

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-40-47>

УДК: 621.039:631.438:539.166:539.1.074

## ТРЕХМЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОЛЕЙ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЛЛИМИРУЮЩЕЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА

Ю. Е. Артамонов\*, П. Е. Кривицкий, А. А. Чернов, Ф. Ф. Жамалдинов, В. В. Божко

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

\*E-mail для контактов: artamonov@nnc.kz

В статье представлены результаты оценки комплексного подхода к трехмерной характеристике радиоактивного загрязнения в пространстве, позволяющего в режиме реального времени строить модели с полями радиоактивного загрязнения местности и объектов. Целью исследования являлась проверка эффективности более сложного комплексного подхода к изучению радиационной обстановки в основе которого лежит традиционный метод гамма-спектрометрической съемки. Научный интерес представляла также оценка возможности разграничения пространства с использованием коллимирующей защиты  $\gamma$ -спектрометра с целью осуществления трехмерной характеристики радиоактивного загрязнения. В результате установлено, что угловое и горизонтальное коллимирование  $\gamma$ -детектора позволяет разграничить пространство как по высоте, так и по направлениям. В сравнении с предлагаемым подходом существуют более оперативные методы локализации радиоактивного загрязнения, такие как традиционная гамма-съемка, с использованием же комплексного подхода становится возможным не только определение места расположения источника радиоактивного загрязнения, но и получение сведений о качественном и количественном содержании естественных и искусственных радионуклидов пространстве, которые в свою очередь могут лечь в основу трехмерной модели пространственного распределения радиоактивного загрязнения. Исследуемый подход имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными методами радиационного обследования, однако эффективен в работе с высокоактивными источниками радиоактивного загрязнения, активность которых не менее  $9,5 \cdot 10^3$  Бк.

**Ключевые слова:**  $\gamma$ -спектрометрия, горизонтальное и угловое коллимирование, трехмерная характеристика радиоактивного загрязнения.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем в области контроля радиационной обстановки вокруг предприятий ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) является отсутствие инструментальных, позволяющих оперативно определять уровни и границы радиоактивного загрязнения, в случае возникновения нештатных радиационных ситуаций. В большинстве случаев контроль осуществляется посредством лабораторного анализа проб окружающей среды, отобранных в контрольных точках, установленных самим предприятием [1, 2]. Такой метод, как правило, требует длительного времени на проведение всех необходимых анализов, и, как следствие, теряется оперативность контроля, а значит и своевременное реагирование на возможный инцидент. В этой связи, актуальной задачей является отработка и внедрение методов и вариантов контроля, позволяющих в краткие сроки получить достоверную информацию о радиоактивном загрязнении, определить его характер и уровни, с высокой точностью выявить локальные очаги загрязнения.

В данной статье предлагается комплексный подход к изучению радиационной обстановки на основе  $\gamma$ -спектрометрического метода, оптимизированный под условия необходимости проведения первичной оценки масштабов радиоактивного загрязнения на предприятиях ЯТЦ [3]. Комплексный подход заключается в проведении  $\gamma$ -спектрометрических измерений с использованием горизонтальной и угловой кол-

лимирующей защиты для детектора и возможностью в режиме реального времени строить карты с полями радиоактивного загрязнения местности и объектов. Измерения при этом представляют из себя последовательный набор  $\gamma$ -спектров в контрольных измерительных точках, образующих сеть радиационного обследования объекта, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости.

Данный подход дает возможность разграничить пространство за счет коллимации детектора и получить сведения о содержании естественных и искусственных радионуклидов в пространстве, осуществлять поиск и локализацию источников радиоактивного загрязнения. Гамма-спектрометрическая съемка при таком подходе может осуществляться по принципу геодезического 3-D сканирования или в совокупности с ним, что в свою очередь позволит строить детализированные 3-D модели, открывающие широкие возможности для характеристики радиационной обстановки и обеспечения оперативности принятия конкретных управленческих решений при эксплуатации ядерно- и радиационно-опасных объектов предприятий ЯТЦ, а также радиационно-загрязненных территорий [4].

### 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения измерений  $\gamma$ -детектор с горизонтальным коллиматором последовательно фиксируется в контрольных точках на разных высотных уровнях с шагом в N см, на каждом уровне осуществляется набор и

запись  $\gamma$ -спектров с интервалом в N секунд. Данные параметры набора могут регулироваться и подстраиваться под цели и задачи радиационного обследования. Шаг измерений будет зависеть от таких условий как объем детектора, размер коллимационного окна в защите детектора, а также предполагаемые размеры искомых источников радиоактивного загрязнения. При этом чем больше время набора  $\gamma$ -спектров и количество точек измерений, тем полнее и информативнее будет картина радиоактивного загрязнения. После обнаружения высотной метки с аномальной интенсивностью  $\gamma$ -импульсов, на  $\gamma$ -детектор устанавливается угловой коллиматор и производятся поворотные измерения с вращением  $\gamma$ -детектора вокруг своей оси с интервалом в  $N^\circ$ , угол вращения при этом также будет обусловлен размерами коллимационного окна защиты детектора. Использование угловой и горизонтальной коллимирующей защиты для  $\gamma$ -детектора позволяет разграничить пространство как по высоте, так и по направлениям, вследствие чего становится возможным определение места расположения источника радиоактивного загрязнения. Далее производится детектирование  $\gamma$ -полей, излучаемых радиоактивным источником и на основе полученных данных, строится 3-D модель пространственного распределения радиоактивного загрязнения.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Поиск и локализация источника радиоактивного загрязнения

