

Обоснование перечня радионуклидов, подлежащих нормированию в выбросах объектов использования атомной энергии в атмосферный воздух

Разработан и обоснован корректный подход к формированию оптимального перечня контролируемых (нормируемых) радионуклидов в выбросе объектов использования атомной энергии в атмосферный воздух на основе выборочных значений случайных величин (объемных активностей радионуклидов), полученных в результате серии экспериментов с учетом требований нормативных документов. Особенность предложенного подхода состоит в полноценном вовлечении в процесс принятия решений результатов измерений контролируемой величины, находящихся как в пределах диапазона измерений, так и за пределами нижней границы этого диапазона, регламентированного методами и средствами измерений, а также показателей достоверности радиационного контроля.

Ключевые слова:

радиоактивные вещества, выбросы, нормирование выбросов, атмосферный воздух, объекты использования атомной энергии, радиационный контроль.

**А.В.Курьиндин, А.С.Шаповалов,
Е.А.Иванов, Н.Б.Тимофеев**

ФБУ «НТЦ ЯРБ», г. Москва

В нормативных документах [1,2] установлены требования к перечню радионуклидов, подлежащих нормированию (контролю) в выбросах объектов использования атомной энергии (далее – ОИАЭ) в атмосферный воздух.

Генеральная совокупность (множество M), служащая основой для выбора радионуклидов, подлежащих нормированию (контролю) в выбросах, включает радионуклиды, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды (атмосферного воздуха) в соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации [1].

Основная часть радионуклидов включена в [1] с учетом рекомендаций Комиссии Европейского Союза по стандартизированной информации о радиоактивных выбросах в атмосферу [3] для атомных электростанций (далее – АЭС) и предприятий по переработке отработавшего ядерного топлива (далее – ППОЯТ). Ряд радионуклидов включен в [1] на основе анализа списка радионуклидов, поступающих в окружающую среду в результате деятельности в областях медицины и промышленности, не связанных с использованием атомной энергии [4]. В [5] подробно указаны источники информации, на основе анализа которых осуществлялось включение того или иного радионуклида в [1]. При этом возможна ситуация, когда в выбросах будут присутствовать радионуклиды, не включенные в [1], вкладом которых в дозу облучения населения априори нельзя пренебречь. В этом случае представляется обоснованным учитывать такие радионуклиды совместно с радионуклидами из генеральной совокупности, то есть рассматривать расширенное множество M [6].

Нормативы допустимых выбросов (далее – НДВ) устанавливаются для каждого источника (рассматриваются только источники, суммарный выброс каждого из которых в атмосферный воздух создает без учета рассеивания индивидуальную годовую эффективную дозу более 10 мкЗв [2]) и для всех радионуклидов из множества M , суммарный вклад которых в годовую эффективную дозу облучения лиц из критической группы населения (далее – КГ) (группа лиц из населения (не менее 10 чел.), однородная по одному или нескольким признакам – полу, возрасту, социальным или профессиональным условиям, месту проживания, рациону питания, которая подвергается наибольшему радиационному воздействию по данному пути облучения от данного источника излучения [7]), создаваемую выбросом этого источника в режиме нормальной эксплуатации, составляет $\varepsilon \geq 0,99$ [2]. При этом не уточняется, каким образом оценивается величина ε . Например, в [6] для этих целей рекомендуется оценивать годовые эффективные дозы без учета рассеивания. Возможно также исходить из максимальной дозы на местности с учетом всех основных путей облучения.

Установленный в [2] критерий допускает возможность разделения исходного множества M на два непересекающихся подмножества M_1 и M_2 :

$$M_1 \cup M_2 = M, \quad M_1 \cap M_2 = \emptyset, \quad N = N_1 + N_2, \quad (1)$$

где: M_1 включает радионуклиды, подлежащие контролю в выбросе, суммарный вклад которых в дозу по этому пути воздействия равен ε ; M_2 включает радионуклиды, контроль которых в выбросе можно исключить (в результате расчетно-теоретических или экспериментальных исследований), а их суммарный вклад в дозу по этому пути воздействия не превышает $(1 - \varepsilon)$; N , N_1 и N_2 – мощность множества M , M_1 и M_2 , соответственно.

Постановка задачи

Исходя из требований нормативных документов [1,2], разработать модель формирования подмножества $M_1 \subseteq M$ с минимальной мощностью $N_1 < N$.

Метод решения

Для решения указанной задачи необходимо выполнить комплекс радиационных измерений объемной активности (далее – ОА) отдельных радионуклидов из множества M в выбросах ОИАЭ в атмосферный воздух.

Радиационные измерения

Радиационные измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, должны выполняться по методикам измерений (далее – МИ) и методикам радиационного контроля (далее – МРК), являющимся необходимым элементом в обеспечении метрологической прослеживаемости и точности измерений [8-11]. МРК и МИ подлежат в установленном порядке аттестации с регистрацией в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений.

МРК должна разрабатываться и использоваться для конкретного объекта радиационного контроля (далее – РК) и регламентировать:

- номенклатуру измеряемых (контролируемых, операционных) величин и диапазоны их измерений (множество значений величин одного рода, которые могут быть измерены данным средством измерений (далее – СИ) или измерительной системой с указанной инструментальной неопределенностью или указанными показателями точности при определенных условиях; нижнюю границу диапазона измерений не следует путать с пределом обнаружения [11]);
- целевую (консервативную или максимальную) неопределенность измерений;
- алгоритм проведения РК, а также процедуры отбора проб, приготовления счетных образцов (далее – СОБ) и выполнения измерений;
- технические и метрологические характеристики СИ;
- правила обработки результатов измерений и их интерпретации, применительно к объекту РК, с указанием составляющих неопределенности (бюджета неопределенностей) измерений;
- критерий соответствия объекта нормативным требованиям (при их наличии).

МРК должна регламентировать форму представления результатов измерений (обычно результат измерения является только аппроксимацией или оценкой значения измеряемой величины и, таким образом, будет полным только в том случае, если он сопровождается указанием неопределенности этой оценки [12]). При этом обязательным является указание [8-12]:

- измеренного (рассчитанного по измерению) значения контролируемой величины;
- оценки неопределенности измерений для доверительной вероятности $P = 0,95$.

