

УДК 53.083

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/27

*О.П. ИВАНОВ<sup>1</sup>, В.Н. ПОТАПОВ<sup>1</sup>, М.А. САМОЙЛОВА<sup>1,2</sup>*

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СКАНЕРА С АНТИКОЛЛИМАТОРОМ \***

Описан метод формирования гамма-изображений, основанный на сканировании области интереса с применением антиколлимационной техники. Данный метод может применяться при создании средств визуализации гамма-источников, предназначенных для проведения работ по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии, а также для дезактивационных и восстановительных работ при обращении с радиоактивными отходами. Применение методики сканирования с антиколлиматором позволяет значительно сократить массу и габариты системы визуализации по сравнению с коллимационной техникой, а в некоторых случаях сократить время, необходимое для обследования радиационно-загрязненного объекта.

**Ключевые слова:** визуализация гамма-излучения, антиколлиматор, спектрометрический детектор, картирование гамма-радиоактивного загрязнения.

### **Введение**

История визуализации гамма-излучения берет свое начало в астрофизике. Для идентификации первого космического источника рентгеновского излучения [1] использовался коллиматор [2], ограничивающий поле зрения детекторов на основе счетчиков Гейгера и пропорциональных счетчиков. Первая карта звездного неба получена благодаря запуску спутника Uhuru – первой орбитальной рентгеновской обсерватории [3], на борту которой размещались коллимированные счетчики Гейгера, регистрировавшие рентгеновское излучение с энергиями от 2 до 20 кэВ. В [4] был предложен переход от камеры-обскуры с единичным отверстием к массиву случайным образом расположенных коллиматоров. Данный метод заложил основы для применения кодирующих апертур, использование которых стало важным достижением в приборостроении.

Сегодня для эффективной локализации источников гамма-излучения при проведении реабилитационных работ применяются устройства, позволяющие визуализировать распределение источников гамма-излучения в пространстве. Это позволяет повысить точность выполняемых работ, сократить дозовую нагрузку на персонал, а также сроки выполнения реабилитационных манипуляций. Существует ряд методов визуализации источников гамма-излучения: сканирование с коллиматором [5], камера-обскуры [6], камера Комптона [7], кодирующие апертуры [8], комбинированные системы [9] и др. Каждый метод обладает своими преимуществами и недостатками и для решения каждой конкретной задачи требуется тщательный анализ условий применения разрабатываемой системы для поиска оптимального метода визуализации гамма-излучения.

Одним из самых простых и доступных способов формирования гамма-изображения является сканирование с коллиматором – детектирующая головка, представляющая собой детектор, размещенный в массивной защите с небольшим отверстием (апертурой) для пространственной модуляции потока гамма-квантов, устанавливается на поворотном-наклонном механизме. В процессе сканирования формируется массив данных о вкладе активности в рассматриваемом телесном угле в точке размещения гамма-локатора. Основным недостатком такой системы является очень большая масса установки, поскольку для эффективной модуляции потока гамма-квантов требуется толстый слой защиты. Кроме того, в некоторых случаях необходимо двукратное сканирование для точного учета влияния фонового излучения.

В работе описывается способ получения гамма-изображений с помощью сканера с антиколлиматором, позволяющий значительно сократить массу и габариты средства гамма-визуализации, а в некоторых случаях и время сканирования обследуемого объекта.

### **Метод сканирования с антиколлиматором**

Антиколлиматор представляет собой объект из материала высокой плотности, помещенный перед открытым детектором для модуляции потока гамма-квантов. Такой объект описан в патен-

\* Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ от 14.08.2019 № 1808).

те [10] и был предложен для решения задачи визуализации источников гамма-излучения для случая, когда излучение имеет преимущественно одно направление.

