

DOI 10.12737/article_59b106429c5b80.00887618

П.А. Блохин, А.А. Самойлов
РАДИОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ
В КОНТЕКСТЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУНКТОВ
ЗАХОРОНЕНИЯ

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва. E-mail: samoylov@ibrae.ac.ru; blokhin@ibrae.ac.ru
П.А. Блохин – м.н.с.; А.А. Самойлов – главный специалист

Реферат

Цель: Разработка и апробация подхода к определению радиологически значимых радионуклидов, содержащихся в радиоактивных отходах (РАО) для различных этапов обращения с ними, и оценка возможности прямого инструментального контроля таких радионуклидов.

Материал и методы: Исследования выполнены путем сравнения относительного вклада радионуклидов активационных РАО реактора ВВЭР-440 (корпус, внутрикорпусные устройства и оболочки твэлов) в радиационное воздействие на человека для различных этапов обращения с РАО. Оценка изменения радионуклидного состава материалов в период облучения и выдержки проводилась на основе программного комплекса АКДАМ-2.0.

Результаты: Получены расчетные данные по вкладу различных радионуклидов в общую активность, определена мощность дозы от внешнего и внутреннего облучения человека для различных этапов обращения с РАО. Предложен подход к определению радиологически значимых радионуклидов, основанный на оценке вклада в мощность дозы активности, периода полураспада и миграционных свойств. Сформированы перечни радионуклидов для рассматриваемых материалов, которые должны быть учтены при обосновании безопасности при обращении с РАО и долговременной безопасности после закрытия пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО). Показана целесообразность применения прямого инструментального контроля для отдельных радионуклидов с применением комбинированного подхода для оценки содержания остальных.

Выводы: Апробация предложенного подхода показала его перспективность для формирования перечня радиологически значимых радионуклидов. Сформированный на его основе перечень радионуклидов подтверждается международной практикой обоснования безопасности ПЗРО. Несмотря на то, что при процессе активации конструкционных материалов образуется большое количество радионуклидов, радиологически значимых из них единицы. При этом может возникнуть необходимость включения дополнительных радионуклидов в приложения НРБ. Прямой инструментальный контроль полного перечня радиологически значимых радионуклидов на практике трудноосуществим и нецелесообразен. Показана необходимость использования комплексного подхода, заключающегося в согласованном применении результатов прямого инструментального контроля отдельных радионуклидов, периодических разрушающих измерений и расчетного определения их содержания. Инструментальный контроль на стадии периодического радиационного мониторинга ПЗРО должен быть ориентирован на мониторинг параметров системы захоронения, влияющих на безопасность (гидрогеохимические характеристики, гидрогеологические характеристики и т.д.).

Ключевые слова: радиоактивные отходы, пункт захоронения, радиационная безопасность, радиологически значимые радионуклиды, инструментальный контроль, периодический радиационный мониторинг

Поступила: 28.03.2017. Принята к публикации: 12.07.2017.

Введение

Понятия радиологически значимых радионуклидов и их инструментального радиометрического контроля так или иначе присутствуют в практических задачах обеспечения радиационной безопасности человека и объектов окружающей среды, хотя во многих случаях необходимый объем контроля (периодичность и перечень радионуклидов) может быть ограничен с учетом особенностей ядерно- и радиационно-опасного объекта. Это обстоятельство вызывает затруднения специалистов практической сферы, когда без должного обоснования устанавливаются регламенты инструментального контроля радионуклидов.

В качестве исходного пункта построения всех регламентаций в отношении обращения с радиоактивными отходами (РАО) традиционно сравнивается радионуклидный состав РАО с перечнем радионуклидов, включенным в Нормы радиационной безопасности (НРБ) [1]. Однако в ряде случаев подобный подход представляется малоэффективным. В литературе уже рассматривались две подобные ситуации. Одна из них связана с перечнем радионуклидов, подлежащих контролю в рамках реализации государственной политики в сфере охраны окружающей среды [2]. Другая – с перечнем радионуклидов, включенных в критерии отнесения не подлежащих дальнейшему использованию отходов к РАО [3]. И в том, и в другом случае в основе перечней контролируемых радионуклидов лежит

Приложение № 4 «Минимально значимые удельная активность радионуклидов (МЗУА) и активность радионуклидов в помещении или на рабочем месте (МЗА)» НРБ, несмотря на наличие доводов, указывающих на их чрезвычайную избыточность в рассматриваемых областях применения.