Решение о соответствии контролируемого параметра установленному нормативу принимают с учетом оцененной неопределенности измерений. Множество значений контролируемой величины, представляющее результат РК, задается диапазоном [9-12]:

$$y \pm k \cdot u_c(y), \quad (2)$$

где: y – измеренное значение контролируемой случайной величины Y ; u_c – суммарная стандартная неопределенность; k – коэффициент охвата (в РК для $P = 0,95$ принимается $k = 2$).

Представление результатов радиационных измерений в соответствии с (2) основано на использовании терминов и понятий теории точности измерений (понятие точность измерений описывает качество измерений в целом, объединяя понятия правильность и прецизионность измерений [11]) и корректно, если измеренная величина находится в регламентированном МРК диапазоне измерений.

Порог принятия решения и предел обнаружения измеряемой величины

В прикладной спектроскопии ионизирующих излучений особое место занимает проблема обнаружения, идентификации и количественной оценки активности нуклидов, когда их содер-

жание в анализируемом образце мало и находится вне диапазона измерений МИ и СИ [13,14], то есть вне области применения методов теории точности измерений.

Решение этой проблемы возможно в рамках теории обнаружения сигнала (далее – ТОС) (теория обнаружения сигнала применяется во многих областях, таких как диагностика любого рода, контроль качества, телекоммуникации и психология; она также применяется в управлении сигнализацией, где необходимо отделять важные события от фонового шума [15]), которая дает способ количественной оценки способности отличать полезный (несущий информацию) сигнал от шума на основе методов проверки статистических гипотез, в рамках которой принимается решение о присутствии активности в образце.

В рамках ТОС выбор делается между нулевой гипотезой (H_0) и альтернативной гипотезой (H_α) [15-17]. Нулевая гипотеза обычно формулируется как «активность в образце отсутствует» (т. е. наблюдаемые активности не превышают фоновые), в то время как альтернативная гипотеза утверждает, что наблюдаемые активности превышают фоновые, и, таким образом, «активность в образце присутствует». В данном контексте «образец» имеет общее значение; оно может относиться к прямым измерениям объемной или поверхностной активности, лабораторным анализам образцов и другим объектам. Ошибки, допускаемые при проверке гипотез, разделяются на два типа:

- 1) отклонение гипотезы H_0 , когда она верна – ошибка первого рода;
- 2) принятие гипотезы H_0 , когда в действительности верна гипотеза H_α – ошибка второго рода.

Вероятность ошибки первого рода (вероятность ложноположительного решения) обозначается α и называется уровнем значимости критерия, по которому проверяется справедливость гипотезы H_0 . Вероятность ошибки второго рода (вероятность ложноотрицательного решения) обозначается β и зависит от альтернативной гипотезы H_α . Выбор α и β зависит от области применения. Часто выбирают $\alpha = \beta = 0,05$ [11,17].

В задаче обнаружения сигнала в условиях фона важную роль играет понятие «*порог принятия решения* для измеряемой величины» (Decision threshold of the measurand), который определяется как значение измеряемой величины y^* , при превышении которого результат фактического измерения y с использованием данной процедуры измерения, количественно характеризующей физический эффект (например, присутствие активности в образце), используется для принятия решения о наличии физического эффекта [16,17].

Порог принятия решения определяется таким образом, что в случаях, когда $y \geq y^*$, вероятность ошибки первого рода меньше или равна α , и делается вывод о наличии активности в образце. Если $y < y^*$, то делается вывод, что результат измерения не может быть отнесен к физическому эффекту.

Радиационные измерения часто предполагают оценку активности образцов на уровнях, близких к фоновым. Таким образом, необходимо определить минимальное количество радиоактивности $y^\#$, которое может обнаружить данный прибор и МИ.

В [17] величина $y^\#$ определяется как «предел обнаружения измеряемой величины» (Detection limit of the measurand). При указанном выше пороге принятия решения «предел обнаружения измеряемой величины $y^\#$ – наименьшее истинное значение измеряемой величины выше порога принятия решения, для которого вероятность ошибочного предположения о том, что физический эффект (активность) отсутствует и не превышает установленного значения β » [17].

В [17] величины y^* и $y^\#$ рассчитываются следующим образом:

$$y^* = k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}_c(0), \quad y^\# = y^* + k_{1-\beta} \cdot \tilde{u}_c(y^\#), \quad \Phi(k_p) = p, \quad (3)$$

где: $\tilde{u}_c(0)$ и $\tilde{u}_c(y^\#)$ – оценка стандартной неопределенности при нулевой активности и когда активность равна $y^\#$, соответственно;

Φ – функция распределения стандартного нормального распределения (функция Лапласа);

k_p – квантиль стандартного нормального распределения для вероятности p ($p = 1 - \alpha$ и $p = 1 - \beta$).

Термины «порог принятия решения» и «предел обнаружения измеряемой величины» используются неоднозначно в различных стандартах (например, в стандартах, связанных с химическим анализом или обеспечением качества).

В российских документах в качестве *порога принятия решения* для измеряемой величины [17] используется термин «предел обнаружения» [11,18,19].

В соответствии с РМГ 29-2013 [11] «Предел обнаружения: измеренное значение величины, полученное в соответствии с данной методикой измерений, для которого вероятность ошибочного утверждения об отсутствии компонента в материале равна β , а вероятность ошибочного утверждения о его наличии равна α ». В [18] «Предел обнаружения (detection limit) – наименьшее количество определяемого вещества в образце, которое может быть обнаружено, но необязательно точно количественно определено». В [19] «Предел обнаружения (LOD) или предел обнаружения метода (MDL) в общем случае представляют собой наименьшее количество или концентрацию аналита (вещество (компонент), содержание которого необходимо измерить [19]) в испытуемом образце, которые можно достоверно отличить от нуля для данной системы измерения» (предел обнаружения (LOD) или предел обнаружения метода (MDL) определяют с использованием соответствующих значений t -критерия Стьюдента и t -статистики [19]).