Техника сканирования с применением антиколлиматора заключается в последовательном перемещении оси антиколлиматора относительно детектора в границах области интереса: в каждой точке антиколлиматор поглощает ту часть гамма-излучения, которая направлена от источников, расположенных на одной оси с детектором и антиколлиматором; детектор регистрирует излучение в  $4\pi$ -пространстве за исключением телесного угла за антиколлиматором – в областях с источниками будут наблюдаться «теневые» области, характеризующиеся меньшей в сравнении с соседними интенсивностью (рис. 1). В процессе сканирования формируется теневое изображение источников гамма-излучения. Реальное изображение источников осуществляется с помощью процедуры инверсии «теневой области» изображения, т.е. путем формирования разностного сигнала открытого детектора (однократное измерение) и теневых сигналов детектора с антиколлиматором, формируемых в процессе сканирования.

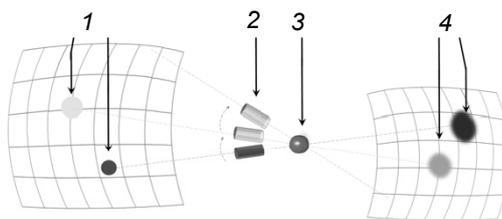


Рис. 1. Схематическое представление антиколлимационного метода: 1 – источники гамма-излучения в области интереса; 2 – положения антиколлиматора в процессе сканирования; 3 – чувствительный элемент детектора; 4 – области теневого изображения

Реконструкция изображения методом максимального правдоподобия позволяет повысить угловое разрешение системы благодаря процедуре восстановления полученного по результатам сканирования массива данных. Итоговое изображение получается наложением восстановленного гамма-изображения на фотопанораму, полученную по результатам сшивки фотоснимков, сделанных в каждой точке сканирования.

### Гамма-сканер с антиколлиматором

При разработке устройства основными требованиями были легкость и компактность, а также простота в управлении.

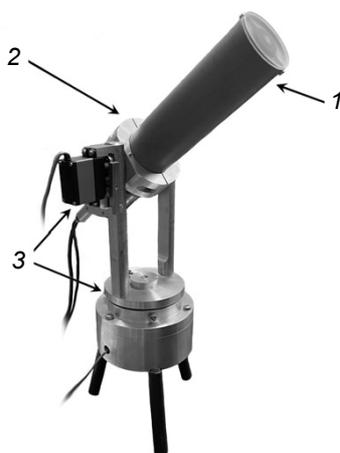


Рис. 2. Внешний вид гамма-сканера с антиколлиматором: 1 – детектирующая головка; 2 – фиксатор детектирующей головки; 3 – поворотные механизмы

На рис. 2 показан внешний вид прототипа гамма-сканера с антиколлиматором, изготовленного в НИЦ «Курчатовский институт». Гамма-сканер с антиколлиматором представляет собой детектирующую головку 1, размещенную с помощью фиксатора 2 на поворотно-наклонном устройстве 3 на треноге.

Детектирующая головка состоит из детектора и антиколлиматора, разнесенных на определенное расстояние и помещенных в единый корпус. На фронтальной стороне детектирующей головки размещена видеокамера так, что ось ее симметрии параллельна оси антиколлиматора и центра детектора.

### Спектрометрический детектор

Поскольку основным узлом устройства является детектор, ключевым моментом было создание максимально легкого и компактного чувствительного элемента, отвечающего основным требованиям:

1. Для обеспечения возможности определения радионуклидного состава загрязнения детектор должен регистрировать гамма-излучение в диапазоне энергий от 100 кэВ до 1.5 МэВ в спектрометрическом режиме.

2. Для разрешения радионуклидов долгоживущих элементов цезий-137 (662 кэВ) и кобальт-60 (1.17 и 1.33 МэВ) энергетическое разрешение по энергии 662 кэВ должно быть не хуже 15%.

3. Для сохранения анизотропии чувствительности при перемещении детектирующей головки чувствительный объем детектора должен иметь форму шара.

4. Эффективность регистрации должна быть достаточна для выполнения измерений в условиях мощности дозы в точке размещения 0.1 мЗв/ч.

В качестве материала детектора применен сцинтиллятор CsI(Tl), так как низкая гигроскопичность и прочность позволяют обрабатывать кристалл, придавая ему нужную форму, а спектр свечения хорошо согласуется со спектром поглощения твердотельных кремниевых фотоумножителей SiPM [11], которые обладают минимальными массогабаритными характеристиками из всех известных фотоприемников. Объем кристалла детектора составил 6 см<sup>3</sup>.

