

# Применение гамма-сканера с антиколлиматором при обращении с радиоактивными отходами

В статье представлены гамма-изображения контейнеров и пеналов с радиоактивными отходами, полученные с помощью гамма-сканера с антиколлиматором. Такие изображения могут быть использованы для анализа радионуклидного состава радиоактивных отходов и получения информации о пространственном распределении активности в пеналах и контейнерах больших размеров.

О.П.Иванов<sup>1</sup>, В.Н.Потапов<sup>1</sup>,  
Л.А.Рязанова<sup>1</sup>, М.А.Самойлова<sup>2</sup>,  
А.М.Сафронов<sup>1</sup>,  
И.А.Степалин<sup>1</sup>, Е.А.Степанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

<sup>2</sup> ООО «СНИИП-АУНИС» г. Москва

Использование приборов, формирующих изображение источников гамма-излучения, позволяет быстро и точно обнаружить, локализовать и оценить уровень радиационного загрязнения, что, в свою очередь, дает возможность принимать оперативные меры по его устранению и обеспечивать защиту персонала и населения от воздействия радиации. По полученным гамма-изображениям можно определять распределение нуклидов в объектах, что необходимо для эффективного обращения с радиоактивными отходами (РАО).

Устройства для формирования гамма-изображений [1-3] можно разделить на два класса: гамма-сканеры и гамма-камеры. Основное отличие между этими устройствами заключа-

## **Ключевые слова:**

*гамма-сканер, гамма-изображение, радиоактивные отходы, малоракурная компьютерная томография.*

ется в способах формирования изображений. Гамма-камера использует позиционно-чувствительные детекторы, которые регистрируют излучение от достаточно большой исследуемой области, формируя двумерное гамма-изображение однократным измерением. В гамма-сканерах не применяются позиционно-чувствительные детекторы, поэтому для формирования гамма-изображения требуются многократные измерения в различных положениях сканирующим коллимированным детектором.

Гамма-сканер проводит последовательные измерения, перемещая коллимированный детектор в границах области исследования по заданной траектории и регистрируя спектрметрические данные в каждой точке сканирования. Для модуляции потока фотонов применяются коллиматоры или антиколлиматоры. Полученные в каждой точке сканирования данные обрабатываются и преобразуются в картину распределения активности источников излучения.

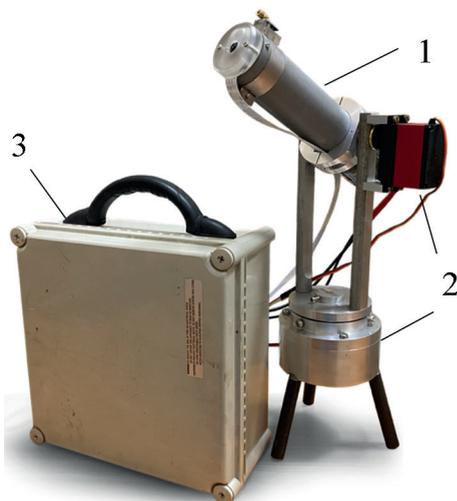
Поскольку в гамма-камерах применяются позиционно-чувствительные детекторы, многократного перемещения детектора не требуется, а гамма-изображение может формироваться практически в режиме реального времени. Первой гамма-камерой можно назвать камеру Ангера – позиционно-чувствительный детектор, который до сих пор применяется в медицинских гамма-камерах. В гамма-камерах используются следующие методы формирования гамма-изображений: камера-обскура (пинхолевая камера), кодирующие апертуры, камеры Комптона, а также гибридные системы, сочетающие в себе несколько методов одновременно. Подробнее о методах гамма-визуализации рассказывается в [1].