При проведении исследований использовался  $\gamma$ -спектрометр со сцинтилляционным детектором на основе кристалла бромид лантана ( $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ). Разработанный метод апробирован в экспериментальных условиях, представляющих собой помещение со сторонами  $3 \times 7$  м, в котором на разной высоте размещены радиоактивные источники. Пробы радиоактивного грунта массой по 50 кг, выступающие в качестве данных источников, содержат в своем составе  $\gamma$ -излучающие радионуклиды  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ . Источник № 1 расположен на высоте 20-60 см, источник № 2 – на высоте 120–160 см от поверхности земли.

Схема расположения радиоактивных источников представлена на рисунке 1.

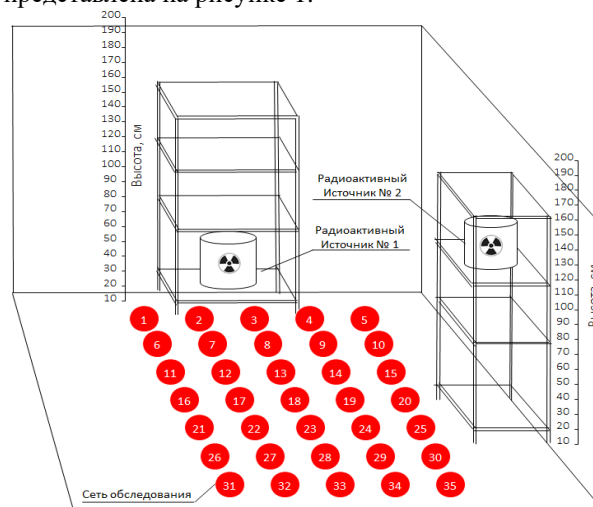


Рисунок 1. Схема расположения радиоактивных источников в экспериментальном помещении

Гамма-спектрометрические измерения проведены в 3 контрольных точках на разных высотных уровнях с интервалом в 10 см и с использованием горизонтальной коллимирующей защиты для  $\gamma$ -спектрометра. Полученный результат представлен в виде графика на рисунке 2.

Измерения, проведенные в контрольной точке № 18, расположенной в центре сети обследования, выявили ожидаемое аномальное повышение интенсивности  $\gamma$ -импульсов  $^{137}\text{Cs}$  в диапазоне высот, на которых расположены радиоактивные источники № 1 и № 2, однако по линии  $^{152}\text{Eu}$  и  $^{241}\text{Am}$  очевидных пиков интенсивности не выявлено.

После чего на  $\gamma$ -спектрометр установлена угловая коллимирующая защита и в этой же точке выполнены поворотные измерения с шагом вращения  $\gamma$ -детектора  $45^\circ$  на высотах ожидаемой аномальной интенсивности  $\gamma$ -импульсов 50 и 150 см. Результаты измерений представлены в виде диаграмм на рисунках 3, 4).

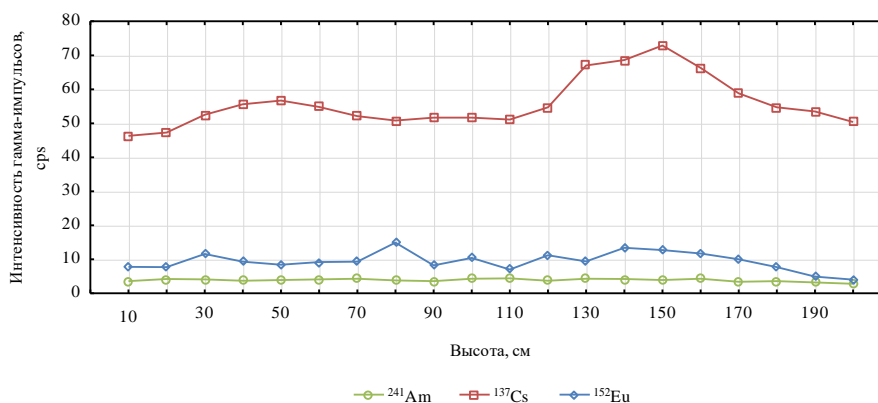


Рисунок 2. Интенсивность  $\gamma$ -импульсов (cps)  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  на разных высотных уровнях в контрольной точке №18