Суммарная масса детектора с предусилительной электроникой и в корпусе составила 200 г. Эффективность регистрации по энергии 662 кэВ – 30%. Энергетический диапазон от 50 кэВ до 1.5 МэВ подтверждается возможностью регистрации низкоэнергетического гамма-излучения радионуклида америций-241 (59.5 кэВ) и высокоэнергетического излучения радионуклида кобальт-60 (1.17 и 1.33 МэВ). Энергетическое разрешение по энергии 662 кэВ – 12.1% обеспечивается применением четырех кремниевых фотоприемников СРГА-149-35 размерами 3×3 мм. Управление детектором осуществляется спектроанализатором «Колибри» [12].

### Моделирование системы

Определение оптимальных геометрических параметров выполнялось с помощью компьютерного моделирования. Для этого методом Монте-Карло моделировался отклик системы для различных геометрических комбинаций детектор – антиколлиматор, затем полученные результаты обрабатывались с помощью метода максимального правдоподобия. В качестве основных критериев были проанализированы отношение сигнала к шуму, частотно-контрастная характеристика и аппаратная функция моделируемой системы.

По результатам оптимизации определено, что оптимальной формой антиколлиматора является свинцовый цилиндр высотой 4 см (из соображений оптимального поглощения для энергий основных дозообразующих радионуклидов цезий-137 и кобальт-60) и радиусом 1 см, удаленный на 10 см от центра детектора. При этом угловая апертура антиколлиматора составляет порядка 10°.

Полученные результаты моделирования позволили сконструировать прототип гамма-сканера с антиколлиматором с оптимальными геометрическими параметрами, при этом не потребовалось изготавливать ряд образцов и экспериментально определять характеристики каждого из них, что оказалось бы весьма затратно как с точки зрения использования материальных ресурсов, так и времени.

Предварительные лабораторные эксперименты показали влияние крепежных элементов на аппаратную функцию системы, поэтому в конструкцию был внесен ряд корректировок.

Экспериментальное определение аппаратной функции подтвердило значение угловой апертуры антиколлиматора на половине высоты порядка 10°.

### Конструкция и элементы управления

Поскольку масса детектирующей головки достаточно мала, то требования по механической нагрузке на поворотный механизм значительно ниже, нежели для устройств, применяющих коллимационную технику, однако требования к точности позиционирования остаются высокими. При изготовлении прототипа гамма-сканера с антиколлиматором были применены два сервопривода, один из которых обеспечивает перемещение детектирующей головки по азимутальной координате, второй – по полярной. Управление сервоприводами обеспечивается специальным контроллером, который, получая команду с управляющего компьютера, задает положение соответствующему сервоприводу, после чего сервопривод плавно перемещается в заданную координату. В результате поворотный механизм обеспечивает высокую точность позиционирования детектирующей головки при низком токопотреблении.

Масса детектирующей головки, размещенной на треноге с поворотным механизмом, составила всего 3.8 кг.

Управление гамма-сканером с антиколлиматором осуществляется с помощью персонального компьютера. Графический интерфейс приложения для управления устройством позволяет опреде-

лить границы области интереса, выполнить фоновое измерение (для открытого детектора) и выполнить сканирование в заданной области. Область интереса определяется путем задания координат детектирующей головки и проверки установленного положения по отображающемуся фотоснимку и лазерному указателю. Фоновое измерение выполняется в вертикальном положении детектирующей головки, когда детектор регистрирует излучение от всех источников в помещении. Для выполнения сканирования объекта требуется задать границы сканируемой области, шаг сканирования и время одного измерения (время измерения в каждой точке).