В [18,19] используется термин «предел количественного определения (quantitation limit)», близкий по смыслу понятию «предел обнаружения измеряемой величины» из [17]. В [18] «Предел количественного определения – наименьшее количество вещества в образце, которое можно количественно определить с соответствующей прецизионностью и правильностью». В [19]: «Предел количественного определения (LOQ) или расчетный предел количественного определения для заданной измерительной системы можно выразить как наименьшую концентрацию, которая может быть точно определена с заданной или допустимой погрешностью в условиях лабораторных испытаний. Предел внутрिलाбораторной прецизионности (допускаемое для принятой вероятности 95% расхождение между двумя результатами анализа, полученными в условиях внутрिलाбораторной прецизионности [20]) определяется как 10% относительное стандартное отклонение или выражается как постоянная величина, кратная (от 2 до 10) пределу обнаружения метода».

В Глоссарии МАГАТЭ по вопросам безопасности [21] и Руководстве МАГАТЭ по безопасности RS-G-1.8 [22]: Предел обнаружения или минимальная обнаруживаемая (детектируемая) активность (далее – МДА) (detection limit or minimum detectable activity): *Активность*, присутствующая в образце, создает скорость счета, которая может быть измерена (т. е. учтена в качестве превышающего фон значения) с определенным уровнем достоверности ($p = 1 - \beta$), обычно равным 0,95 (при $\beta = 0,05$). То есть образец, определенно обладающий минимальной обнаруживаемой активностью, может рассматриваться как не имеющий радиоактивности на протя-

жении 5% времени измерений. Скорость счета у образца, обладающего МДА, называется уровнем определения (determination level) [21].

Интерпретация результатов измерений

В табл.1, в соответствии с рекомендациями [17,23], представлен общий подход к интерпретации и представлению результатов измерений, необходимых для практических действий.

Табл.1. *Интерпретация результатов измерений [17,23].*

Условия	Представление результата измерений	Комментарий
$y < y^*$	$< y^*$	Эффект не обнаружен
$y^* < y < y\#$	$< y\#$	Эффект наблюдается, но не поддается количественной оценке с пределом обнаружения $y\#$
$y\# < y < 4 \cdot u_c(y)$	$\hat{y} \pm k \cdot u_c(\hat{y})$	Эффект идентифицирован и количественно определен в виде $\hat{y} \pm k \cdot u_c(\hat{y})$ как наилучшей оценки (best estimate) $y \pm k \cdot u_c(y)$. Наилучшие оценки \hat{y} активности y и связанной с ней стандартной неопределенности $u_c(\hat{y})$ определяются как: $\hat{y} = y + \frac{u_c(y)}{\omega \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{y^2}{2 \cdot u_c^2(y)}\right\}, \quad u_c(\hat{y}) = \sqrt{u_c^2(y) - (\hat{y} - y) \cdot \hat{y}}$ $\omega = \phi\left[y/u_c(y)\right] = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\frac{y}{u_c(y)}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cdot dt$ ω – значение кумулятивной функции распределения стандартизованного нормального распределения при $y/u_c(y)$:
$y > 4 \cdot u_c(y)$	$y \pm k \cdot u_c(y)$	Результат может быть представлен однозначно, как в (2), и не требует дополнительных пояснений

Требования к измерительной системе

Предел обнаружения измеряемой величины является важным критерием при выборе приборов и процедур измерения контролируемых величин с целью проведения радиологических исследований и определяется априори, то есть до проведения измерений.

Прежде чем проводить какие-либо измерения, необходимо доказать, что планируемые к использованию прибор и МИ обладают достаточной способностью обнаружения полезного сигнала, т. е. предел обнаружения $y\#$ метода контроля, включающего СИ и МИ, должен быть меньше принятого контрольного уровня y_{cl} .

Предел обнаружения $y\#$ зависит не только от конкретных характеристик СИ (эффективность регистрации, уровень фона, время интеграции и т. д.), но и от факторов, вовлеченных в процесс измерения, включающих геометрию и длительность цикла измерения, геометрическую форму и материал СОБ (влияющих на обратное рассеяние и самопоглощение гамма-квантов в материале образца), характеристики и конструкции низкофоновой защиты и др.

Решение о соответствии применяемых СИ и МИ требованиям к обнаружению определенного содержания радионуклида в контролируемом объекте, количественно выраженного его измеряемой активностью, принимается путем сравнения $y\#$ и y_{cl} . Если $y\# > y_{cl}$, то процедура измерения не подходит для намеченной цели с точки зрения установленных требований.

В рамках решаемой задачи – обоснования оптимального перечня контролируемых радионуклидов в выбросах ОИАЭ – пределы обнаружения $y^{\#}$ рекомендуется принимать на четыре порядка величины меньше предельной ОА радионуклида в выбросе, при которой может быть достигнут соответствующий НДВ. При этом значение величины $y^{\#}$ должно кратно (от двух до 10 раз) превосходить порог принятия решения y^* , что соответствует [19].

Такой подход качественно согласуется с рекомендациями RS-G-1.8 (пп. 6.27 и 6.28) [22].

В соответствии с RS-G-1.8 (п. 8.16) [22], процедуры по учету измерений y , которые находятся ниже $y^{\#}$, должны быть ясными и однозначными. Измерения $y < y^{\#}$ по радионуклидам, которые могут присутствовать в выбросах, необходимо учитывать на основе какой-либо части (например, $\delta = 0,50$) объема выброса, умноженной на предел обнаружения $y^{\#}$. Для подтверждения соответствия установленным ограничениям по выбросам неопределенности измерений выбросов учитываются с большим запасом в соответствии с RS-G-1.8 (п. 8.17) [22].