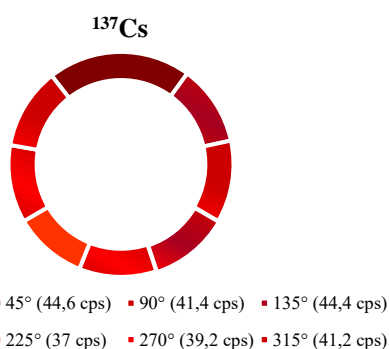


Рисунок 3. Интенсивность  $\gamma$ -импульсов (cps)  $^{137}\text{Cs}$  в контрольной точке № 18 по разным направлениям на высоте 50 см

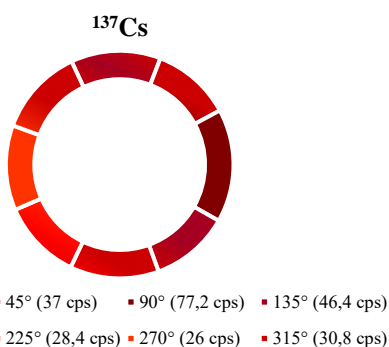


Рисунок 4. Интенсивность  $\gamma$ -импульсов (cps)  $^{137}\text{Cs}$  в контрольной точке № 18 по разным направлениям на высоте 150 см

Посредством проведённых измерений, ориентируясь на максимальные значения интенсивности  $\gamma$ -импульсов  $^{137}\text{Cs}$  определены направления залегания радиоактивных источников 0° (источник № 1) и 90° (источник № 2).

Далее выполнены проверочные  $\gamma$ -спектрометрические измерения в контрольных точках № 24 и № 8, расположенных рядом с предполагаемыми источниками радиоактивного загрязнения, которые подтвердили тот факт, что источники локализованы верно.

Результаты проверочных высотных и поворотных измерений в контрольных точках № 24 и № 8 представлены на рисунках 5–8.

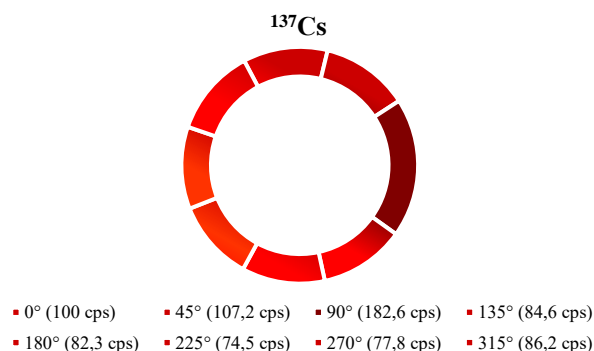


Рисунок 6. Интенсивность  $\gamma$ -импульсов (cps)  $^{137}\text{Cs}$  в контрольной точке № 24 по разным направлениям на высоте 150 см

На графиках высотного распределения интенсивности  $\gamma$ -импульсов (рисунки 2, 5, 7) видно, что максимальное количество импульсов (cps) по  $^{137}\text{Cs}$  зафиксировано именно в том диапазоне высот, на котором и были заведомо размещены радиоактивные источники, т.е. от 20 до 60 см для источника № 1 и от 120 до 160 см для источника № 2 соответственно. Диаграммы при этом демонстрируют повышение интенсивности  $\gamma$ -импульсов (cps) по  $^{137}\text{Cs}$  в направлении расположения радиоактивных источников относительно контрольных точек сети обследования, а именно 0° для источника № 1 и 90° для источника № 2 соответственно.

Для получения первичной картины радиационной обстановки и локализации источников загрязнения в нашем случае оказалось достаточно 3 контрольных точек. Если условно представить, что расположение источников неизвестно, то измерения в центральной точке сети обследования № 18 позволили бы определить высоту и направление залегания источника, а измерения в точках № 8 и № 24 локализовали источник.

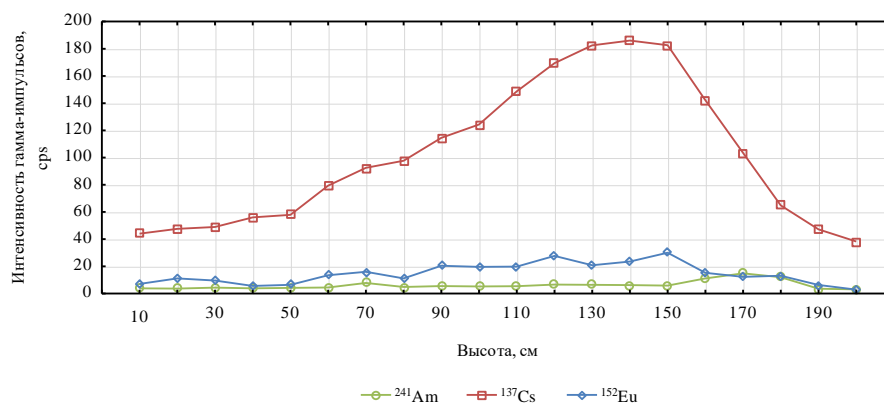


Рисунок 5. Интенсивность  $\gamma$ -импульсов (cps)  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  на разных высотных уровнях в контрольной точке № 24