В данной работе показано, что для целей обоснования долгосрочной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) наблюдается аналогичная ситуация. Проведенные оценки показали, что перечень радиологически значимых радионуклидов, которые необходимо принимать во внимание при осуществлении инструментального контроля, существенно меньше по сравнению с Приложением № 4 НРБ, но при этом он содержит отдельные радионуклиды, не включенные в него. Специфика и цели инструментального контроля радиологически значимых радионуклидов также обуславливает целесообразность отказа от инструментального контроля большинства радионуклидов и полный отказ от него при организации периодического радиационного контроля ПЗРО после их закрытия до момента выхода радионуклидов в биосферу.

Подход к обоснованию радиологически значимых радионуклидов

Отметим, что понятие «радиологически значимые радионуклиды» в научной практике строго не опреде-

лено. В данной работе такой термин вводится, чтобы обозначить группу дозообразующих радионуклидов (суммарный вклад которых в мощность дозы составляет более 99 %) для выбранного сценария обращения с РАО.

Принципиальной особенностью обоснования безопасности ПЗРО является то, что для различных стадий его эксплуатации и различных сценариев радиационного воздействия РАО на персонал и население практически значимый интерес представляют не все, а некоторые радионуклиды. Так, в случае оценки радиационного воздействия кондиционированных РАО на персонал в ходе нормальной эксплуатации ПЗРО наибольший интерес представляют гамма-излучающие нуклиды. Причем, чем выше выход гамма-излучения и его энергия, тем большую значимость имеет радионуклид в рамках оценки безопасности. В рамках анализа аварийных ситуаций, связанных с распространением радионуклидов за пределы упаковки, необходимо принимать во внимание как внешнее, так и внутреннее облучение. Это приводит к смещению перечня радионуклидов в сторону с наибольшими дозовыми коэффициентами при ингаляционном поступлении и заглатывании радионуклидов (в т.ч. поступлении с пищей) в организм человека.

При рассмотрении сценария нормальной эволюции системы ПЗРО после его закрытия потенциальными источниками облучения человека будут являться загрязненная вода и продукты питания. Некоторое поступление радионуклидов в окружающую среду может происходить за счет нарушения защитных свойств матрицы РАО, упаковки и систем защиты ПЗРО. При этом, от момента закрытия объекта до момента его потенциального воздействия на население может пройти значительный период времени (сотни, тысячи и десятки тысяч лет). Так, в федеральных нормах и правилах [4] установлены требования к сохранению изолирующей способности упаковки с РАО – 100 (3 класс РАО) и 1000 лет (1 и 2 класс РАО). С учетом миграции радионуклидов радиологическое воздействие ПЗРО на население и биоту не будет наблюдаться в течение, по крайней мере, сотен лет [5].

Очевидно, что при оценке долгосрочной безопасности ПЗРО необходимо принимать во внимание не столько радионуклидный состав РАО при их образовании, сколько состав РАО, соответствующий рассматриваемому периоду времени и выбранному сценарию потенциального радиологического воздействия на персонал, население и окружающую среду.

Рассмотрим подход к определению перечня радиологически значимых радионуклидов на примере ПЗРО с глубоким захоронением в геологические формации (ПГЗРО).

Радионуклидный состав активационных РАО

По действующей классификации, глубинному захоронению подлежат РАО 1 и 2 классов [6], к которым относятся высокоактивные и долгоживущие среднеактивные РАО. На практике основной объем отходов

1 класса образуется в процессе переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ), радионуклидный состав которого определяется начальным составом топлива, условиями работы реактора (выгорание и пр.) и временем выдержки ОЯТ [7, 8].

По предварительным расчетным оценкам [9], ещё одним источником образования отходов, возникающих в процессе вывода из эксплуатации и подлежащих глубинному захоронению, будут являться активируемые металлические конструкции и, возможно, биологическая защита реакторов.

В качестве примера проведения дифференциации радионуклидов по их радиологической значимости для различных этапов обращения с РАО и выделения критически важных для задачи обоснования долговременной безопасности ПГЗРО рассмотрим активированные материалы, образующиеся в реакторной установке типа ВВЭР-440.

Для оценки радионуклидного состава соответствующих РАО рассчитаны радионуклидные превращения в различных конструкционных материалах, облученных в течение 45 лет (характерное время работы реакторов рассматриваемого типа). Расчет проводился на основе программного комплекса АКДАМ-2.0, разработанного для исследований радиационных характеристик облученных конструкционных материалов ядерно-энергетических установок и включающего в себя библиотеки активационных нейтронных сечений ACDAM/ACT, данных по радиоактивному распаду ACDAM/DEC и сечений радиационной повреждаемости ACDAM/DPA. Основные возможности комплекса и описание библиотек ядерно-физических данных продемонстрированы в работе [10].