Применение результатов радиационных измерений

По результатам проведения радиационных измерений разобьем множество M на четыре подмножества: \tilde{M}_1 (мощность \tilde{N}_1), \tilde{M}_2 (мощность \tilde{N}_2), \tilde{M}_3 (мощность \tilde{N}_3) и \tilde{M}_4 (мощность \tilde{N}_4), таких что:

$$\tilde{M}_i \subseteq M, \tilde{M}_i \cap \tilde{M}_j \subset \emptyset, i \neq j, i, j = \overline{1,4}, \sum_{i=1}^4 \tilde{N}_i = N, \quad (4)$$

где: \tilde{M}_1 включает радионуклиды (с порядковым номером от 1 до \tilde{N}_1), для которых измеренное значение ОА y находится в диапазоне измерений, регламентированном в МИ и СИ (формула (2), пятая строчка в табл.1); \tilde{M}_2 включает радионуклиды (с порядковым номером от $\tilde{N}_1 + 1$ до $\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2$), для которых $y \in (y^{\#}, 4 \cdot u_c(y))$ (четвертая строчка в табл.1); \tilde{M}_3 включает радионуклиды (с порядковым номером от $\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2 + 1$ до $\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2 + \tilde{N}_3$), для которых $y < y^{\#}$ (третья строчка в табл.1); \tilde{M}_4 включает радионуклиды (с порядковым номером от $\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2 + \tilde{N}_3 + 1$ до N), для которых $y < y^*$ (вторая строчка в табл.1), то есть измерения не подтверждают присутствия этих радионуклидов в образцах (выбросах).

Исходя из рекомендаций Евратома [3] для российских АЭС и ППОЯТ, в первом приближении, в качестве \tilde{M}_4 можно принять:

$$\tilde{M}_4 = \begin{cases} M \setminus M_{EU(NPR)} & \text{для АЭС,} \\ M \setminus M_{EU(RP)} & \text{для ППОЯТ,} \end{cases} \quad (5)$$

где множества $M_{EU(NPR)}$ и $M_{EU(RP)}$ включают контролируемые радионуклиды в выбросах АЭС и ППОЯТ, соответственно, по версии [3].

Следует отметить, что мощности множества $M_{EU(NPR)}$ ($N_{EU(NPR)} = 47$) и $M_{EU(RP)}$ ($N_{EU(RP)} = 17$) соответственно в два и 5,5 раза меньше, чем мощность множества M ($N = 94$). Такой результат вполне объясним, исходя из подходов к формированию множества M , указанных выше и подробно описанных в [5]. Детальными расчетно-теоретическими и экспериментальными исследованиями такое решение можно уточнить для конкретного ОИАЭ исходя из конструктивных особенностей, специфики принятых проектных решений, системы защитных барьеров, систем очистки технологических сред и др.

Вклад в дозу от выбросов радионуклидов из подмножества \tilde{M}_4 не учитывается, то есть принимается равным нулю. Иначе говоря, $\tilde{M}_4 \subseteq M_2$.

Расчет дозы облучения от выбросов

Расчет годовой эффективной дозы облучения КГ от выбросов радионуклидов из множества M , проводится на основе выборочных значений случайных величин $\{Y_r\}$ (ОА радионуклидов из генеральной совокупности $r = \overline{1, N}$), полученных в результате серии экспериментов. Тогда статистика E_M , будучи функцией от выборочных значений ОА, сама является случайной переменной, значения которой могут изменяться от выборки к выборке.

Границы доверительного интервала для годовой эффективной дозы облучения КГ от выбросов радионуклидов из множества M (с доверительной вероятностью 95%) определяются как [6,9]:

$$E_M^{\triangleleft} = E_M - k \cdot u_c(E_M), \quad E_M^{\triangleright} = E_M + k \cdot u_c(E_M), \quad (6)$$

где:

$$E_M = E_{\tilde{M}_1} + E_{\tilde{M}_2} + E_{\tilde{M}_3}, \quad u_c^2(E_M) = u_c^2(E_{\tilde{M}_1}) + u_c^2(E_{\tilde{M}_2}), \quad (7)$$

$$E_{\tilde{M}_1}^{\triangleleft} = E_{\tilde{M}_1} - k \cdot u_c(E_{\tilde{M}_1}), \quad E_{\tilde{M}_1}^{\triangleright} = E_{\tilde{M}_1} + k \cdot u_c(E_{\tilde{M}_1}), \quad (8)$$

$$E_{\tilde{M}_2}^{\triangleleft} = E_{\tilde{M}_2} - k \cdot u_c(E_{\tilde{M}_2}), \quad E_{\tilde{M}_2}^{\triangleright} = E_{\tilde{M}_2} + k \cdot u_c(E_{\tilde{M}_2}), \quad (9)$$

$$E_{\tilde{M}_1} = \sum_{r=1}^{\tilde{N}_1} \Psi_r^{max} \cdot Q_r, \quad u_c^2(E_{\tilde{M}_1}) = \sum_{r=1}^{\tilde{N}_1} [\Psi_r^{max} \cdot V]^2 \cdot u_c^2(y_r), \quad (10)$$

$$E_{\tilde{M}_2} = \sum_{r=\tilde{N}_1+1}^{\tilde{N}_1+\tilde{N}_2} \Psi_r^{max} \cdot Q_r, \quad u_c^2(E_{\tilde{M}_2}) = \sum_{r=\tilde{N}_1+1}^{\tilde{N}_1+\tilde{N}_2} [\Psi_r^{max} \cdot V]^2 \cdot u_c^2(\hat{y}_r), \quad (11)$$

$$E_{\tilde{M}_3} = \delta \cdot \sum_{r=\tilde{N}_1+\tilde{N}_2+1}^{\tilde{N}_1+\tilde{N}_2+\tilde{N}_3} \Psi_r^{max} \cdot Q_r, \quad E_{\tilde{M}_4} = 0, \quad cov(Y_p, Y_q) = \delta_{pq}, \quad p, q = \overline{1, N}, \quad (12)$$

$$Q_r = \begin{cases} y_r \cdot V \text{ для радионуклидов из } \tilde{M}_1, r \in [1, \tilde{N}_1] \\ \hat{y}_r \cdot V \text{ для радионуклидов из } \tilde{M}_2, r \in [\tilde{N}_1 + 1, \tilde{N}_1 + \tilde{N}_2] \\ y_r^{\#} \cdot V \text{ для радионуклидов из } \tilde{M}_3, r \in [\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2 + 1, N - \tilde{N}_4] \\ 0 \text{ для радионуклидов из } \tilde{M}_4, r \in [\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2 + \tilde{N}_3 + 1, N] \end{cases}, \quad (13)$$

$$[y_r] = [\hat{y}_r] = [y_r^{\#}] = \text{Бк} \cdot \text{м}^{-3},$$

где:

- $E_M, E_{\tilde{M}_1}, E_{\tilde{M}_2}, E_{\tilde{M}_3}$ – рассчитанное значение дозы по выборочным значениям ОА радионуклидов соответственно из множества $M, \tilde{M}_1, \tilde{M}_2, \tilde{M}_3$ [6];

- $u_c(E_M), u_c(E_{\tilde{M}_1}), u_c(E_{\tilde{M}_2})$ – оценка суммарной стандартной неопределенности результата расчета (по измерениям) величины $E_M, E_{\tilde{M}_1}, E_{\tilde{M}_2}$, соответственно;

- $E_M^{\triangleleft}, E_M^{\triangleright}$ – нижняя и верхняя граница доверительного интервала для годовой эффективной дозы облучения КГ от выбросов радионуклидов из множества M , соответственно, Зв/год;

- $E_{\tilde{M}_1}^{\triangleleft}, E_{\tilde{M}_1}^{\triangleright}$ – нижняя и верхняя граница доверительного интервала для годовой эффективной дозы облучения КГ от выбросов радионуклидов из множества \tilde{M}_1 , соответственно, Зв/год;

- $E_{\tilde{M}_2}^{\triangleleft}, E_{\tilde{M}_2}^{\triangleright}$ – нижняя и верхняя граница доверительного интервала для годовой эффективной дозы облучения КГ от выбросов радионуклидов из множества \tilde{M}_2 , соответственно, Зв/год;

- δ_{pq} – символ Кронекера ($\delta_{pq} = 1$, если $p = q$ и $\delta_{pq} = 0$, если $p \neq q$);

- Q_r – годовой выброс радионуклида r из множества M , Бк/год;

- Ψ_r^{max} – максимальное значение функции перехода, связывающей годовой выброс радионуклида r с годовой эффективной дозой облучения КГ, Зв/Бк;

- V – среднегодовой расход воздуха из источника, м³/год.

Будем полагать, что элементы (радионуклиды) каждого подмножества $\{\tilde{M}_i\}$ упорядочены таким образом, что вклад радионуклида в дозу тем больше, чем меньше его порядковый номер.

Рассмотрим три варианта формирования подмножества $M_I \subseteq M$, основанные на включении в процесс принятия решений различных составляющих результатов измерений (измеренное значение и границы доверительного интервала) для расчета годовой эффективной дозы облучения КГ от выбросов радионуклидов из множества M .

Вариант № 1

Применим установленный в [2] критерий к результату расчета величины E_M на основе выборочных значений ОА радионуклидов из генеральной совокупности (множество M).

Для решения поставленной задачи используем значения величин $E_M, E_{\tilde{M}_1}, E_{\tilde{M}_2}$ и $E_{\tilde{M}_3}$, расчет которых проводится по формулам (7)–(13).

Вклад каждой группы (подмножества) радионуклидов $\{\tilde{M}_i\}$ в значение величины E_M рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon_{\tilde{M}_i} = \frac{E_{\tilde{M}_i}}{E_M}, \quad i = \overline{1,3}, \quad \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{\tilde{M}_i} = 1. \quad (14)$$

В рамках принятого варианта можно предложить следующую процедуру формирования подмножества $M_{I(l)}$ (мощностью $N_{I(l)}$) как M_I .

1.1. Если $\varepsilon_{\tilde{M}_1} > \varepsilon$, находим минимальное число $N_{I(l)}$ из условия:

$$(E_M)^{-1} \cdot \sum_{r=1}^{N_{I(l)}} \Psi_r^{max} \cdot y_r \cdot V \geq \varepsilon, \quad N_{I(l)} \leq \tilde{N}_1. \quad (15)$$

Подмножество $M_{I(l)}$ формируется из первых $N_{I(l)}$ элементов (радионуклидов) подмножества \tilde{M}_1 .

1.2. Если $\varepsilon_{\tilde{M}_3} < 1 - \varepsilon$, находим минимальное число $N_{I(l)}$ из условия:

$$\varepsilon_{\tilde{M}_1} + (E_M)^{-1} \cdot \sum_{r=\tilde{N}_1+1}^{N_{I(l)}} \Psi_r^{max} \cdot \hat{y}_r \cdot V \geq \varepsilon, \quad \tilde{N}_1 < N_{I(l)} \leq \tilde{N}_1 + \tilde{N}_2. \quad (16)$$

Подмножество $M_{I(l)}$ формируется из первых $N_{I(l)}$ элементов (радионуклидов) подмножества $\tilde{M}_{1,2} = \tilde{M}_1 \cup \tilde{M}_2$.

1.3. Если $\varepsilon_{\tilde{M}_3} > 1 - \varepsilon$, находим минимальное число $N_{I(l)}$ из условия:

$$\frac{\delta}{E_M} \cdot \sum_{r=N_{I(l)}+1}^{N-\tilde{N}_4} \Psi_r^{max} \cdot y_r^\# \cdot V \leq 1 - \varepsilon. \quad (17)$$

Подмножество $M_{I(l)}$ формируется из первых $N_{I(l)}$ элементов (радионуклидов) подмножества $\tilde{M}_{1,2,3} = \tilde{M}_{1,2} \cup \tilde{M}_3$.

Существенным недостатком рассмотренного варианта, на наш взгляд, является не учет неопределенностей измерений ОА радионуклидов в выбросе.

Вариант № 2

Применим установленный в [2] критерий к верхней границе доверительного интервала для годовой эффективной дозы облучения населения E_M^\triangleright за счет выбросов радионуклидов из множества M .