Если гамма-камеры работают в режиме реального времени, то они незаменимы для динамических исследований [4]. В то время как гамма-сканеры, благодаря последовательному сканированию и высокой детализации, нахо-

дят применение в задачах, требующих точного анализа распределения радиоактивных материалов на больших площадях – при реабилитации загрязненных территорий или контроле радиационной обстановки на промышленных объектах [5,6]. В НИЦ «Курчатовский институт» разработан прибор для визуализации источников гамма-излучения, в основе работы которого лежит способ сканирования с использованием антиколлиматора [7,8]. Антиколлиматор, в отличие от классического коллиматора, ограничивает небольшой телесный угол поля зрения и регистрирует излучение от источников, расположенных вне этого угла. Он представляет собой компактный фильтр из материала, хорошо поглощающего фотонное излучение, и располагается на некотором расстоянии перед детектором. В такой схеме работы детектор регистрирует без ограничения фотоны из окружающего пространства и частично (за счет ослабления антиколлиматором) из области обследования. Для количественной оценки загрязнения требуется дополнительное «фоновое» измерение, которое проводится с полностью открытым детектором. Полезный сигнал в каждой позиции сканирования формируется путем вычитания результатов фонового и информационного (при наличии антиколлиматора) измерений. Преимущество такого сканера обусловлено двумя причинами: во-первых, его весогабаритные характеристики существенно лучше, чем у классических сканеров (масса сканирующего блока 4 кг), во-вторых, для такого сканера время измерений практически в два раза меньше благодаря однократному измерению фона, т. к. используемый в сканере сцинтилляционный детектор обеспечивает изотропную чувствительность. Кроме того, такой сканер будет значительно дешевле при производстве, особенно если сравнивать его с такими системами как гамма-камеры.

На рис.1 показан используемый при измерениях прототип гамма-сканера с антиколлиматором и блоком управления. Управление осуществляется дистанционно с персонального компьютера. Сканирующий блок представляет собой головку (поз.1, рис.1), расположенную на поворотном механизме (поз.2, рис.1). Блок управления (поз.3, рис.1) вынесен в отдельный бокс, в котором располагаются управляющий мини-компьютер, спектроанализатор, контроллер поворотного механизма и блок питания. Сканирующая головка включает спектрометрический детектор, антиколлиматор и видеокамеру. В качестве сцинтиллятора для спектрометрического детектора сканера использовался CsI(Tl) сферической формы объемом 6 см<sup>3</sup>, энергетическое разрешение составило 12,1% по линии 662 кэВ. Сферическая форма кристалла сцинтиллятора обеспечивала изотропную чувствительность детектора.

Далее приведены результаты применения гамма-сканера для исследований различных загрязненных объектов. На примере проведенных обследований пеналов и контейнеров с радиоактивными отходами показаны возможности использования гамма-сканера с антиколлиматором при обращении с РАО.



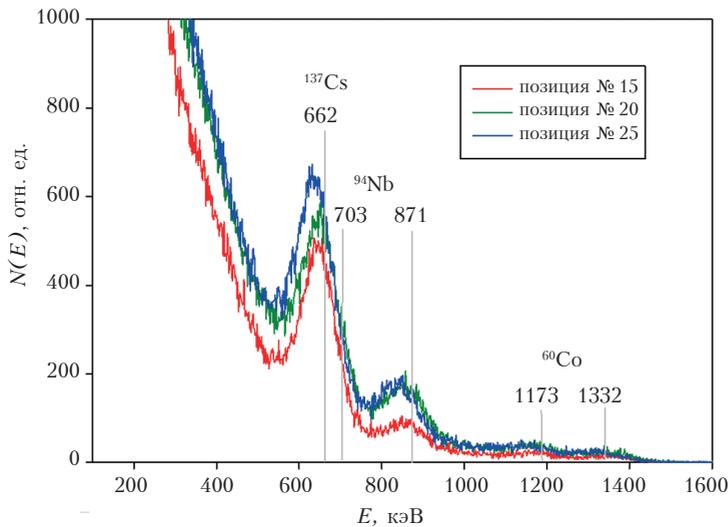
**Рис.1.** Внешний вид гамма-сканера с антиколлиматором. 1 – сканирующая головка; 2 – поворотный механизм; 3 – блок управления.