Для исследования выбраны высокоактивные элементы реакторной установки – внутрикорпусные устройства (сталь марки 08X18H10T), корпус реактора (сталь марки 15X2МФА-А) и оболочки твэлов (сплав Э-110).

Базовый сценарий предполагает, что обращение с РАО до и после загрузки в ПГЗРО происходит штатно. Для определения наиболее радиологически значимых радионуклидов на разных временных отрезках выбраны несколько характерных временных точек: 10 (обращение на предприятии), 100 (загрузка, закрытие ПЗРО) и 1000 (сохранение изолирующих свойств упаковки) лет после облучения.

Для интервала времени от 10 до 100 лет наибольшую опасность для человека представляет внешнее облучение и соответственно радионуклиды, при распаде которых образуются гамма-кванты с высокой энергией. После загрузки РАО в ПГЗРО и закрытия пункта прямой контакт отходов с человеком исключен. Рассматривая сверхдолгие времена (десяtkи и сотни тысяч лет) и базовый сценарий эволюции ПГЗРО, радиационное воздействие на человека и биоту будет обусловлено воздействием радионуклидов, проникших в грунтовые воды вследствие деградации упаковки и инженерных барьеров безопасности ПГЗРО, и последующей миграции радионуклидов, включая трофические

цепочки. В этом случае критически значимую роль играют слабосорбирующиеся долгоживущие радионуклиды с наибольшими дозовыми коэффициентами.

Анализ значимости радионуклидов выполнен путем сравнения следующих факторов: активности и мощности дозы (для периода времени от образования РАО до 100 лет – от внешнего излучения, для 1000 лет – от потребления с пищей). Для оценки внешнего облучения рассчитывалась мощность дозы от полубесконечного источника [11]. Для оценки мощности дозы от внутреннего облучения использовались соответствующие дозовые коэффициенты из Приложения № 2 НРБ-99/2009.

Результаты расчетов составов РАО показывают, что для указанных выше материалов в первоначальный момент времени образуется более 50 радионуклидов, активность (с учетом периода полураспада) которых обуславливает необходимость глубинного захоронения РАО. К моменту времени ~100 лет таких радионуклидов остается 7 (⁶³Ni, ⁵⁹Ni, ⁶⁰Fe, ⁹⁴Nb, ¹⁴C, ⁹³Zr, ³⁹Ar). В табл. 1–3 приведены изотопы, которые вносят основной вклад в суммарную активность или в дозу для рассматриваемого сценария (более 99 %) для различных времен выдержки.

В результате анализа радионуклидных составов можно выделить группу радионуклидов (табл. 4), знание о которых критически важно для оценки безопасности на различных этапах обращения с активационными РАО.

Как видно из табл. 1–4, на стадиях обращения с РАО, их размещения и закрытия ПЗРО к радиологически значимым радионуклидам относится только два радионуклида – для сталей это ⁶⁰Co, для циркониевого сплава – ⁹⁴Nb. В дальнейшем они не утрачивают своей значимости, при этом добавляются другие.

Отметим наличие в перечне значимых радионуклидов для оценки долговременной безопасности короткоживущего ⁶⁰Co. Если на момент образования РАО его активность определяется процессом активации материалов под действием нейтронного потока, то в дальнейшем, вследствие сравнительно короткого периода полураспада его активность будет определяться материнским радионуклидом ⁶⁰Fe. Это означает, что если при анализе радиационного воздействия РАО на этапе эксплуатации ПЗРО ⁶⁰Co следует рассматривать как отдельный радионуклид, то в дальнейшем, при анализе долгосрочной безопасности объекта, речь идет о радиационном воздействии радионуклида ⁶⁰Fe, находящегося в радиационном равновесии с продуктами распада (⁶⁰Co и ^{60m}Co).

Ещё одним немаловажным аспектом, который необходимо учитывать при формировании перечня радиологически значимых радионуклидов, является учет миграционных свойств вмещающих пород системы ПЗРО. Проанализировав данные по оценке безопасности систем геологического захоронения [12], можно сделать вывод, что основной вклад в дозовое воздействие на население, помимо вышеперечисленных в табл. 4 радионуклидов, будут оказывать радиону-

Таблица 1

Радиологически значимые радионуклиды в составе облученного материала внутрикорпусных устройств

Радионуклид	Активность, Бк/кг	Вклад в активность, %	Вклад в мощность дозы, %
10 лет			
⁶⁰ Co	6,1×10 ¹³	84	99
⁵⁵ Fe	7,5×10 ¹²	10	–
⁶³ Ni	4,1×10 ¹²	5	–
100 лет			
⁶³ Ni	2,2×10 ¹²	99,8	–
⁶⁰ Co	4,8×10 ⁸	0,02	99
1000 лет			
⁶³ Ni	4,0×10 ⁹	64	25
⁵⁹ Ni	2,2×10 ⁹	34	6
⁶⁰ Fe	3,6×10 ⁷	0,57	62
⁶⁰ Co	3,6×10 ⁷	0,57	7