При старте измерения управляющий компьютер направляет контроллеру сервоприводов команду, содержащую информацию о задаваемом положении; сервоприводы занимают указанные положения, о чем на управляющий компьютер приходит сообщение; в установленном положении захватывается изображение с видеокамеры – оно сохраняется в памяти управляющего компьютера и обновляется в окне графического интерфейса управляющей программы; также управляющий компьютер направляет команду спектроанализатору об установленном времени измерения и команду к старту измерения. Прибор в автоматическом режиме сканирует помещение в заданных границах области интереса по заданному программой управления сценарию.

### Процедура обработки результатов измерений

По окончании сканирования в заданной директории формируется массив спектров, каждый из которых соответствует определенным угловым координатам, а также фоновый спектр. В каждом спектре определяется интегральная скорость счета в пике полного поглощения рассматриваемого радионуклида(ов) в данной точке (рис. 3, а).

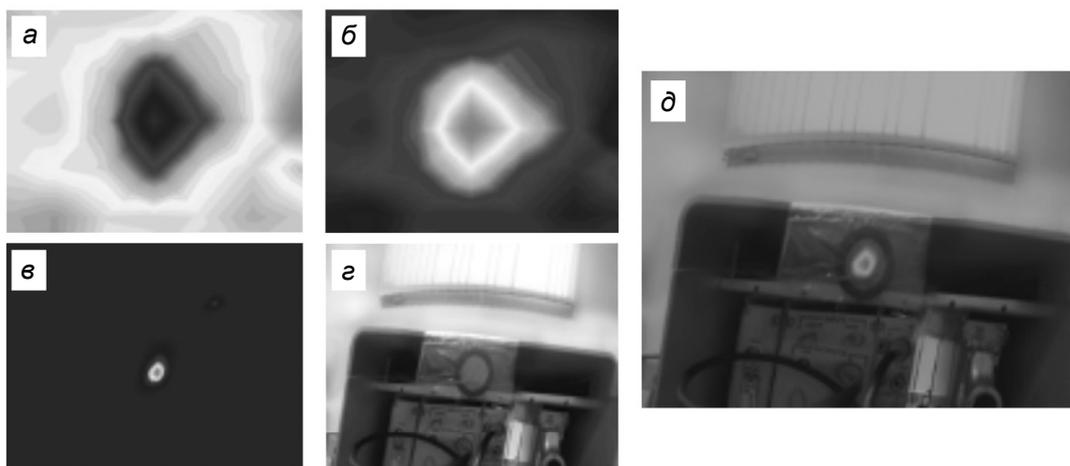


Рис. 3. Процедура обработки результатов измерений на примере визуализации точечного источника типа ОСГИ с радионуклидом натрий-22: формирование гамма-изображения (а); результат вычитания из фонового спектра (б); восстановленное изображение (в); панорамное фото (г); результат наложения восстановленного изображения на панорамное фото (д)

Вклад от источников, расположенных в измеряемом телесном угле (точке сканирования), определяется разностью интегральной скорости счета в пиках полного поглощения рассматриваемого радионуклида фонового спектра и спектра, полученного в рассматриваемой точке сканирования (рис. 3, б).

Для повышения углового разрешения и точности визуализации применяется процедура реконструкции (рис. 3, в), заключающаяся в решении обратной задачи методом максимального правдоподобия [13] с помощью программного обеспечения «Программа восстановления пространственного распределения источников излучения по результатам измерений гамма-сканером с антиколлиматором» [14].

Сшивка полученных в каждой точке фотоснимков позволяет получить панорамное изображение (рис. 3, г), для этого применяется программный инструмент Autostich [15].

Для визуализации распределения источников гамма-излучения результат реконструкции накладывается на панорамное изображение (рис. 3, д). Полученная карта углового распределения активности демонстрирует расположение гамма-источников в области интереса.