### Сканирование пеналов с РАО внутри хранилища

Пеналы с высокоактивными РАО, образующимися при некоторых видах работ, перед отправкой в специализированную организацию на захоронение выдерживаются во временном хранилище. Они хранятся в специальных ячейках (каналах) в бетонной защите большой толщины. Периодически проводится инвентаризация таких пеналов. При инвентаризации оценивается содержимое пеналов, т. е. радионуклидный состав и активность. Для снижения дозовой нагрузки на персонал такая оценка выполняется средствами дистанционной диагностики. Ниже приведены результаты обследования одного из пеналов с РАО. Пенал цилиндрической формы имел геометрические размеры  $\varnothing 240 \times 750$  мм. Мощность эквивалентной дозы на расстоянии 10 см от поверхности пенала составляла 10 мЗв/час ( $\sim 1$  Р/час). Гамма-сканер располагался на расстоянии 5,3 м от обследуемого пенала и сканировал по сетке размером  $7 \times 6$  (позиций) положений головки с угловым шагом  $5^\circ$  по каждой оси. Время экспозиции измерения одного спектра составляло 60 с.

Типичные аппаратурные спектры излучения, полученные при сканировании в различных угловых положениях детектора, показаны на рис.2.

Спектры на рис.2 и дополнительные измерения спектрометрическим детектором высокого разрешения показывают, что в РАО пенала присутствуют в основном три радионуклида: Cs-137, Co-60 и Nb-94. На спектрах хорошо проявляются пики радионуклида Co-60 и один из пиков Nb-94 с энергией 871,1 кэВ, в то время, как второй пик радионуклида Nb-94 с энергией 702,6 кэВ накладывается на пик Cs-137 с энергией 662 кэВ. Однако вклад Nb-94 в пик с энергией 662 кэВ (Cs-137) легко оценить по пику с энергией 871,1 кэВ. Полезный сигнал для каждого радионуклида



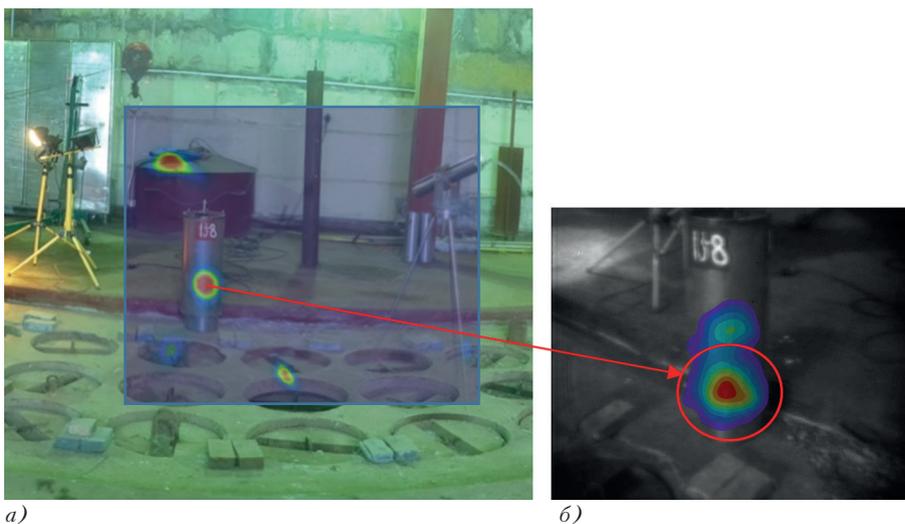
**Рис.2.** Аппаратурные спектры, полученные при обследовании пенала с РАО в помещении хранилища для трех различных позиций сканирующей головки.

определялся по скорости счета в пиках полного поглощения соответствующих энергетических линий из разностного спектра открытого детектора (без антиколлиматора) и спектра с антиколлиматором в текущей угловой позиции детектора сканера.