Таблица 2

Радиологически значимые радионуклиды в составе облученного материала корпуса

Радионуклид	Активность, Бк/кг	Вклад в активность, %	Вклад в мощность дозы, %
10 лет			
⁶⁰ Co	1,2×10 ¹¹	77	–
⁵⁵ Fe	2,8×10 ¹⁰	19	99
⁶³ Ni	5,8×10 ⁹	3,5	–
100 лет			
⁶³ Ni	3,1×10 ⁹	97,8	–
⁵⁹ Ni	5,4×10 ⁷	1,7	–
⁹³ Mo	4,3×10 ⁶	0,1	–
^{93m} Nb	4,2×10 ⁶	0,1	–
⁹⁴ Nb	3,1×10 ⁶	0,01	88
⁶⁰ Co	2,1×10 ⁵	<0,01	11
1000 лет			
⁵⁹ Ni	5,3×10 ⁷	77	22
⁶³ Ni	5,7×10 ⁶	8	6
⁹³ Mo	3,5×10 ⁶	5	30
⁹⁴ Nb	3,0×10 ⁶	4	36
^{93m} Nb	3,0×10 ⁶	4	3
⁹⁹ Tc	6,3×10 ⁵	1	4

Таблица 3

Радиологически значимые радионуклиды в составе облученных оболочек твэлов

Радионуклид	Активность, Бк/кг	Вклад в активность, %	Вклад в мощность дозы, %
10 лет			
^{93m} Nb	1,2×10 ¹¹	67	–
³ H	5,4×10 ¹⁰	29	–
⁵⁵ Fe	2,5×10 ⁹	1,3	–
⁹⁴ Nb	2,0×10 ⁹	1,1	80
⁶³ Ni	1,6×10 ⁹	0,8	–
⁶⁰ Co	2,1×10 ⁸	0,1	15
100 лет			
^{93m} Nb	2,6×10 ⁹	43	–
⁹⁴ Nb	2,0×10 ⁹	32	99
⁶³ Ni	8,5×10 ⁸	14	–
³ H	3,4×10 ⁸	5,7	–
¹⁴ C	1,6×10 ⁸	2,7	–
⁹³ Zr	5,3×10 ⁷	0,9	–
1000 лет			
⁹⁴ Nb	1,9×10 ⁹	87	98
¹⁴ C	1,4×10 ⁸	6,6	1
⁹³ Zr	5,3×10 ⁷	2,5	–
^{93m} Nb	5,3×10 ⁷	2,4	–
⁵⁹ Ni	9,9×10 ⁶	0,5	–

Таблица 4

**Радиологически значимые радионуклиды
при обращении с активационными РАО**

Радионуклид	T _{1/2} , лет	Радиологическая значимость	
		До закрытия ПЗРО	После закрытия ПЗРО
¹⁴ C	5,7×10 ³	-	+
⁵⁹ Ni	7,6×10 ⁴	-	+
⁶³ Ni	1,0×10 ²	-	+
⁶⁰ Fe	2,6×10 ⁶	-	+
⁶⁰ Co	5,2	+	+*
⁹³ Mo	4,0×10 ³	-	+
⁹³ Zr	1,6×10 ⁶	-	+
^{93m} Nb	1,6×10 ¹	-	+
⁹⁴ Nb	2,0×10 ⁴	+	+

Примечание: * – Определяется содержанием ⁶⁰Fe

кнды с высокой миграционной способностью, такие как ⁹⁹Tc и ³⁶Cl. При комплексном анализе составов высокоактивных отходов от переработки топлива к этому перечню добавятся актиниды, которые необходимо рассматривать с учетом дочерних продуктов их распада (например, ²⁴¹Pu и ²⁴¹Am [13, 14]). Тем не менее, итоговый перечень радиологически значимых радионуклидов будет существенно короче приведенного в постановлении [6] и в Приложении № 4 НРБ.

Аналогичные выводы подтверждаются и оценками зарубежных специалистов, например, в работе [12] в перечень значимых радионуклидов для захоронения отработанного ядерного топлива (который может быть рассмотрен как аналог РАО 1 и 2 классов) включены 22 актиниды с продуктами распада и 23 радионуклида для всех рассматриваемых сценариев.