Такой подход вполне оправдан, когда перечень радионуклидов из подмножества M_I планируется использовать для получения верхних (консервативных) оценок дозы от выбросов ОИАЭ

с целью установления НДВ, размеров санитарно-защитной зоны, сопоставления с нормативными значениями, например, с пределом дозы для населения или квотой (часть предела дозы, установленная для ограничения облучения населения от конкретного техногенного источника излучения и пути облучения [7]; в рекомендациях МКРЗ и стандартах МАГАТЭ используется термин «границная доза»; согласно Руководствам по безопасности МАГАТЭ № GSG-8 и № GSG 9 граничные дозы для облучения населения устанавливаются ниже предела эффективной дозы и выше минимально значимой дозы, установленной в [7,24] в качестве нижней границы дозы при оптимизации радиационной защиты населения). Особенность предлагаемого варианта формирования подмножества M_I состоит в учете неопределенностей измерений. При этом вклад выброса радионуклида в $E_M^{\text{п}}$ при прочих равных условиях тем больше, чем больше неопределенность измерения его ОА. Большие неопределенности измерений объективно приводят к необоснованному завышению значений величины $E_M^{\text{п}}$ и, как следствие, могут при определенных обстоятельствах приводить к несоблюдению установленных дозовых критериев или НДВ. Повышение точности измерений, кроме снижения излишнего консерватизма в оценках годовой дозы от выбросов, объективно способствует более адекватному формированию подмножества M_I .

Вклад каждой группы (подмножества) радионуклидов $\{\tilde{M}_i\}$ в значение величины $E_M^{\text{п}}$ рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon_{\tilde{M}_1}^{\text{п}} = \frac{E_{\tilde{M}_1}^{\text{п}}}{E_M^{\text{п}}}, \quad \varepsilon_{\tilde{M}_2}^{\text{п}} = \frac{E_{\tilde{M}_2}^{\text{п}}}{E_M^{\text{п}}}, \quad \varepsilon_{\tilde{M}_3}^{\text{п}} = \frac{E_{\tilde{M}_3}^{\text{п}}}{E_M^{\text{п}}}, \quad \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{\tilde{M}_i}^{\text{п}} = 1. \quad (18)$$

В рамках второго варианта можно предложить следующую процедуру формирования подмножества $M_{I(2)}$ (мощностью $N_{I(2)}$) как M_I .

2.1. Если $\varepsilon_{\tilde{M}_1}^{\text{п}} > \varepsilon$, находим минимальное число $N_{I(2)}$ из условия:

$$\frac{1}{E_M^{\text{п}}} \cdot \left\{ \sum_{r=1}^{N_{I(2)}} \Psi_r^{\text{max}} \cdot y_r \cdot V + k \cdot \sqrt{\sum_{r=1}^{N_{I(2)}} [\Psi_r^{\text{max}} \cdot V]^2 \cdot u_c^2(y_r)} \right\} \geq \varepsilon. \quad (19)$$

Подмножество $M_{I(2)}$ формируется из первых $N_{I(2)}$ элементов (радионуклидов) подмножества \tilde{M}_I .

2.2. Если $\varepsilon_{\tilde{M}_3} < 1 - \varepsilon$, находим минимальное число $N_{I(2)}$ из условия:

$$\varepsilon_{\tilde{M}_1}^{\text{п}} + \frac{1}{E_M^{\text{п}}} \cdot \left\{ \sum_{r=\tilde{N}_I+1}^{N_{I(2)}} \Psi_r^{\text{max}} \cdot \hat{y}_r \cdot V + k \cdot \sqrt{u_c^2(E_{\tilde{M}_1}) + \sum_{r=\tilde{N}_I+1}^{N_{I(2)}} [\Psi_r^{\text{max}} \cdot V]^2 \cdot u_c^2(\hat{y}_r)} \right\} \geq \varepsilon. \quad (20)$$

Подмножество $M_{I(2)}$ формируется из первых $N_{I(2)}$ элементов (радионуклидов) подмножества $\tilde{M}_{I,2} = \tilde{M}_I \cup \tilde{M}_2$.

2.3. Если $\varepsilon_{\tilde{M}_3}^{\text{п}} > 1 - \varepsilon$, находим минимальное число $N_{I(2)}$ из условия:

$$\frac{\delta}{E_M^{\text{п}}} \cdot \sum_{r=N_{I(2)}+1}^{N-\tilde{N}_4} \Psi_r^{\text{max}} \cdot V \leq 1 - \varepsilon. \quad (21)$$

Подмножество $M_{I(2)}$ формируется из первых $N_{I(2)}$ элементов (радионуклидов) подмножества $\tilde{M}_{I,2,3} = \tilde{M}_{I,2} \cup \tilde{M}_3$.

К недостаткам рассмотренного варианта следует отнести то обстоятельство, что при формировании подмножества M_I предпочтение, при прочих равных условиях, будет отдаваться радионуклидам, для которых неопределенность измерения ОА в выбросе будет больше. Это может

привести к необоснованному исключению из подмножества M_I радионуклидов с относительно небольшой неопределенностью измерений ОА.

Вариант № 3

Применим установленный в [2] критерий к нижней границе доверительного интервала для годовой эффективной дозы облучения населения E_M^{\triangleleft} от выбросов радионуклидов из множества M .

Такой подход может быть актуален, когда перечень радионуклидов из подмножества M_I планируется использовать для получения нижней оценки дозы или в том случае, когда представляется целесообразным увязать вклад радионуклида в дозу с точностью измерения его ОА в выбросе. Особенность рассматриваемого варианта формирования подмножества M_I состоит в таком учете неопределенностей измерений, при котором вклад выброса радионуклида в дозу при прочих равных условиях тем больше, чем меньше неопределенность измерения его ОА.

Большие неопределенности измерений объективно приводят к необоснованному снижению значений величины E_M^{\triangleleft} , что может привести к недооценке ряда негативных факторов, влияющих на облучение человека. Как и при втором варианте, повышение точности измерений ОА объективно способствует более адекватному формированию подмножества M_I .