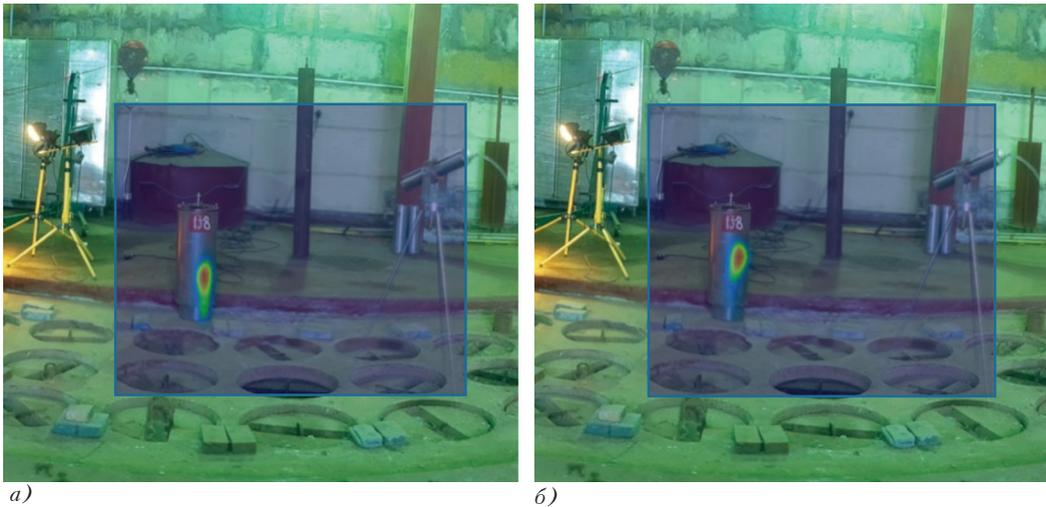
Измерения проводились при отрицательной температуре в неотапливаемом помещении хранилища РАО без теплового равновесия с окружающей средой, т. к. гамма-сканер в хранилище был доставлен из отапливаемого помещения. Спектрометрическая система про-

тотипа гамма-сканера не имеет температурной стабилизации, поэтому при продолжительных измерениях наблюдался энергетический сдвиг между аппаратурными спектрами, полученными в разных точках сканирования. Для компенсации этого влияния при обработке данных измерений осуществлялась коррекция температурных сдвигов аппаратурных спектров программным способом.

По информации о скорости счета в пиках полного поглощения для каждого из указанных радионуклидов можно восстановить



**Рис.3.** Изображения источников излучения  $\text{Cs-137}$ , находящихся в цилиндрическом пенале и объектах, расположенных в пределах области сканирования. а) – изображение, полученное по данным измерения гамма-сканера; б) – изображение источников пенала по данным гамма-камеры «CARTOGAM».



**Рис.4.** Изображения источников излучения  $Co-60$  (а) и  $Nb-94$  (б), расположенных в том же пенале с РАО.

картину распределения нуклидов в области сканирования исследуемого объекта. Используя аппаратную функцию антиколлиматора с помощью метода максимального правдоподобия [9-13], можно улучшать пространственное (угловое) разрешение изображения источников излучения. Аппаратная функция антиколлиматора определяет степень «размытия» изображения точечного источника при сканировании и может определяться как расчетным моделированием, так и экспериментально. На рис. 3 и 4 изображены пространственные распределения перечисленных выше источников излучения в области сканирования.

Параллельно с проведением сканирования осуществлялась процедура визуализации источников излучения пенала с помощью гамма-камеры «CARTOGAM» [14], работающей по классической схеме с использованием камеры-обскуры. На рис.3б приведено изображение пенала, полученное этой гамма-камерой с расстояния 2 м. Следует отметить, что эта гамма-камера работает в интегральном режиме, т. е. зарегистрированные гамма-кванты, формирующие изображение, не различаются по энергиям и, кроме того, полученное изо-

бражение отображается только для тех областей картины, интенсивность которых выше 50% от максимального значения (обрезанная «снизу» картина изображения). Для получения картины гамма-изображения с более высоким пространственным разрешением гамма-камеру размещали на расстоянии 2 м от пенала, и в этом случае на изображении видно два пятна (рис.3б), в то время как при дополнительном измерении (в статье не приводится) с расстояния 4 м картина распределения источников в пенале изображалась только одним пятном.