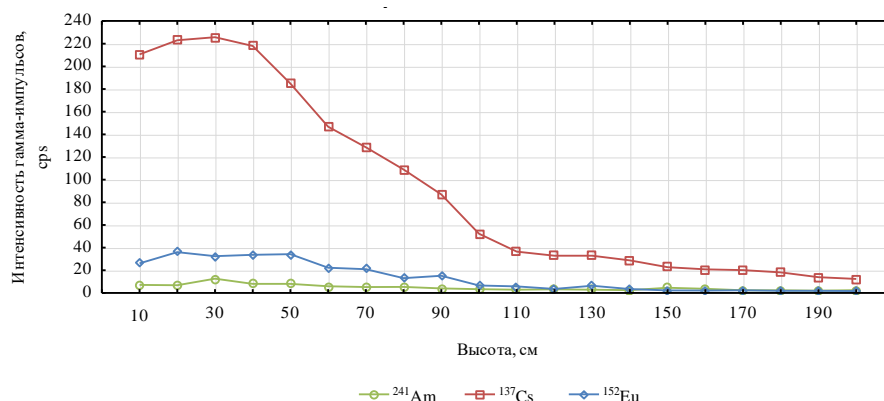


Рисунок 7. Интенсивность  $\gamma$ -импульсов (cps)  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  на разных высотных уровнях в контрольной точке № 24

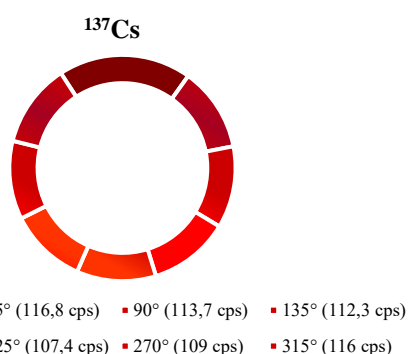


Рисунок 8. Интенсивность  $\gamma$ -импульсов (cps)  $^{137}\text{Cs}$  в контрольной точке № 8 по разным направлениям на высоте 50 см

Количество точек в сети обследования может варьироваться в зависимости от целей обследования, характера, и масштабов загрязнения. После того как источники были условно локализованы, проведены измерения в ближайших от источника точках.

### Трехмерная характеристика пространственного распределения радиоактивного загрязнения

Измерения в контрольных точках № 1-5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 на разных высотных уровнях проведены с целью детектирования  $\gamma$ -полей, излучаемых источниками с последующей их трехмерной визуализацией. По результатам измерений построены 3-D модели пространственного распределения радиоактивного загрязнения в экспериментальном помещении (рисунки 9–11).

Полученные результаты (см. рисунки 9–11) свидетельствуют о возможности визуализации распределения радиоактивного загрязнения в пространстве как по общей интенсивности  $\gamma$ -импульсов радионуклидов  $^{152}\text{Eu}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , так и по интенсивности излучения отдельных радионуклидов с наглядным представлением границ очагов загрязнения. Для получения более детальной картины загрязнения можно разбить пространство на большее количество контрольных точек.

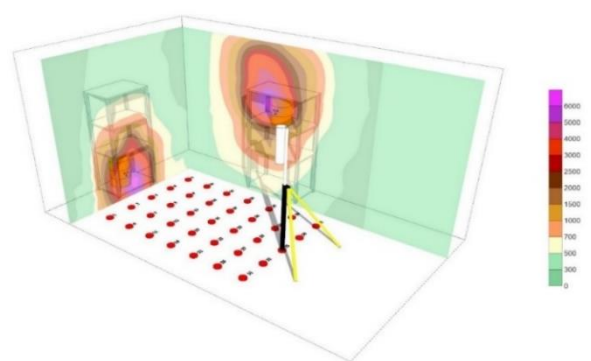


Рисунок 9. Трехмерная модель пространственного распределения радиоактивного загрязнения в экспериментальном помещении по общей интенсивности  $\gamma$ -импульсов (cps)

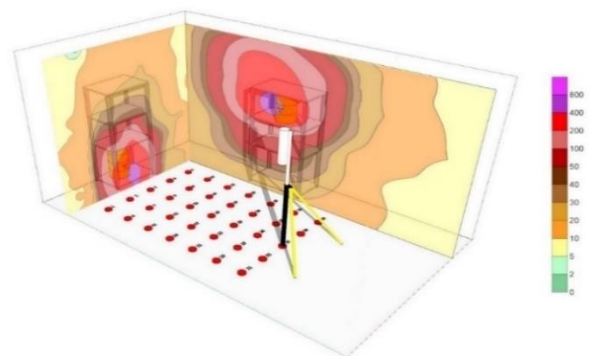


Рисунок 10. Трехмерная модель пространственного распределения радиоактивного загрязнения в экспериментальном помещении по интенсивности  $\gamma$ -импульсов (cps)  $^{137}\text{Cs}$

Построение трехмерной модели пространственного распределения радиоактивного загрязнения в экспериментальном помещении по интенсивности  $\gamma$ -импульсов радионуклида  $^{241}\text{Am}$  не удалось вследствие получения большинства результатов измерений в виде пределов обнаружения используемого оборудования. Таким образом, при обработке  $\gamma$ -спектров не удалось выявить четкий пик полного поглощения  $^{241}\text{Am}$  ввиду высокой подложки комптоновского рассеяния и невысокого разрешения  $\gamma$ -спектрометра.

