под общ. ред. И. И. Линге и И. И. Крышева. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М., 2021. 555 с.
23. Абрамов А. А., Большой Л. А., Гаврилов П. М., Дорофеев А. Н., Игин И. М., Линге И. И., Мокров Ю. Г., Печкуров А. В., Уткин С. С. Об идеях расширения системы обращения с РАО на промышленные отходы, содержащие техногенные радионуклиды // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 6–13. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-6-13.
24. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Развитие системы обращения с радиоактивными отходами в России / Под общ. ред. Большова Л. А., Лаверова Н. П., Линге И. И. Т. 2. — М., 2013. С. 333–355.
25. ГОСТ Р 59968-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Радиоактивные отходы атомных станций. Определение радиационных характеристик для передачи на захоронение.
26. Варлаков А. П., Сергеечева Я. В., Ивлиев М. В., Варлакова Г. А., Горбунов В. А., Карлин С. В. Применение методологии радионуклидного вектора для определения активности сложнодетектируемых радионуклидов в потоках РАО // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 85–91. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-85-91.
27. Александрова Т. А., Блохин П. А., Самойлов А. А., Курындин А. В. Анализ данных по радионуклидному составу РАО в контексте оценки долговременной безопасности их захоронения // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 44–51.
28. Кащеев В. А., Лозунов М. В., Шадрин А. Ю., Рыкунова А. А., Шмидт О. В. Стратегия фракционирования ВАО от переработки ОЯТ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 6–16. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-6-16.
29. Адамов Е. О., Габараев Б. А., Ганев И. Х., Лопаткин А. В., Муратов В. Г., Орлов В. В. Потенциал развития и возможность достижения состояния радиационной эквивалентности урана и отходов в перспективной ядерной энергетике // Атомная энергия. 2003. № 2 (95). С. 83–87.
30. Кудрявцев Е. Г., Шарфутдинов 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.
31. Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options: A Comparative Study. NEA OECD Report 2000.
32. Новые документы. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114–120.
33. Волкович А. Г., Колядин В. И., Лемус А. В., Павленко В. И., Потапов В. Н., Семенов С. Г., Чесноков А. В., Шиша А. Д. Демонтаж строительных конструкций в зале реактора МР // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 22–29. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-22-29.

Информация об авторе

Линге Игорь Иннокентьевич, доктор технических наук, заместитель директора, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, ул. Большая Тульская, 52), e-mail: linge@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Линге И. И. О рационализации систем обращения с РАО и обеспечения радиационной безопасности // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 21–34. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-21-34.

STREAMLINING RW MANAGEMENT AND RADIATION SAFETY SYSTEMS

Linge I. I.

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

Article received on March 30, 2023

The paper discusses the issues associated with the segregation of the radiation safety and RW management systems. It highlights the need for further upgrading of regulations and methodological provisions establishing the rules for waste categorization as radioactive as it comes to the lists of radionuclides and the numerical values involved; radioactive waste categorization as non-removable waste, identification of the potential hazard periods, selection of decommissioning strategies with the focus placed on the priority radionuclides. The study demonstrates that considering all spent nuclear fuel reprocessing scenarios no alternative can be proposed to the deep radioactive waste disposal option.

Keywords: radioactive waste, radiation safety, spent nuclear fuel, decommissioning, lists of radionuclides, fuel reprocessing, radioactive waste disposal.