Следует отметить, что на рис.3а наблюдаются характерные пятна, имитирующие источники излучения в местах расположения ячеек (каналов), в которых хранятся пеналы с РАО. Это указывает на то, что в этих каналах находятся пеналы с высокоактивными отходами такого же радионуклидного состава. Однако возможно и другое объяснение: это проявление артефактов, связанных с внешней радиационной подсветкой от источников, расположенных вне области сканирования (мощность дозы на детекторе сканера составляла 0,055 мЗв/час).

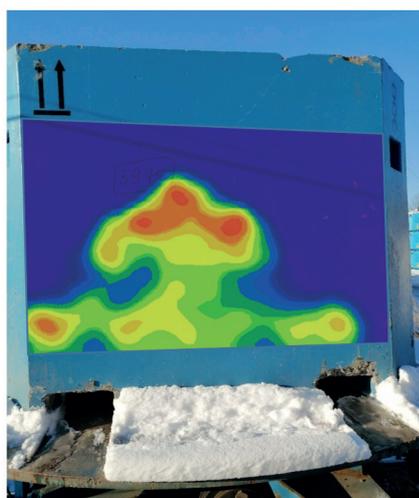
### Обследование транспортных контейнеров с использованием гамма-сканера

Для транспортировки низко- и среднеактивных РАО используют, в основном, металлические контейнеры (КРАД, КМЗ разной модификации) и бетонные контейнеры НЗК с толщиной стенок ~160 мм.

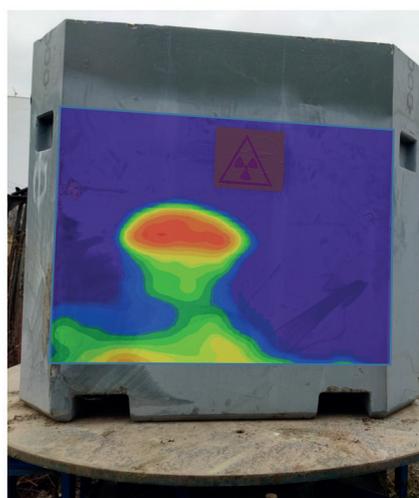
На примере использования гамма-сканера с антиколлиматором были получены результаты обследования двух бетонных контейнеров НЗК с РАО для анализа однородности распределения в них активности. При сканировании граней таких контейнеров можно получить информацию в виде распределения интенсивности излучения, выходящего из боковой поверхности контейнера. Типичные картины распределения интенсивности излучения боковых поверхностей бетонных контейнеров представлены на рис.5а и 5б. В контейнере, изображенном на рис.5а, находились РАО повышенной активности, помещенные в 200-литровую металлическую бочку. Эти отходы содержали радионуклиды Cs-137 и были присыпаны низкоактивной бетонной крошкой для снижения мощности дозы на внешних стенках контейнера.

Перед транспортировкой контейнеров с РАО на захоронение определяют их общую активность радиометрическим способом. Методики измерения общей активности контейнера исходят из предположения, что распределение активности в них равномерное, а это приводит к методической погрешности измерения, которая тем больше, чем больше степень неравномерности распределения активности.