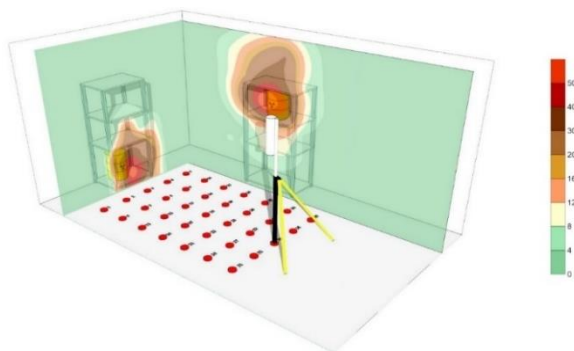


Рисунок 11. Трехмерная модель пространственного распределения радиоактивного загрязнения в экспериментальном помещении по интенсивности  $\gamma$ -импульсов (cps)  $^{152}\text{Eu}$

Тем не менее, подобное наглядное представление пространственного распределения радиоактивного загрязнения радионуклидами средних и высоких энергий в совокупности с полной его качественной и количественной оценкой может служить полезным подспорьем при принятии управленческих решений в случае возникновения нештатных ситуаций на объектах ЯТЦ.

#### Расчет минимально детектируемой активности для комплексного метода трехмерной характеристики радиоактивного загрязнения

В рамках выполнения данной задачи также выполнен расчет минимально детектируемой активности (МДА) для комплексного метода трехмерной характеристики радиоактивного загрязнения с угловым коллимированием  $\gamma$ -спектрометра. Для этого выполнена оценка возможности определения активности источника излучения с заданной геометрией с использованием полевого сцинтилляционного спектрометра на основе кристалла ( $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ). Для решения этой задачи применялось моделирование пространственно-энергетических параметров конкретного детектора методом Монте-Карло, проверка адекватности модели с помощью тестовых измерений и собственно расчёты кривых эффективности. В основу расчета лег консервативный подход, поэтому в качестве объекта измерения использовался точечный источник радиоактивного загрязнения. По условиям моделирования детектор располагался под углом  $90^\circ$  к объекту измерения. Расчеты кривых эффективности проводились для различных расстояний между детектором и объектом измерения (от 1 до 5 м). Результаты приведены в виде графика (рисунок 12).

Значение МДА определяется «мешающим» фоновым пьедесталом (включая комптоновский фон) в энергетическом интервале или зоне пика интересующего радионуклида и коэффициентами, устанавливающими доверительную вероятность и статистическую неопределенность полезного сигнала.

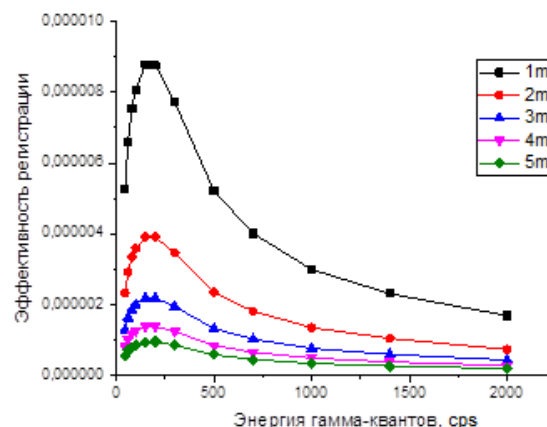


Рисунок 12. Кривая эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов на различных расстояниях от источника излучения

На основе полученных данных по эффективности регистрации  $\gamma$ -излучения различных энергий для заданных условий измерений можно оценить МДА необходимого радионуклида по формуле (1):

$$\text{МДА} = \frac{k \cdot f_q}{\varepsilon \cdot Y \cdot T} \left[ \left( 2N_f \cdot T + \frac{f_q^2}{4} \right)^{1/2} + \frac{f_q}{2} \right], \quad (1)$$

где:  $k$  – коэффициент, устанавливающий доверительную вероятность ( $k = 2$  для  $P=0,95$ );  $f_q$  – величина, обратная относительной статистической неопределенности  $\delta_{st}$ ;  $N_f$  – скорость счета фона в зоне пика интересующего радионуклида;  $T$  – время измерения;  $\varepsilon$  – эффективность регистрации излучения;  $Y$  – выход  $\gamma$ -излучения при каждом акте распада интересующего радионуклида.