Вклад каждой группы (подмножества) радионуклидов $\{\tilde{M}_i\}$ в значение величины E_M^{\triangleleft} рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon_{\tilde{M}_1}^{\triangleleft} = \frac{E_{\tilde{M}_1}^{\triangleleft}}{E_M^{\triangleleft}}, \quad \varepsilon_{\tilde{M}_2}^{\triangleleft} = \frac{E_{\tilde{M}_2}^{\triangleleft}}{E_M^{\triangleleft}}, \quad \varepsilon_{\tilde{M}_3}^{\triangleleft} = \frac{E_{\tilde{M}_3}^{\triangleleft}}{E_M^{\triangleleft}}, \quad \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{\tilde{M}_i}^{\triangleleft} = 1. \quad (22)$$

В рамках этого варианта можно предложить следующую процедуру формирования подмножества $M_{I(3)}$ (мощностью $N_{I(3)}$) как M_I .

3.1. Если $\varepsilon_{\tilde{M}_1}^{\triangleleft} > \varepsilon$, находим минимальное число $N_{I(3)}$ из условия:

$$\frac{1}{E_M^{\triangleleft}} \cdot \left\{ \sum_{r=1}^{N_{I(3)}} \Psi_r^{\max} \cdot y_r \cdot V - k \sqrt{\sum_{r=1}^{N_{I(3)}} [\Psi_r^{\max} \cdot V]^2 \cdot u_c^2(y_r)} \right\} \geq \varepsilon. \quad (23)$$

Подмножество $M_{I(3)}$ формируется из первых $N_{I(3)}$ элементов (радионуклидов) подмножества \tilde{M}_1 .

3.2. Если $\varepsilon_{\tilde{M}_3} > 1 - \varepsilon$, находим минимальное число $N_{I(3)}$ из условия:

$$\varepsilon_{\tilde{M}_1}^{\triangleleft} + \frac{1}{E_M^{\triangleleft}} \cdot \left\{ \sum_{r=\tilde{N}_1+1}^{N_{I(3)}} \Psi_r^{\max} \cdot \hat{y}_r \cdot V - k \cdot \sqrt{u_c^2(E_{\tilde{M}_1}) + \sum_{r=\tilde{N}_1+1}^{N_{I(3)}} [\Psi_r^{\max} \cdot V]^2 \cdot u_c^2(\hat{y}_r)} \right\} \geq \varepsilon. \quad (24)$$

Подмножество $M_{I(3)}$ формируется из первых $N_{I(3)}$ элементов (радионуклидов) подмножества $\tilde{M}_{1,2} = \tilde{M}_1 \cup \tilde{M}_2$.

3.3. Если $\varepsilon_{\tilde{M}_3}^{\triangleleft} > 1 - \varepsilon$, находим минимальное число $N_{I(3)}$ из условия:

$$\frac{\delta}{E_M^{\triangleleft}} \cdot \sum_{r=N_{I(3)}+1}^{N-\tilde{N}_4} \Psi_r^{\max} \cdot y_r^{\#} \cdot V \leq 1 - \varepsilon. \quad (25)$$

Подмножество $M_{I(3)}$ формируется из первых $N_{I(3)}$ элементов (радионуклидов) подмножества $\tilde{M}_{1,2,3} = \tilde{M}_{1,2} \cup \tilde{M}_3$.

В рамках этого варианта при формировании подмножества M_I предпочтение, при прочих равных условиях, будет отдаваться радионуклидам с наименьшей неопределенностью измерений ОА.

Совместное рассмотрение трех вариантов позволяет объективно оценить влияние неопределенностей измерений как на дозу облучения, так и на характеристики (перечень элементов и мощность) подмножества M_I .

Исходя из соображений консерватизма, предлагается принять $M_I = M_{I(1)} \cup M_{I(2)} \cup M_{I(3)}$. Это означает, что M_I содержит все элементы из $M_{I(1)}$, $M_{I(2)}$ и $M_{I(3)}$. В этом случае в процесс формирования подмножества M_I включены все составляющие результатов измерений контролируемых величин (измеренное значение и границы доверительного интервала) и практически исключается необоснованное сокращение перечня радионуклидов, контролируемых в выбросе ОИАЭ. Когда это обоснованно, возможно, в качестве M_I принимать одно из рассмотренных подмножеств $\{M_{I(i)}\}$ или их подходящее объединение.

Выводы

Разработан и обоснован корректный подход к формированию оптимального перечня контролируемых (нормируемых) радионуклидов $M_I \subseteq M$ в выбросе ОИАЭ в атмосферу на основе выборочных значений случайных величин (ОА радионуклидов из генеральной совокупности M), полученных в результате серии экспериментов, с учетом требований нормативных документов [1,2]. Этот подход является развитием способа, рекомендованного в РБ-106-21 [6].

Особенность предложенного подхода состоит в корректном вовлечении в процесс принятия решений результатов измерений контролируемой величины, находящихся как в пределах диапазона измерений, так и за пределами нижней границы этого диапазона, регламентированного МИ и СИ.

Рассмотрены три варианта формирования подмножества $M_I \subseteq M$, основанные на включении в процесс принятия решений различных составляющих результатов измерений (измеренное значение и границы доверительного интервала) для расчета годовой эффективной дозы облучения КГ от выбросов радионуклидов из множества M . Совместное рассмотрение этих вариантов позволяет объективно оценить влияние неопределенностей измерений как на дозу, так и на характеристики (перечень элементов и мощность) подмножества M_I .

В рамках каждого варианта предложены процедуры формирования подмножества $M_{I(i)} (i = \overline{1,3})$ как оценки искомого подмножества M_I .

Исходя из соображений консерватизма, предлагается принять $M_I = M_{I(1)} \cup M_{I(2)} \cup M_{I(3)}$. В этом случае практически исключается необоснованное сокращение перечня радионуклидов, контролируемых в выбросе ОИАЭ. Когда это обосновано, возможно, в качестве M_I принимать одно из рассмотренных подмножеств $\{M_{I(i)}\}$ или их подходящее объединение.