Результаты сканирования боковых поверхностей контейнеров позволяют визуально оценить неоднородность распределения активности в контейнерах. Данные рис.5 дают только качественную информацию о характере распределения активности в контейнере. Как было показано в [15], в зависимости от способа измерения контейнеров и степени неоднородности распределения активности, методическая погрешность измерения общей активности контейнера НЗК может достигать более 120%. Количественным критерием степени неоднородности в этом случае может быть стандартное среднеквадратичное отклонение активности по внутреннему объему контейнера. Количественная оценка неравномерности распределения активности в контейнерах

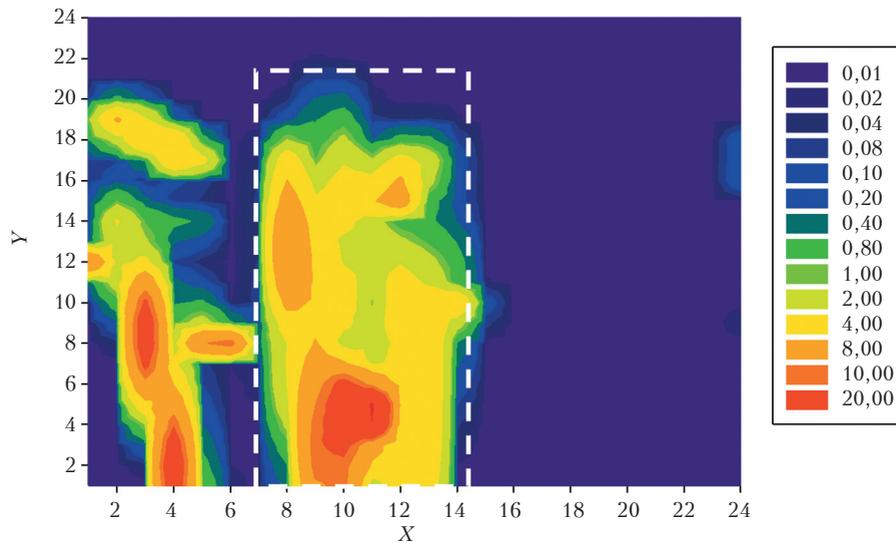


а)



б)

**Рис.5.** Результаты сканирования двух бетонных контейнеров (НЗК-150-1,5П) с РАО. Наложенные изображения представляют собой распределение интенсивности излучения в плоскости граней контейнера.



**Рис.6.** Представление распределения активности, полученное методом проекции максимальной интенсивности вокселей на плоскость, совпадающую с одной из граней контейнера. Пунктирной линией изображен профиль 200-литровой металлической бочки, в которой размещалась часть РАО с повышенной удельной активностью.

может быть получена, если иметь данные об объемном распределении активности, а для этого нужно перейти к задаче однофотонной эмиссионной компьютерной томографии.

При решении томографической задачи, т. е. восстановлении объемного распределения активности в контейнере, могут быть использованы пиксельные данные распределения интенсивности излучения, выходящего из боковой поверхности контейнера, такие как данные, представленные на рис.5.

Одним из способов восстановления распределения активности радиоактивных материалов в закрытых объектах является метод малоракурсной компьютерной томографии, основанный на решении обратной задачи для интегрального уравнения, связывающего результаты сканирования (первичные пиксельные данные) с объемным распределением активности контейнера (воксельные данные).

Для контейнера, представленного на рис.5а, было выполнено сканирование двух перпендикулярных боковых граней. Объем контейнера был разбит на  $24 \times 24 \times 24$  вокселя, для каждого из которых решением интегрального уравне-

ния были получены данные значений их активности. Решение интегрального уравнения осуществлялось итерационным способом (методом максимального правдоподобия [6-9]).

Важно отметить, что точность восстановления значений активностей и возможное появление артефактов в этих данных зависит от количества используемых при решении сканированных проекций (исходных данных), поэтому предпочтительнее использовать проекции всех четырех боковых граней контейнера.

По результатам решения обратной (томографической) задачи определяется активность каждого вокселя. Одним из наиболее простых способов визуализации воксельных данных является метод проекции максимальной интенсивности (активности) (maximum intensity (activity) projection [16,17]). Найденные для распределения активности в контейнере воксельные данные проектируются на плоскость, состоящую из пикселей. Из точки обзора проводят прямую через каждый пиксель, при этом цвет этого пикселя соответствует максимальной активности в той части контейнера, которую пересекает прямая. На рис.6 пред-

ставлено пиксельное изображение, полученное указанным способом. По осям абсцисс и ординат обозначены порядковые номера пикселей вдоль соответствующих направлений.