Инструментальный контроль

Инструментальный контроль радионуклидов, содержащихся в РАО, должен позволять проводить оценку безопасности на всех этапах обращения с РАО, включая захоронение в ПЗРО. Для долговременной безопасности в рамках базового сценария эволюции ПЗРО определяющими факторами являются суммарные активности радиологически значимых радионуклидов на прогнозируемый период выхода в биосферу.

Ранее в публикации [15] уже высказывалось мнение, что определение полного перечня требуемых характеристик каждой отдельной упаковки РАО может представлять слишком трудоемкую процедуру. Целесообразно проведение оценок содержания радионуклидов не для каждой упаковки, а для более широкой их совокупности (партии или всей технологической цепочки, приводящей к образованию конкретных РАО с учетом прогноза их размещения в ПЗРО). Применение таких обобщенных подходов позволит снизить не только количество необходимых измерений, и соответственно, затраты на паспортизацию упаковок РАО, но и консерватизм оценок долговременной безопасности. Последнее, в свою очередь, приведет к более мягким критериям приемлемости РАО без ущерба для безопасности. Особенно это актуально для отходов со значительно изменяющимися характеристиками, ког-

да наличие упаковок со значениями удельной активности радиологически значимых радионуклидов выше среднего будет компенсироваться наличием упаковок со значениями удельной активности ниже среднего.

С технической стороны инструментального контроля в качестве основных проблемных факторов, препятствующих реализации предлагаемого обобщенного подхода, можно рассматривать следующие:

1. РАО могут являться крайне неоднородными по своему составу и характеристикам, в случае, если они не подвергались глубокой переработке.
2. Характеристики упаковки существенным образом влияют на возможность инструментального неразрушающего контроля характеристик РАО.
3. С течением времени относительный вклад различных радионуклидов в суммарную активность изменяется в широком диапазоне.
4. Распад ряда радиологически значимых радионуклидов не сопровождается гамма-излучением, измерение которого является традиционным способом паспортизации РАО.
5. Применение пробоотборных методов (ICP – масс-спектрометрия, пробоподготовка с последующей радиометрией или спектрометрией) представляет собой трудоемкий и дорогостоящий процесс, и, кроме того, не может быть применено к РАО без вскрытия их упаковок.

Проблемные моменты (1) и (2) были достаточно хорошо изучены в рамках исследований по применению неразрушающих методов контроля ядерных материалов в рамках гарантий нераспространения. Так, в публикациях [16, 17] указано на наличие зависимости погрешности измерений как систематической, так и случайной от толщины стенки контейнера (предполагалась менее 1 см, материал сталь). Другая сложность при проведении измерений связана с предположением однородности материала по глубине, поскольку гамма-кванты анализируемых линий обладают, как правило, относительно небольшой проникающей способностью, что позволяет контролировать лишь поверхностный слой материала. Для РАО, в отношении которых сомнений в однородности характеристик гораздо больше, а контейнеры для окончательной изоляции обязаны обладать, в том числе и высокими прочностными характеристиками, проблемные моменты (1) и (2) будут играть еще большую роль. В отношении РАО, содержащих как короткоживущие, так и долгоживущие радионуклиды, необходимо учитывать, что с точки зрения обоснования долговременной безопасности ПЗРО интерес представляют последние. Тем не менее, инструментальный контроль будет осуществляться и в тот период времени, когда подавляющая часть активности в отходах, как правило, будет приходиться на короткоживущие. Это означает, что характерное излучение важных нуклидов будет регистрироваться на фоне более интенсивного излучения короткоживущих радионуклидов, что также затруднит проведение инструментального контроля.



Рис. 1. Основные этапы жизненного цикла РАО

Кроме того, радиоактивный распад ряда радионуклидов, которые определяют долговременную безопасность, вообще не сопровождается гамма-излучением, что делает невозможным их измерение при помощи стандартных гамма-спектрометрических или радиометрических методик. К таким радионуклидам из приведенного выше перечня радиологически значимых относятся ^{14}C , ^{36}Cl , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{60}Fe , ^{99}Tc .

Применение разрушающих методов контроля, в принципе, позволяет решить проблему характеристики РАО. Однако их применение ограничено: а) высокой стоимостью и б) необходимостью отбора проб, что делает фактически невозможным их применение для уже упакованных РАО (без проведения переупаковки).

В такой ситуации необходимо применять комбинированные подходы к контролю характеристик РАО, которые будут заключаться в совместном применении неразрушающих методов контроля (для оценок содержания реперных радионуклидов в РАО в упаковках РАО), расчетных методов и результатов разрушающих измерений (полученных в рамках разработки технологий инструментального контроля для вновь образующихся РАО и в дальнейшем при периодическом контроле качества кондиционирования).