References

1. Joint Convention on the Safety of Spent Nuclear Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management of September 5, 1997.
2. *Strategiya razvitiya yadernoi ehnergetiki Rossii do 2050 goda i perspektivy na period do 2100 goda* [Strategy for Nuclear Power Development in Russia until 2050 and the prospects for the period up to the year 2100]. Approved by the Presidium Decision of the Scientific and Technical Council of the State Corporation Rosatom on December 26, 2018. Moscow, 62 p.
3. Abalkina I. L., Bolshov L. A., Kapyrin I. V., Linge I. I., Saveleva E. A., Svitelman V. S., Utkin S. S. *Obosnovaniye dolgovremennoy bezopasnosti zakhroneniya OYAT i RAO na 10 000 i boleye let: metodologiya i sovremennoye sostoyaniye* [Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel Deep Geological Disposal Long-Term Safety Assessment for 10000 Years and Over: Methodology and the Current State]. Preprint IBRAE No. 2019-03. Moscow, IBRAE RAN Publ., 2019. 40 p.
4. Linge I. I., Utkin S. S. *Radiatsionnyye i ekologicheskiye aspekty atomnoy energetiki budushchego* [Radiation and environmental aspects associated with the future nuclear power]. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' — Medical Radiology and Radiation Safety*, 2021, vol. 66, no.5, pp. 113–121. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-113-121.
5. Romanovich I. K., Balonov M. I., Barkovsky A. N. et al. *Kommentarii k Normam radiatsionnoi bezopasnosti (NRB-99/2009)* [Comment on Radiation Safety Standards (NRB-99/2009)]. Edt. by the Member of the Russian Academy of Medical Sciences G. G. Onishchenko. Moscow, 2012. 216 p.
6. Abalkina I. L., Agapov A. M., Bolshov L. A., Erova A. A., Kazakov S. V., Linge I. I., Malyshev A. B. *Analiz zarubezhnoy opyta finansirovaniya rabot po dolgosrochnomu obrashcheniyu s OYAT, RAO i vyvodu yaderno i radiatsionno opasnykh ob'yektov iz ekspluatatsii* [Comparative analysis of international experience in financing operations of spent fuel and nuclear waste management and decommissioning of nuclear-and radiation-hazardous sites]. Preprint IBRAE No. 2006-10. Moscow, IBRAE RAN Publ., 2006. 29 p.
7. Dorofeev A. N., Linge I. I., Samoilo A. A., Sharafutdinov R. B. *K voprosu finansovo-ehkonomicheskogo obosnovaniya povysheniya ehffektivnosti normativnoi bazy EGS RAO* [Feasibility Study on Enhancing the Efficiency of USS RW Regulatory Framework]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 24–33.
8. Linge I. I., Samoilo A. A. *Vozmozhnosti optimizatsii normativnogo regulirovaniya yedinoy gosudarstvennoy sistemy obrashcheniya s radioaktivnyimi otkhodami* [Potential for Optimization of the Regulatory Framework for the Unified State System of Radioactive Waste Management]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2016, no. 4, pp. 12–20.
9. Samoilo A. A., Strizhova S. V., Blokhin P. A., Alexandrova T. A. *Aktual'nyye potrebnosti razvitiya sanitarno-gigiyenicheskogo normirovaniya v kontekste deyatel'nosti po sovershenstvovaniyu sistemy obrashcheniya s RAO* [Actual Needs in the Development of the Hygiene and Sanitary Regulations for Improvement of the RW Management System]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2021, no. 2, pp. 3–13.
10. Federal'nyy zakon ot 21 noyabrya 1995 goda No. 170-FZ "Ob ispol'zovanii atomnoy energii" [Federal law of November 21, 1995 No. 170-FZ On Atomic Energy Use].
11. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources:

- International Basic Safety Standards. STI/PUB/1578. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2014.
12. *Normy radiatsionnoi bezopasnosti (NRB-99/2009): sanitarno-ehpidemiologicheskie pravila i normativy* [Radiation safety standards (NRB-99/2009): sanitary and epidemiological rules and regulations]. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2009. 100 p.
13. *Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19 oktyabrya 2012 g. No. 1069 "O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh otkhodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyayemym radioaktivnym otkhodam I kriteriyakh klassifikatsii udalyayemykh radioaktivnykh otkhodov"* [Government Decree of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069 On the Criteria Used to Categorize Solid, Liquid and Gaseous Waste as Radioactive Waste, the Criteria Used to Categorize Radioactive Waste as Non-removable Radioactive Waste and Removable Radioactive Waste, and Classification Criteria for Removable Radioactive Waste].
14. Bochkarev V. V., Dorofeev A. N., Kuryndin A. V., Linge I. I., Ponizov A. V., Samoylov A. A., Utkin S. S., Shapovalov A. S., Sharafutdinov R. B. K voprosu vneseniya izmeneniy v Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19.10.2012 № 1069 "O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh otkhodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyayemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyayemykh radioaktivnykh otkhodov" [On the Issue of Amending Government Decree No. 1069 Dated 19.10.2012 "On the Criteria for Classifying Solid, Liquid and Gaseous Waste as Radioactive Waste, the Criteria for Classifying Radioactive Waste as Special Radioactive Waste and Disposable Radioactive Waste, and the Criteria for Classifying Disposable Radioactive Waste"]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2022, no. 4 (106), pp. 59—72. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.106.4.005.
15. *Problemy yadernogo naslediya i puti ikh resheniya. Razvitiye sistemy obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami v Rossii* [Nuclear Legacy Challenges and Ways to Address Them. Development of the Radioactive Waste Management System in Russia]. Under the general editorship of Bolshov L. A., Laverov N. P., Linge I. I. Vol. 2. Moscow, 2013. Pp. 37—42.
16. Narkevich B. Ya. Aktual'nye voprosy obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami v yadernoi meditsine [Current Radioactive Waste Management Challenges in Nuclear Medicine]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2022, no. 1 (18), pp. 28—37. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-1-28-37.
17. IAEA Safety Standards Series, № RS-G-1.7 Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Guide, IAEA, Vienna, 2006.
18. IAEA Safety Standards Series, № GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA, Vienna, 2015. STI/PUB/1578.
19. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 08.07.2015 g. № 1316-r (red. ot 10.05.2019) "Ob utverzhdenii perechnya zagryaznyayushchikh veshchestv, v otnoshenii kotorykh primenyayutsya mery gosudarstvennogo regulirovaniya v oblasti okhrany okruzhayushchei sredy" [Government Resolution of July 8, 2015 № 1316-r (revised on May 10, 2019) On the Approved List of Contaminants Subject to State Regulation in the Field of Environmental Protection].
20. Linge I. I., Panchenko S. V., Gorelov M. M. O radiatsionnom kontrole radionuklidov dlya tseyey gosudarstvennogo regulirovaniya v sfere okhrany okruzhayushchey sredy [Radiation Monitoring for the Purposes of Public Regulation in the Field of Environmental Protection]. *ANRI — ANRI*, 2017, no. 1 (88), pp. 12—19.
21. *Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiatsionnoi bezopasnosti (OSPORB 99/2010)* [Basic sanitary rules for radiation safety (OSPORB 99/2010)]. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2010. 83 p.
22. *Radioehkologicheskaya obstanovka v regionakh raspolozheniya predpriyatiy Gosudarstvennoi korporatsii po atomnoi ehnergii "Rosatom"* [Radioecological situation in the siting regions of enterprises operated by the State Atomic Energy Corporation Rosatom]. Edt. by I. I. Linge and I. I. Kryshev. Moscow, 2021. 555 p.
23. Abramov A. A., Bolshov L. A., Gavrilov P. M., Dorofeev A. N., Igin I. M., Linge I. I., Mokrov Yu. G., Pechkurov A. V., Utkin S. S. Ob ideyakh rasshireniya sistemy obrashcheniya s RAO na promyshlennye otkhody, sodержashchie tekhnogennyye radionuklidy [About the ideas on Expanding the RW Management System to Cover Industrial Waste Containing Man-made Radionuclides]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 6—13. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-6-13.
24. *Problemy yadernogo naslediya i puti ikh resheniya. Razvitiye sistemy obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami v Rossii* [Nuclear Legacy Challenges and Ways to Address Them. Development of the Radioactive Waste Management System in Russia]. Under the general editorship of Bolshov L. A., Laverov N. P., Linge I. I. V. 2. Moscow, 2013. Pp. 333—355.
25. GOST R 59968-2021. *Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii. Radioaktivnye otkhody atomnykh stantsii. Opredelenie radiatsionnykh kharakteristik dlya peredachi na zakhoroneniye* [National standard of the Russian Federation. Radioactive waste from