Воксельные данные позволяют оценивать не только качественно, но и количественно степень неоднородности распределения активности радионуклидов по объему контейнера, а значит и более точно определить методическую погрешность измерения общей активности контейнера. Хотя процедура получения воксельных данных – трехмерных распределений активности в объектах – достаточно трудоемкая и для целей постоянного контроля контейнеров практически нереализуема, она представляет интерес для отдельных случаев. Такой подход целесообразен и порой необходим для выборочного контроля, для проведения исследований и отработки новых методик измерений, для случаев контроля распределения радиоактивности нестандартных закрытых объектов.

### **Заключение**

В процессе обращения с РАО постоянно совершенствуются способы и методы радиационных измерений, а значит совершенствуются приборы и системы радиационного контроля. В представленной статье описана система визуализации источников излучения, которая может быть использована для получения информации о распределении радиоактивных источников при выполнении работ по демонтажу радиоактивного оборудования, обследовании загрязненных помещений, подготовке к вывозу РАО. На примере определения распределения радиоактивности для двух

задач показаны возможности такой системы визуализации. Одним из преимуществ такого сканера являются его весогабаритные характеристики. Такой способ визуализации источников излучения имеет и недостатки. Если условия измерения включают присутствие боковой подсветки мощными источниками излучения, находящимися вне области сканирования, то это может ограничивать возможности такого прибора, в частности, приводить к проявлению изображений ложных источников, понижать его чувствительность, пространственное разрешение и т. д. Такая боковая подсветка, как правило, возникает при проведении обследования внутри загрязненных помещений. В гамма-сканере с классическим коллиматором влияние боковой подсветки также создает проблемы, т. к. из-за присутствия внешней защиты детектора возникает анизотропия его чувствительности. Поэтому для классического сканера требуется двукратное сканирование: с открытым коллиматором и с коллиматором, закрытым заглушкой, а это увеличивает общее время обследования (измерения) в два раза.

Проблемы при использовании сканера могут возникнуть из-за влияния загрузки спектрометрического тракта. Изменить влияние загрузки детектора и спектрометрического тракта сканера можно заменой детектора, например, сцинтилляционного детектора на полупроводниковый (типа CdZnTe) небольшого объема. Это расширит возможности гамма-сканера, и, кроме того, для детектора с более высоким энергетическим разрешением возможно повысить чувствительность и угловое разрешение сканера.