Предложенный подход может быть учтен при плановом пересмотре РБ-106-21 [6] для расчета и обоснования НДВ и рекомендуется к практическому использованию при формировании перечня контролируемых (нормируемых) радионуклидов в выбросе ОИАЭ в атмосферный воздух.

Указанный подход предлагается также распространить (с известными корректировками) для обоснования перечня контролируемых радионуклидов в сбросах ОИАЭ в водные системы и удаляемых радиоактивных отходов ОИАЭ.

Литература

1. Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды и признании утратившими силу некоторых постановлений Правительства РФ: распоряжение Правительства РФ от 20.10.2023 № 2909-р.
2. Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух (ПДВ-2012): утв. приказом Ростехнадзора от 07.11.2012 № 639.
3. Commission recommendation of 18 December 2003 on standardized information on radioactive airborne and liquid discharges into the environment from nuclear power reactors and reprocessing plants in normal operation (2004/2/Euratom), Official journal of the European Union, no. 6.1.2004, pp. 36-46, 2004.
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Clearance of materials resulting from the use of radionuclides in medicine, industry and research, IAEA-TECDOC-1000, IAEA, Vienna, 1998.
5. Курьиндин А.В., Шаповалов А.С., Строганов А.А., Орлов М.Ю., Тимофеев Н.Б., Коршунков А.В., Поляков Р.М., Никитин Д.А. Методическое пособие по вопросам регулирования выбросов и сбросов радиоактивных веществ в окружающую среду: 2-е издание, переработанное и дополненное. Труды «НТЦ ЯРБ». М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2023. 449 с.
6. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. РБ-106-21: утв. приказом Ростехнадзора от 30.08.2021 № 288.
7. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. ОСПОРБ-99/2010. Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 № 40.
8. Метрологические требования к измерениям, эталонам единиц величин, стандартным образцам, средствам измерений, их составным частям, программному обеспечению, методикам (методам) измерений, применяемых в области использования атомной энергии. Утв. приказом Госкорпорации «Росатом» от 31.10.2013 № 1/10-НПА.
9. МИ 2453-2015. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики радиационного контроля. Общие требования. Утв. ФГУП «ВНИИФТРИ» 30.12.2015.
10. ГОСТ 8.638-2013. Межгосударственный стандарт. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения. Введен в действие приказом Росстандарта от 13.03.2014 № 138-ст, введен впервые. Дата введения 01.07.2015. М.: Стандартинформ, 2014.
11. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. РМГ 29-2013. Введены в действие приказом Росстандарта от 05.12.2013 № 2166-ст.
12. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Межгосударственный стандарт. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Введен в действие приказом Росстандарта от 12.09.2017 № 1065-ст, введен впервые. Дата введения 01.09.2018. М.: Стандартинформ, 2017.
13. Викторов Л.В., Денисов Е.И., Кунцевич Г.А., Петров В.Л., Шеин А.С. Особенности определения минимальной детектируемой активности // АНРИ. 2023. № 3(114). С. 19-25.
14. Исаев А.Г., Бабенко В.В., Казимиров А.С., Гришин С.Н., Иевлев С.М. Минимальная детектируемая активность. Основные понятия и определения // АНРИ. 2010. № 2(61). С. 15-20.
15. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. М.: Издательство иностранной литературы, 1963.

16. A. Lloyd Currie, «Limits for qualitative detection and quantitative determination», *Analytical Chemistry*, vol. 40, no. 3, 1968, pp. 586-593.
17. ISO 11929-4:2022(E) Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the coverage interval) for measurements of ionizing radiation – Fundamentals and application – Part 4: Guidelines to applications, ISO, 2022.
18. Об утверждении Руководства по валидации аналитических методик проведения испытаний лекарственных средств: решение Коллегии Евразийской экономической комиссии от 17.07.2018 № 113.
19. ГОСТ IEC 62321-7-1-2022. Межгосударственный стандарт. Определение регламентированных веществ в электротехнических изделиях. Часть 7-1. Хром шестивалентный. Определение хрома шестивалентного Cr(VI) в защитных покрытиях металлов колориметрическим методом. Введен в действие приказом Росстандарта от 03.04.2024 № 402-ст, введен впервые, дата введения 01.07.2025. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2024.
20. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки. РМГ 61-2010. Введены в действие приказом Росстандарта от 13.12.2011 № 1064-ст.
21. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Nuclear safety and security glossary. Terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection and emergency preparedness and response 2022 (Interim) edition, IAEA, Vienna, 2022.
22. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Environmental and source monitoring for purposes of radiation protection, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.8, IAEA, Vienna, 2005.
23. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Determination and interpretation of characteristic limits for radioactivity measurements, IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series. № 48, IAEA, Vienna, 2017.
24. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009. Утв. постановлением Главного государственного врача РФ от 07.07.2009 № 47.

Justification of the List of Radionuclides Subject to Limitation in Airborne Discharges from Nuclear Facilities into the Atmosphere

Kuryndin Anton, Ivanov Evgeniy, Shapovalov Albert, Timofeev Nikolai (Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia)

Abstract. A correct approach to the formation of an optimal list of controlled (subject to limitation) radionuclides in airborne discharges from nuclear facilities into the atmosphere has been developed and substantiated based on sample values of random variables (volumetric activities of radionuclides) obtained as a result of a series of experiments, considering the requirements of regulatory documents. The peculiarity of the proposed approach is the full involvement in the decision-making process of the results of measurements of the values of the controlled quantity, located both within the measurement range and beyond the lower limit of this range, regulated by the methods and means of measurement, as well as indicators of the reliability of radiation monitoring.

Keywords: *radioactive substances, airborne discharges, limitation of airborne discharges, atmospheric air, nuclear facilities, radiation monitoring.*

А.В.Курьиндин (к.т.н., зам. директора), А.С.Шаповалов (нач. отд.), Е.А.Иванов (к.т.н., с.н.с., гл.н.с.), Н.Б.Тимофеев (нач. лаб.)

Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), г. Москва

Контакты: +7 (499) 264-71-13; ivanov@secnrs.ru, kuryndin@secnrs.ru, shapovalov@secnrs.ru, ntimofeev@secnrs.ru