Если пренебречь членами в квадратных скобках, содержащими  $f_q$ , что допустимо в практике измерений, и выбрать  $k = 2$  и  $f_q = 2$  ( $\delta_{st} = 0,5$ ), формула МДА (1) преобразуется к виду (2):

$$\text{МДА} = \frac{4\sqrt{2}}{\varepsilon \cdot Y \cdot T} \sqrt{N_f}. \quad (2)$$

В эксперименте использовался источник, содержащий в себе такие  $\gamma$ -излучающие радионуклиды как  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ . Удельные активности радионуклидов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Удельные активности радионуклидов в источнике и интенсивность  $\gamma$ -импульсов

Радионуклид	Активность, Бк/кг	Интенсивность $\gamma$ -импульсов, cps
$^{241}\text{Am}$	$1,4 \cdot 10^3 \pm 0,3 \cdot 10^3$	71
$^{137}\text{Cs}$	$5,2 \cdot 10^4 \pm 1,0 \cdot 10^4$	1121
$^{152}\text{Eu}$	$3,7 \cdot 10^4 \pm 0,7 \cdot 10^4$	171

Используя кривую эффективности регистрации произведен расчет МДА для интересующих радионуклидов по наиболее интенсивным линиям  $\gamma$ -излучения 59,6 кэВ, 662 кэВ и 344 кэВ. Результаты приведены в таблице 2.



Таблица 2. МДА для заданных условий измерений

Расстояние до источника, м	МДА, Бк		
	<sup>241</sup> Am	<sup>137</sup> Cs	<sup>152</sup> Eu
1	$3,4 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^4$
2	$1,4 \cdot 10^5$	$3,7 \cdot 10^4$	$8,5 \cdot 10^4$
3	$3,3 \cdot 10^5$	$8,9 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^5$
4	$5,9 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^5$
5	$9,5 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5$	$5,4 \cdot 10^5$

Так как в ходе проведения  $\gamma$ -съемки, определяется не активность, а только скорость счета в окне регистрации интересующего радионуклида кроме значения МДА нами также взято значение нижнего предела измерений (НПИ), для этого проанализированы фоновые характеристики детектора по следующей формуле (3):

$$\text{НПИ}_{t_f} = \frac{3 \cdot \sqrt{N_f}}{t_f}, \text{ cps}, \quad (3)$$

где:  $N_f$  – сумма импульсов в окне регистрации определяемого радионуклида, в фоновом спектре;  $t_f$  – время измерения фона.

Для этого перед началом проведения исследования была выбрана площадка с низким содержанием техногенных радионуклидов <sup>241</sup>Am, <sup>137</sup>Cs и <sup>152</sup>Eu на которой проведены измерения фоновых спектров, время набора, для увеличения статистики, составляло 1800 с. Из анализа спектров, были установлены значения НПИ<sub>*t<sub>f</sub>*</sub> для скоростей счета в окнах регистрации таких радионуклидов как <sup>241</sup>Am, <sup>137</sup>Cs и <sup>152</sup>Eu равные 0,4 cps, 0,12 cps и 0,17 cps соответственно.

В связи с тем, что предлагаемый метод подразумевает меньшее время измерения, произведен пересчет НПИ для времени измерения равного 10 секундам по формуле (4):

$$\text{НПИ}_{t_i} = \text{НПИ}_{t_f} \cdot \sqrt{1 + \frac{t_f}{t_i}}, \text{ cps}, \quad (4)$$

где:  $t_f$  – время измерения фона;  $t_i$  – время измерения при проведении  $\gamma$ -спектрометрической съемки.

Таким образом, нижний предел измерения для 10 секунд составляет для <sup>241</sup>Am – 5 cps; <sup>137</sup>Cs – 1 cps и <sup>152</sup>Eu – 2 cps.

Расчет МДА и НПИ свидетельствует о том, что сложная геометрия измерений и уменьшение чувствительного объема детектора за счет использования свинцовой коллимирующей защиты снижает эффективность регистрации низкоэнергетических  $\gamma$ -квантов. Предлагаемый метод наиболее эффективно регистрирует и определяет интенсивность  $\gamma$ -квантов <sup>137</sup>Cs.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты исследования показали, что наиболее точно расположение радиоактивных источников отслеживается по интенсивности  $\gamma$ -импульсов радионуклидов, энергетические спектры которых лежат в области средних и высоких энергий, как, например,

<sup>137</sup>Cs и <sup>152</sup>Eu. Определить местоположение источника ионизирующего излучения, содержащего радионуклиды с низкой энергией, наподобие <sup>241</sup>Am сложнее. Это объясняется особенностью сцинтилляционного детектора – обладая хорошей эффективностью, для него характерно невысокое разрешение по энергии. Известно, что в области измерения радионуклидов с малыми энергиями (десятки кэВ) основную роль играет фотоэффект. При обработке спектров, полученных в результате исследования, не удалось выделить четкий пик полного поглощения в области энергии 59,5 кэВ (<sup>241</sup>Am) вследствие высокой подложки комптоновского рассеяния, а также получения большинства результатов измерений в виде пределов обнаружения используемого оборудования. По этой причине попытки построить трехмерную модель пространственного распределения радиоактивного загрязнения в экспериментальном помещении по интенсивности  $\gamma$ -импульсов <sup>241</sup>Am не дали результатов.