Фактическая невозможность определения всех радиологически значимых радионуклидов в процессе приемки/передачи РАО между эксплуатирующей организацией и Национальным оператором (ФГУП «НО РАО» – организация, осуществляющая эксплуатацию ПЗРО) приводит к необходимости организации мер, направленных на взаимный учет интересов как эксплуатирующих организаций, так и ФГУП «НО РАО» в части проведения измерений радионуклидного со-

става РАО. Такие меры могут заключаться в совместном планировании работ по паспортизации РАО и в последующем контроле качества соответствующих процессов.

Специфика инструментального контроля в ходе мониторинга системы ПЗРО после его закрытия определяется в основном низкой скоростью процессов, влияющих на безопасность населения. Ориентироваться при этом на контроль радионуклидов в грунтовых водах нецелесообразно и более того, в корне неверно. Как отмечалось выше, реперные времена проникновения радионуклидов в биосферу – тысячи и десятки тысяч лет. При их обнаружении корректирующие мероприятия уже будут значительно более масштабными и дорогостоящими, если вообще возможными.

В такой ситуации организация мониторинга ПЗРО должна исходить из необходимости контроля тех параметров системы захоронения и внешних факторов, которые закладывались в качестве исходных данных при обосновании безопасности. При этом контролироваться будут не последствия отклонений от нормальной эволюции системы ПЗРО, а их возможные причины. В качестве таких параметров стоит отметить гидрогеохимические параметры (состав и минерализация воды и др.), гидрогеологические характеристики (уровень грунтовых вод и др.) системы захоронения, температурный режим ПЗРО, сейсмические параметры и пр.

Взаимное соответствие этапов обращения с РАО, радиологически значимые радионуклиды, а также необходимость инструментального контроля изображены на рис. 1.

Выводы

Результаты апробации предложенного подхода показали его перспективность для формирования перечня радиологически значимых радионуклидов с целью оценки безопасности на различных этапах обращения с РАО. Как показали результаты расчетов активностей и мощностей доз (от внутреннего и внешнего облучения), количество радионуклидов, вносящих определяющий вклад в радиационное воздействие, существенно ниже количества радионуклидов, определяющих отнесение к 1 и 2 классам при обращении с РАО. До закрытия ПЗРО это ^{60}Co и ^{94}Nb (для рассмотренных материалов), после закрытия – ^{14}C , ^{36}Cl , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{60}Fe , ^{60}Co , ^{93}Mo , ^{93}Zr , $^{93\text{m}}\text{Nb}$, ^{94}Nb и ^{99}Tc . Этот перечень радионуклидов существенно короче перечня радионуклидов, включенных в критерии отнесения не подлежащих дальнейшему использованию отходов к РАО [3]. Тем не менее, на практике могут возникать ситуации, когда к радиологически значимым радионуклидам могут относиться радионуклиды, отсутствующие в отдельных приложениях НРБ или постановлении [3]. В рассматриваемом случае таким радионуклидом является ^{60}Fe , который отсутствует в Приложении № 2а НРБ и в постановлении [3].

Инструментальный контроль полного перечня радионуклидов в РАО на практике трудноосуществим. Это связано как со значительными финансовыми затратами на его осуществление, так и с необходимостью в ряде случаев переупаковки накопленных РАО. Разрешить данную проблемную ситуацию можно с использованием комплексного подхода, заключающегося в согласованном применении результатов прямого инструментального контроля отдельных радионуклидов, периодических разрушающих измерений и расчетного определения их содержания. При планировании контроля необходимо учитывать как интересы ФГУП «НО РАО», организации отвечающей за безопасность ПЗРО, так и эксплуатирующих организаций, которые будут осуществлять контроль. Инструментальный контроль на стадии периодического радиационного мониторинга ПЗРО, который должно проводить ФГУП «НО РАО», должен быть ориентирован, в первую очередь, на мониторинг параметров системы захоронения, влияющих на безопасность (гидрогеохимические, гидрогеологические характеристики и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СП 2.6.1.2523-09.
2. Линге И. И., Панченко С. В., Горелов М. М. О радиационном контроле радионуклидов для целей государственного регу-

лирования в сфере охраны окружающей среды // Аппаратура и новости радиац. измерений. 2017. № 1. С. 2–8.