### Результаты испытаний гамма-сканера с антиколлиматором

Экспериментально определялось угловое разрешение гамма-сканера с антиколлиматором. Для этого использовались два источника ионизирующего излучения с радионуклидом цезий-137 с отношением активностей 1:3. Активность источника, размещаемого справа, в 3 раза меньше, чем активность левого. Источники устанавливались на вертикальной поверхности на расстоянии 2 м от гамма-сканера с антиколлиматором на различном ( $5.3^\circ$ ,  $7.1^\circ$ ,  $8.5^\circ$ ,  $11^\circ$  и  $14^\circ$ ) угловом расстоянии друг от друга. В заданной области проводилось сканирование в автоматическом режиме. Поле сканирования представляло собой прямоугольную область высотой  $20^\circ$  и шириной  $35^\circ$ . Дополнительно было выполнено фоновое измерение в вертикальном положении детектирующей головки. Результаты измерения обрабатывались итерационным методом с помощью программы восстановления, после чего накладывались на панорамное изображение обследуемого объекта.

На рис. 4 приведены результаты наложения восстановленных изображений (поз. 2) на фото для двух источников (поз. 1), расположенных на угловом расстоянии  $5.3^\circ$  (рис. 4, а),  $8.5^\circ$  (рис. 4, б) и  $11^\circ$  (рис. 4, в) друг от друга.

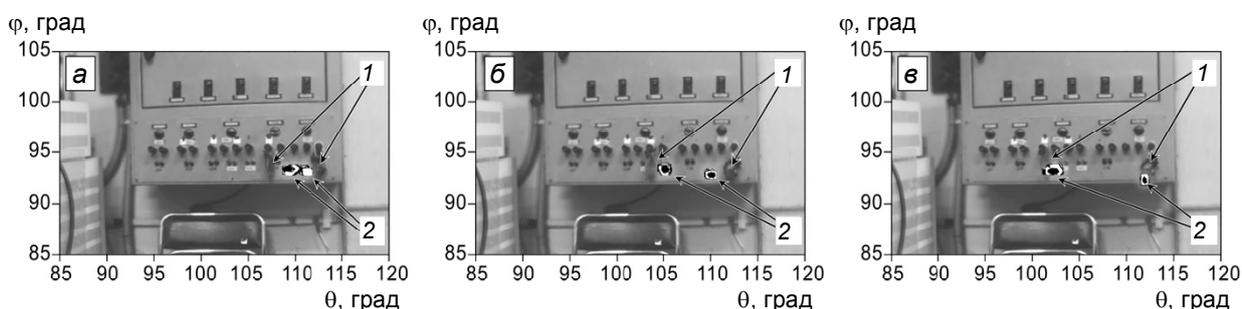


Рис. 4. Результаты определения углового разрешения для двух точечных источников с радионуклидом цезий-137, расположенных на угловом расстоянии  $5.3^\circ$  (а),  $8.5^\circ$  (б) и  $11^\circ$  (в)

Из рис. 4 видно, что два источника, расположенные на угловом расстоянии  $11^\circ$ , однозначно разрешаются сканирующей системой. Процедура восстановления позволяет точно локализовать каждый источник гамма-излучения, а соотношение интегральных значений интенсивностей точно соответствует отношению активностей источников. При расположении источников гамма-излучения на угловом расстоянии  $8.5^\circ$  заметно некоторое размытие и незначительное смещение, однако два точечных источника разрешаются в хорошем качестве, а соотношение интенсивностей хорошо согласуется с фактическим соотношением активностей рассматриваемых источников. Два точечных источника, расположенные на угловом расстоянии  $5.3^\circ$ , различаются как два отдельно расположенных источника, причем хорошо видно, что активность левого источника выше активности правого.

Для оценки влияния фонового излучения на разрешающую способность гамма-сканера с антиколлиматором была проведена серия экспериментов с двумя точечными источниками с радионуклидом цезий-137. Один источник размещался в сканируемой области интереса, а второй источник формировал фоновую подсветку и перемещался относительно гамма-сканера для изменения мощности дозы. Мощность дозы, создаваемая основным источником в точке размещения гамма-сканера составляла  $0.01$  мЗв/ч. Фоновая мощность дозы, создаваемая вторым источником, в точке размещения гамма-сканера составляла от  $0.01$  до  $0.05$  мЗв/ч. На рис. 5 приведены результаты серии экспериментов.