Калибровка детектора, с помощью которого проводилась апробация, также выполнялась по эталонному источнику <sup>137</sup>Cs.

Для сравнения все  $\gamma$ -спектрометрические измерения сопровождалось радиометрическими измерениями МЭД с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ 1117М без коллимирующей защиты для  $\gamma$ -детектора, результаты измерений хаотично варьировались в диапазоне от 0,44 до 0,75 мкЗв/ч с изменением положения детектора выявить каких-либо закономерностей не удалось. Ожидаемо, рост мощности эквивалентной дозы наблюдался с приближением детектора к источнику радиоактивного загрязнения. Совместимость спектрометрического оборудования с задачами первичной радиоэкологической оценки выше, поскольку оно обеспечивает возможность определения качественных (изотопный состав) и количественных характеристик источников, расширяя при этом диапазон полученной информации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование не предлагает инновационных методов радиационного обследования, целью исследования являлась проверка эффективности более сложного комплексного подхода к изучению радиационной обстановки, в основе которого лежит метод традиционной гамма-спектрометрической съемки. Научный интерес представляла также оценка возможности разграничения пространства с использованием коллимирующей защиты  $\gamma$ -спектрометра с целью осуществления трехмерной характеристики радиоактивного загрязнения. В результате установлено, что угловое и горизонтальное коллиммирование  $\gamma$ -детектора позволяет разграничить пространство как по высоте, так и по направлениям.

В сравнении с предлагаемым подходом существуют, конечно, и более оперативные методы локализации радиоактивного загрязнения, такие как традиционная радиометрическая гамма-съемка, однако с использованием комплексного подхода становится воз-

возможным не только определение места расположения источника радиоактивного загрязнения, но и получение сведений о качественном и количественном содержании естественных и искусственных радионуклидов, которые в свою очередь могут лечь в основу трехмерной модели пространственного распределения радиоактивного загрязнения.

Исследуемый подход имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными методами радиационного обследования, однако из-за сложной геометрии измерений и за счет того, что при использовании свинцовой коллимирующей защиты уменьшается чувствительный объем детектора существенно снижается эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов [5–7]. Комплексный подход трехмерной характеристики радиоактивного загрязнения с угловым коллимированием  $\gamma$ -спектрометра эффективен в работе с высокоактивными источниками радиоактивного загрязнения, активность которых не менее  $9,5 \cdot 10^3$  Бк, причем МДА для низкоэнергетических  $\gamma$ -линий ниже, чем для низкоэнергетических. Данный подход может применяться исключительно для оперативной первичной оценки радиационной обстановки в условиях возникновения нештатных ситуаций на объектах хранения и использования высокоактивных источников.

В исследовании используются примитивные модели пространственного распределения радиоактивного загрязнения, в основе которых, лежит принцип построения стандартных карт загрязнения по изолиниям, так как цель исследования заключалась не в создании новых алгоритмов построения 3-D моделей, а в проверке возможности проведения гамма-спектрометрической съемки по принципу геодезического 3-D сканирования или в совокупности с ним, что в свою очередь позволит строить детализированные 3-D модели, открывающие широкие возможности для характеристики радиационной обстановки.

*Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR09158470).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ермилов А.Н., Ермилова Е.В. Природные и социальные аспекты радиоэкологической ситуации в Казахстане // Аридные экосистемы. – 2005. – Т. 1. – № 26–27. – С. 39–48.
2. Кузин Р.Е., Кожин О.В., Лебедев И.В., Могирев А.М., Писаненко С.С. Информационная поддержка системы радиационного контроля при большом потоке исследуемых проб // Прикладная информатика. – 2012. – № 2 (38). – С. 26–31.
3. Спиридонов С.И., Кузнецов В.К., Панов А.В., Титов И.Е. К вопросу об оптимизации радиоэкологического мониторинга в регионе размещения предприятий ядерного топливного цикла // Радиация и риск. – 2019. – Т. 28. – № 4. – С. 44–53.
4. Гаврилов П.М., Кохомский А.Г., Измestьев К.М., Сеелев И.Н., Силаев М.Е. Гамма-спектрометрический метод контроля активности и нуклидного состава низкоактивных твердых радиоактивных отходов // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 99–102.
5. Robert R. Finck, Christopher L. Rääf. A rotating-slit-collimator-based gamma radiation mapper. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – V. 177. – P. 225–232.
6. Канцелярский В.М., Лазарев Л.Н., Минаев И.Г., Сушко Н.И., Шулев В.И. Некоторые вопросы выбора оптимальных геометрических размеров цилиндрических коллиматоров для спектрометрирования сильных протяженных  $\gamma$ -источников // Известия Томского политехнического университета и ордена трудового красного знамени политехнического института им. С.М. Кирова. – 1973. – Т. 235. – С. 61–65.
7. Whetstone Z.D., Dewey S.C., Kearfott K.J. Simulation of a method for determining one-dimensional  $^{137}\text{Cs}$  distribution using multiple gamma spectroscopic measurements with an adjustable cylindrical collimator and center shield // Applied Radiation and Isotopes. – 2011. – V. 69. – P. 790–802.
1. Ermilov A.N., Ermilova E.V. Natural and social aspects of radioecological situation in Kazakhstan // Arid ecosystems. – 2005. – T. 1. – No. 26–27. – P. 39–48.
2. Kuzin R.E., Kozhin O.V., Lebedev I.V., Mogirev A.M., Pisanenko S.S. Information support of radiation control system at a large flow of investigated samples // Applied informatics. – 2012. – No. 2 (38). – P. 26–31.
3. Spiridonov S.I., Kuznetsov V.K., Panov A.V., Titov I.E. On the optimization of radioecological monitoring in the region of nuclear fuel cycle enterprises location // Radiation and risk. – 2019. – T. 28. – No. 4. – P. 44–53.
4. Gavrilov P.M., Kokhomsky A.G., Izmetstev K.M., Seyelev I.N., Silaev M.E. Gamma-spectrometric method of controlling the activity and nuclide composition of low-active solid radioactive wastes // Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. – 2007. – T. 310. – No. 2. – P. 99–102.
5. Robert R. Finck, Christopher L. Rääf. A rotating slit collimator-based gamma radiation mapper. Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – V. 177. – P. 225–232.
6. Kantsev V.M., Lazarev L.N., Minaev I.G., Sushko N.I., Shulev V.I. Some questions of choosing the optimal geometric dimensions of cylindrical collimators for spectrometry of strong extended  $\gamma$ -sources // Proceedings of the Tomsk Kirov Order of the October Revolution and the Order of the Labor Red Banner Polytechnic Institute. – 1973. – T. 235. – P. 61–65.
7. Whetstone Z.D., Dewey S.C., Kearfott K.J. Simulation of a method for determining one-dimensional  $^{137}\text{Cs}$  distribution using multiple gamma spectroscopic measurements with an adjustable cylindrical collimator and center shield // Applied Radiation and Isotopes. – 2011. – V. 69. – P. 790–802.

**КҮРДЕЛІ ГАММА СПЕКТРОМЕТРИЯЛЫҚ ӘДІСТІ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП,  
РАДИОАКТИВТІ ЛАСТАНУ ӨРІСТЕРІН ҮШ ӨЛШЕМДІ БЕЙНЕЛЕУ**

**Ю. Е. Артамонов\***, П. Е. Кривицкий, А. А. Чернов, Ф. Ф. Жамалдинов, В. В. Божко

*ҚР ҰАО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

*\*Байланыс үшін E-mail: artamonov@nnc.kz*

Мақалада нақты уақыт режимінде Жер мен объектілердің радиоактивті ластану өрістерімен карталар құруға мүмкіндік беретін радиоактивті ластануды үш өлшемді сипаттаудың кешенді әдісін сынақтан өткізу нәтижелері келтірілген. Ұсынылған  $\gamma$ -спектрометриялық әдіс ЯТЦ кәсіпорындарында радиациялық жағдайды жедел бастапқы бағалауды жүргізу қажеттілігі жағдайларына оңтайландырылған және детектор үшін көлденең және бұрыштық коллимациялық қорғанысты пайдалана отырып  $\gamma$ -спектрометриялық өлшеулерді жүргізуден тұрады. Бұл жағдайда өлшеу объектінің радиациялық зерттеу желісін құрайтын бақылау өлшеу нүктелеріндегі  $\gamma$ -спектрлерінің дәйекті жиынтығы болып табылады.

***Түйін сөздер:**  $\gamma$ -спектрометрия, көлденең және бұрыштық коллимация, радиоактивті ластанудың үш өлшемді сипаттамасы.*

**THREE-DIMENSIONAL VISUALIZATION OF RADIOACTIVE CONTAMINATION FIELDS  
USING A COMPLEX GAMMA SPECTROMETRIC METHOD**

**Yu. E. Artamonov\***, P. E. Krivitskiy, A. A. Chernov, F. F. Zhamaldinov, V. V. Bozhko

*Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

*\*E-mail for contacts: artamonov@nnc.kz*

The article presents the results of approbation of the complex method of three-dimensional characterization of radioactive contamination, which allows to build maps with the fields of radioactive contamination of areas and objects in real time. The proposed  $\gamma$ -spectrometric method is optimized for the conditions of necessity to carry out prompt primary assessment of radiation situation at NFC enterprises and consists in carrying out  $\gamma$ -spectrometric measurements using horizontal and angular collimating protection for the detector. Measurements in this case are a successive set of  $\gamma$  spectra in the control measuring points that form a network of radiation survey of the facility.

**Keywords:**  $\gamma$ -spectrometry, horizontal and angular collimation, three-dimensional characterization of radioactive contamination.