nuclear power plants. Evaluation of radiation characteristics for RW transfer for disposal].

26. Varlakov A. P., Sergeecheva Y. V., Ivliev M. V., Varlakova G. A., Gorbunov V. A., Karlin S. V. Prime-nenie metodologii radionuklidnogo vektora dlya opredeleniya aktivnosti slozhnodetektiruemykh radionuklidov v potokakh RAO [Application of the Nuclide-vector Methodology to Determine the Activity of Difficult-to-measure Radionuclides in Radioactive Waste Streams]. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 85–91. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-85-91.

27. Alexandrova T. A., Blokhin P. A., Samoylov A. A., Kuryndin A. V. Analiz dannykh po radionuklidnomu sostavu RAO v kontekste otsenki dolgovremennoi bezopasnosti ikh zakhroneniya [Analysis of the RW Radionuclide Composition in the Context of Long-Term Safety of Its Disposal]. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 44–51.

28. Kascheev V. A., Logunov M. V., Shadrin A. Yu., Rykunova A. A., Shmidt O. V. Strategiya fraktsionirovaniya VAO ot pererabotki OYAT [Strategy for the fractionation of HLW from SNF reprocessing]. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste*, 2022, no. 2 (19), pp. 6–16. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-6-16.

29. Adamov E. O., Gabaraev B. A., Ganeev I. Kh., Lopatkin A. V., Muratov V. G., Orlov V. V. Potentsial razvitiya i vozmozhnost' dostizheniya sostoyaniya radiatsionnoy ekvivalentnosti urana i otkhodov v

perspektivnoy yadernoy energetike [Development potential and the possibility of attaining radiation equivalence of uranium and waste in the promising nuclear power industry]. *Atomnaya Energiya – Atomic Energy*, 2003, no. 2 (95), pp. 83–87.

30. Kudryavtsev E. G., Sharafutdinov R. B., Kuryndin A. V., Shapovalov A. S. K voprosu o dostizhivosti radiatsionnoi (radiologicheskoi) ehkvivalentnosti radioaktivnykh otkhodov i prirodnoy urana [Achievability of Radiation (Radiological) Equivalence of Radioactive Waste and Natural Uranium]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and radiation safety*, 2022, no. 4, pp. 73–83. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.106.4.006.

31. Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options: A Comparative Study. NEA OECD Report 2000.

32. Novye dokumenty. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov [New documents. Strategy for the development of deep RW disposal facility]. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste*, 2018, no. 3 (4), pp. 114–120.

33. Volkovich A. G., Kolyadin V. I., Lemus A. V., Pavlenko V. I., Potapov V. N., Semenov S. G., Chesnokov A. V., Shisha A. D. Demontazh stroitel'nykh konstruksii v zale reaktora MR [Dismantlement of Building Structures in MR Reactor Hall]. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste*, 2020, no. 4 (13), pp. 22–29. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-22-29.

Information about the author

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

Bibliographic description

Linge I. I. Streamlining RW management and radiation safety systems. *Radioactive. Waste*, 2023, no. 2 (23), pp. 21–34. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-21-34. (In Russian).