Измерению на рис. 5, а соответствует фоновая мощность дозы фонового источника  $0.01$  мЗв/ч, на рис. 5, б –  $0.02$  мЗв/ч, на рис. 5, в –  $0.03$  мЗв/ч, на рис. 5, г – более  $0.05$  мЗв/ч. Из рисунка видно, что с увеличением мощности дозы боковой подсветки в некоторой степени происходит размытие изображения точечного источника гамма-излучения; однако интегральная интенсивность области расположения источника сохраняется во всех случаях. Также в случаях, приведенных на рис. 5, в и г, заметно смещение расположения изображения точечного источника в сторону боковой подсветки.

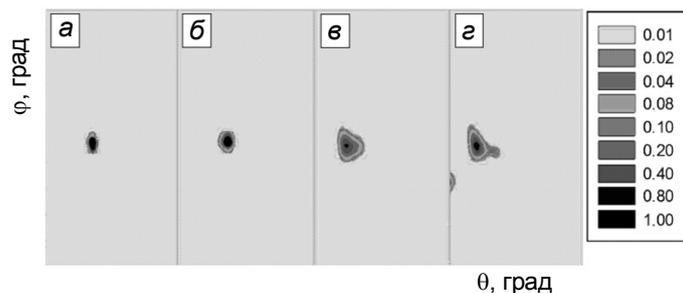


Рис. 5. Влияние фонового излучения на разрешающую способность в зависимости от мощности фонового источника: для значений фоновой мощности дозы 0.01 (а), 0.02 (б), 0.03 (в), более 0.05 мЗв/ч (г)

Полевые испытания гамма-сканера с антиколлиматором проводились в одном из помещений здания для очистки воды первого контура исследовательского реактора МР. Сканирование выполнялось в области  $70 \times 80^\circ$  с шагом  $5^\circ$  по каждому направлению. Время экспозиции в каждой точке составляло 30 с. Результаты обследования приведены на рис. 6, где показан результат наложения гамма-изображения, полученный в процессе сканирования (а) и в ходе реконструкции (б). Области загрязнения показаны изолиниями разной толщины.

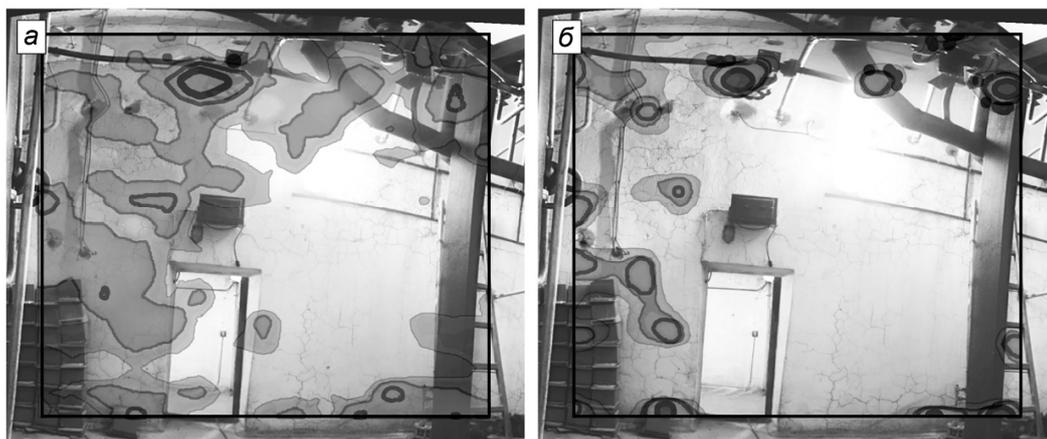


Рис. 6. Результаты измерений (а) и восстановления (б) распределения активности радионуклида цезий-137, полученные по результатам сканирования с антиколлиматором

Обследование показало наличие в помещении радиоактивного загрязнения радионуклидом цезий-137. Наложение восстановленного гамма-изображения на оптический снимок позволило локализовать наиболее загрязненные участки: вентили, сварочные швы, отдельные участки трубопровода.

Лабораторные испытания гамма-сканера с антиколлиматором показали возможность его применения для проведения работ в условиях максимальной мощности дозы в точке размещения устройства до 0.2 мЗв/ч.