## Литература

1. K. Vetter, L. Mihailescu, K. Nelson, J. Valentine, D. Wright, «Gamma-ray Imaging Methods. LLNR Report UCRL-TR-225239». DOI: 10.2172/1036848, 2006.
2. Теверовский Ю.Л. Приборы и методы получения визуального изображения источников гамма-излучения на объектах атомной энергетики. Часть 1 // АНРИ. 2020. №2(101). DOI: 10.37414/2075-1338-2020-101-2-18-30, 2020.
3. К.Р. Ziocck, «Principles and applications of gamma-ray imaging for arms control», *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol. 878, pp. 191-199, 2018.
4. Иванов О.П., Ковалев В.М., Степанов А.В., Степанов В.Е., Степанов Е.А. Опыт применения портативных гамма-камер (гамма-визоров) в работах по выводу из эксплуатации и реабилитации ОИАЭ // АНРИ. 2022. № 1(108). С. 19-35.
5. Степанов В.Е. и др. Дистанционно управляемый коллимированный детектор для измерения распределений радиоактивных загрязнений // Атомная энергия. 2010. Т. 109. № 2. С. 82-84.
6. Гамма-сканер RadSearch (ANTECH): Series G3050. URL: <https://www.antech-inc.com/service/gamma-camera-surveys/> (дата обращения: 4.06.2025).
7. O.P. Ivanov, V.N. Potapov, I.A. Semin et al, «4π Spectrometric Gamma-Ray Scanner with Anti-Collimator», 2019, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Manchester, UK, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/NSS/MIC42101.2019.9059820.
8. Иванов О.П., Игнатов С.М., Потапов В.Н., Самойлова М.А., Семин И.А. Гамма-сканер с антиколлиматором для визуализации источников гамма-излучения // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 2. С. 115-120.
9. Тараско М.З. Об одном методе решения линейных систем со стохастическими матрицами, ФЭИ им. А.И.Лейпунского. Обнинск. 1969. Препринт ФЭИ-156.
10. W.H. Richardson, «Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration», *JOSA*, no. 62, pp. 55-59. 1972.
11. L.B. Lucy, «An iterative technique for the rectification of observed distributions», *Astronomical Journal*, no. 79, pp. 745-754, 1974.
12. K.-Sh. Chuang, et al. «A maximum likelihood expectation maximization algorithm with thresholding», *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 29, no. 7, pp. 571-578, Nov. 2005. DOI: 10.1016/j.compmedimag.2005.04.003.
13. O. Ivanov, V. Potapov, I. Semin. «The Method to Improve the Angular Resolution of the Portable Gamma Camera with Pinhole Collimator», *NSS-MIC*, Oct. 2016, Strasbourg, France. Paper N08-4, 2016. DOI: 10.1109/NSSMIC.2016.8069704.
14. O. Gal, F. Jean, F. Laine, C. Leveque. «The CARTOGAM portable gamma imaging system». *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 47(3), pp. 952-956. July 2000. DOI: 10.1109/23.856725.
15. Потапов В.Н., Смирский Ю.Н., Иванов О.П. и др. Оценка методической погрешности измерения активности РАО разными способами для транспортных контейнеров большого объема // АНРИ. 2024. № 3(118). С. 3-18. DOI: 10.37414/2075-1338-2024-118-3-318.
16. J. Wallis, T. Miller. «Three-dimensional display in nuclear medicine and radiology», *J Nucl Med*, no. 32(3), pp. 534-46, PMID 2005466, March 1991.
17. S. Napel, G. Rubin, R. Jeffrey, «STS-MIP: a new reconstruction technique for CT of the chest», *Journal of computer assisted tomography*, no. 17(5), pp. 832-8. 1993.

## Application of a Gamma Scanner with an Anticollimator for Radioactive Waste Management

Ivanov Oleg<sup>1</sup>, Potapov Victor<sup>1</sup>, Ryazanova Lyudmila<sup>1</sup>, Samoylova Maria<sup>2</sup>, Safronov Alexey<sup>1</sup>, Stepalin Ivan<sup>1</sup>, Stepanov Eugenii<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup> ООО «СНИИП-АУНИС» Moscow, Russia

**Abstract.** The article presents gamma images of containers and casks with radioactive waste, obtained using a gamma scanner with an anticollimator. Such images can be used to analyze the radionuclide composition of radioactive waste and to obtain information on the spatial distribution of activity in casks and containers of large sizes.

**Keywords:** *gamma scanner, gamma image, radioactive waste, few projections computed tomography.*

О.П.Иванов (д.ф.-м.н., нач. отд.)<sup>1</sup>, В.Н.Потапов (д.ф.-м.н, в.н.с.)<sup>1</sup>, Л.А.Рязанова (нач. бюро)<sup>1</sup>, М.А.Самойлова (к.ф.-м.н., вед. инж.)<sup>2</sup>, А.М.Сафронов (инж.)<sup>1</sup>, И.А.Степалин (инж.)<sup>1</sup>, Е.А.Степанов (инж.)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

<sup>2</sup> ООО «СНИИП-АУНИС» г. Москва

Контакты: +7 499 196-95-42, [ivanov\\_or@nrcki.ru](mailto:ivanov_or@nrcki.ru)