3. Большов Л. А., Лаверов Н. П., Линге И. И. и соавт. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Том 2. – М.: Энергопроманистика. 2013. 392 с.
4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения (НП-093-14).
5. Капырин И. В., Григорьев Ф. В., Коньшин И. Н. Геомиграционное и геофильтрационное моделирование в расчетном коде GeRa // В сб.: «Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции. 26–27 сент. 2016, Москва». – М.: Изд-во МГУ. 2016. С. 133–139.
6. Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 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».
7. Колобашкин В. М., Рубцов П. М., Ружанский П. А., Сидоренко В. Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. – М.: Энергоатомиздат. 1983. 385 с.
8. Коренков И. П., Шандала Н. К., Лашенева Т. Н., Соболев А. И. Защита окружающей среды при эксплуатации и выводе из эксплуатации радиационно-опасных объектов. Под ред. И. П. Коренкова, К. В. Котенко. – М.: Бином, 2014. 440 с.
9. Енговатов И. А., Машкович В. П., Орлов Ю. В. и соавт. Радиационная безопасность при выводе из эксплуатации реакторных установок гражданского и военного назначения. – М.: «ПАИМС». 1999. 300 с.
10. Блохин А. И., Дёмин Н. А., Манохин В. Н. и соавт. Расчётный комплекс ACDAM-2.0 для исследований ядерных физических свойств материалов в условиях нейтронного облучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. 2015. Вып. 3(82). С. 81–109.
11. Engineering Compendium on Radiation Shielding, R.G. Jaeger (Editor-in-Chief). Vol. 1. – Heidelberg: Springer-Verlag Berlin GmbH. 1968. 357 pp.
12. Radionuclide Transport Report for the Safety Assessment SR-Site. TR-10-50. – Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB. 2010. 325 pp.
13. Долгих В. П. Разработка подходов определения периода потенциальной опасности РАО с учетом дочерних радионуклидов // В сб.: «V Междунар. конф. молодых ученых и специалистов атомной отрасли». – СПб. 2013. С. 36–38.
14. Долгих В. П. Разработка подходов к определению периода потенциальной опасности РАО. Российская конференция по радиохимии «Радиохимия». 2012. С. 209.
15. Линге И.И., Самойлов А.А. Возможности оптимизации нормативного регулирования единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами // Вопросы радиац. безопасности. 2016. № 4 (84). С. 12–20.
16. Bokov D., Samoilov A., Ragimov T., Sanders J. Development and Attestation of Gamma-Ray Measurement Methodologies for Use by Rostekhnadzor Inspectors in the Russian Federation. – INL/CON-06-11453. Idaho: Idaho Nat. Lab. 2006. 9 pp.
17. Bushuev A., Kozhin A., Samoilov A. et al. Gamma-spectroscopy methodology for simultaneous determination of mass and isotopic composition of large plutonium samples // Nucl. Technol. 2010. Vol. 170. № 2. P. 353–359.

DOI 10.12737/article_59b1077eca2810.73078621

Radiological Justification of Radionuclide Inventory Control in the Context of the Long-Term Safety of Radioactive Waste Disposal Facilities

P.A. Blokhin, A.A. Samoylov

Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow, Russia. E-mail: samoylov@ibrae.ac.ru; blokhin@ibrae.ac.ru

P.A. Blokhin – Junior Researcher; A.A. Samoylov – Senior Specialist

Abstract

Purpose: this paper concentrates on the development and validation of an approach enabling to identify radiologically relevant radionuclides in radioactive waste at different stages of their management, as well as to implement their direct instrumental control.

Material and methods: The research was carried out by comparing relevant radiological effects produced by radionuclides contained in activation RW from VVER-440 unit (reactor vessel, vessel internals and fuel rod cladding) on human at different stages of RW management. AKDAM-2.0 complex was used to evaluate the changes in the radionuclide inventory of materials during their irradiation and cooling.

Results: The study enabled to calculate relevant contribution of different radionuclides to the overall activity and dose rate from external and internal human exposure at different stages of RW management. This paper proposes a novel approach to identify radiologically relevant radionuclides based on a comparative evaluation of their contribution to the dose rate their activity, half-lives and migration properties. Relevant lists of radionuclides were developed for the studied materials. These radionuclides should be considered in the safety assessments of RW management practices and the post-closure safety demonstration for deep geological disposal facilities (DGDF). The study suggests that direct instrumental control is feasible for a number of radionuclides along with the use of an integrated approach enabling to evaluate the content of other radionuclides.

Conclusions: Further validation proved the viability of the proposed approach in the development of lists of radiologically relevant radionuclides. It has been found that the generated list is consistent with international practice used to demonstrate DGDF safety. It should be noted that only a small number of radionuclides should be considered radiologically relevant notwithstanding a variety of radionuclides generated due to material activation. In some cases, certain radionuclides are required to be added to the lists specified in the appendices to Radiation Safety Standards (RSS). However, the direct instrumental control covering the entire list of radiologically relevant radionuclides (for each RW management stage) is considered not feasible and hard to implement. The study shows that an integrated approach combining direct instrumental control for certain radionuclides, periodic destructive tests and inventory calculations is a preferred option. At the stage of periodic radiation monitoring in the disposal facility, such instrumental control should be focused on the evaluation of disposal system properties affecting its safety (hydrogeochemical, hydrogeological characteristics and etc.).

Key words: radioactive waste, disposal facility, radiation safety, safety assessment, radiologically relevant radionuclides, instrumental measurements, periodical radiation monitoring

REFERENCES

1. Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99/2009). SP 2.6.1.2523-09.
2. Linge I. I., Panchenko S. V., Gorelov M. M. O radiatsionnom kontrole radionuklidov dlya tseley gosudarstvennogo regulirovaniya v sfere okhrany okruzhayushchey sredy // Apparatura i novosti radiats.h izmereniy. 2017. № 1. P. 2–8.
3. Bolshov L. A., Laverov N. P., Linge I. I. et al. Problemy yadernogo naslediya i puti ikh resheniya. Vol. 2. – M.: Enegopromanalitika. 2013. 392 pp.
4. Federalnyye normy i pravila v oblasti ispolzovaniya atomnoy energii. Kriterii priyemlosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhoroneniya (NP-093-14).
5. Kapyrin I. V., Grigoryev F. V., Konshin I. N. Geomigratsionnoye i geofiltratsionnoye modelirovaniye v raschetnom kode GeRa // V sb.: «Superkompyuternyye dni v Rossii: Trudy mezhdunarodnoy konferentsii. 26–27 sentyabrya 2016. Moskva». M.: Izd-vo MGU. 2016. P. 133–139.
6. Postanovleniye Pravitelstva RF ot 19 oktyabrya 2012 g. № 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».
7. Kolobashkin V.M., Rubtsov P.M., Ruzhanskiy P.A., Sidorenko V.D. Radiatsionnyye kharakteristiki obluchennogo yadernogo topliva. Spravochnik. M.: Energoatomizdat. 1983. 385 pp.
8. Korenkov I.P., Shandala N.K., Lashchenova T.N., Sobolev A.I. Zashchita okruzhayushchey sredy pri ekspluatatsii i vyvode iz ekspluatatsii radiatsionno-opasnykh obyektov. / Pod red. I.P. Korenkova, K.V. Kotenko. – M.: Binom. 2014. 440 pp.
9. Engovatov I.A., Mashkovich V.P., Orlov Yu. V. et al. Radiatsionnaya bezopasnost pri vyvode iz ekspluatatsii reaktornykh ustanovok grazhdanskogo i voyennogo naznacheniya. – M.: PAIMS. 1999. 300 pp.
10. Blokhin A.I., Demin N.A., Manokhin V.N. et al. Raschetnyy kompleks ACDAM-2.0 dlya issledovaniy yadernykh fizicheskikh svoystv materialov v usloviyakh neytronnogo oblucheniya // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. ser. Materialovedeniye i novyye materialy. 2015. vyp. 3(82). C. 81–109.
11. Engineering Compendium on Radiation Shielding. R.G. Jaeger (Editor-in-Chief). Vol. 1. – Heidelberg: Springer-Verlag Berlin GmbH. 1968. 357 pp.
12. Radionuclide Transport Report for the Safety Assessment SR-Site. TR-10-50. – Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB. 2010. 325 pp.
13. Dolgikh V.P. Razrabotka podkhodov opredeleniya perioda potentsialnoy opasnosti RAO s uchetom dochernikh radionuklidov. // In “V Mezhdunar. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov atomnoy otrasli. SPb. 2013. P. 36–38.
14. Dolgikh V. . Razrabotka podkhodov k opredeleniyu perioda potentsialnoy opasnosti RAO. Rossiyskaya konferentsiya po radiokhimi «Radiokhimiya» 2012. P. 209.
15. Linge I.I., Samoylov A.A. Vozmozhnosti optimizatsii normativnogo regulirovaniya edinoy gosudarstvennoy sistemy obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami // Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti. 2016. № 4 (84). P. 12–20.
16. Bokov D., Samoilov A., Ragimov T., Sanders J. Development and Attestation of Gamma-Ray Measurement Methodologies for Use by Rostekhnadzor Inspectors in the Russian Federation. INL/CON-06-11453. Idaho: Idaho Nat.Lab. 2006. 9 pp.
17. Bushuev A., Kozhin A., Samoilov A. et al. Gamma-spectroscopy methodology for simultaneous determination of mass and isotopic composition of large plutonium samples // Nucl. Technol. 2010. Vol. 170. № 2. P. 353–359.