### Заключение

Продемонстрирована эффективность применения методики сканирования с применением антиколлиматора для снижения массы и времени измерения сканирующих систем визуализации гамма-излучения. Общая масса прототипа гамма-сканера с антиколлиматором составила менее 4 кг, что на порядок меньше аналогичных сканирующих систем с коллиматором. Угловое разрешение системы составляет менее 6 градусов. Испытания гамма-сканера с антиколлиматором показывают перспективность применения разработанного устройства для обследования радиационно-загрязненных объектов. Продемонстрирована возможность локализации источников гамма-излучения с помощью методики сканирования с применением антиколлиматора.

Авторы выражают благодарность С.М. Игнатову и И.А. Семину за помощь в создании прототипа гамма-сканера с антиколлиматором.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Riccardo Giacconi, Herbert Gursky, Frank R. Paolini, and Bruno B. Rossi // *Phys. Rev. Lett.* – 1962. – V. 9. – P. 439.
2. Minoru Oda // *Appl. Opt.* – 1965. – V. 4. – Iss. 1. – P. 143–143.
3. Kellogg E. M. // Newton Lacy Pierce Prize Lecture, *Astrophysical Journal.* – 1975. – V. 197. – May 1. – Pt. 1. – P. 689–691, 693–695, 697–704. NASA-supported research, 1975.
4. Dicke R. H. // *Astrophys. J.* – 1968. – V. 153. – P. L101.
5. Степанов В.Е., Смирнов С.В., Иванов О.П., Данилович А.С. // *Атомная энергия.* – 2010. – Т. 109. – № 2. – С. 82–84.
6. Chiron M., Diop C.M., Gal O., et al. // *Proc. SFEN 2003 Conf. Decommissioning challenges: An Industrial Reality*, 2003.
7. Kagayaag M., Katagiriag H., Enomoto R., et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* – 2015. – V. 804. – P. 25–32.
8. Иванов О.П., Степанов В.Е., Смирнов С.В. и др. // *Ядерные измерительно-информационные технологии.* – 2011. – № 2(38). – С. 48–50.
9. Wahl Christopher, Kaye Willy, Wang Weiyi, et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* – 2015. – V. 422. 10.1016/j.nima.2014.12.110.
10. Patent. European Patent Application. Application number 94300288.1/ Date of filling: 17.01.94, Priority: 22.01.93 GB 9301206. Applicant: British Nuclear Fuels PLC Risley Warrington Cheshire, WA3 6 AS (GB).
11. Golovin V. and Saveliev V. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* – 2004. – V. 518. – P. 560–565.
12. <http://greenstar.ru>.
13. Тараско М.З., Крамер-Агеев Е.А., Тихонов Е.Б. // *Вопросы дозиметрии и защиты от излучений.* Вып. 11. – М.: Атомиздат, 1970. – С. 125–133.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663243 «Программа восстановления пространственного распределения источников излучения по результатам измерений гамма-сканером с антиколлиматором» от 14 октября 2019 г.
15. Brown M. and Lowe D. // *Int. J. Computer Vision.* – 2007. – V. 74(1). – P. 59–73.

Поступила в редакцию 20.10.2020.

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,

г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО НПФ «РАДИКО», г. Обнинск, Калужская обл., Россия

**Иванов** Олег Петрович, д.ф.-м.н., начальник отдела НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: olegivanov@mail.ru;  
**Потапов** Виктор Николаевич, д.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр. НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: potapov\_v@mail.ru;  
**Самойлова** Мария Андреевна, аспирантка НИЦ «Курчатовский институт», ведущ. инженер-метролог ООО НПФ «РАДИКО», e-mail: mariya\_baranova@list.ru.

*O.P. IVANOV<sup>1</sup>, V.N. POTAPOV<sup>1</sup>, M.A. SAMOYLOVA<sup>1,2</sup>*

## VISUALIZATION OF GAMMA-RAY SOURCES BY THE SCANNER WITH AN ANTI-COLLIMATOR

The method of gamma-images forming by scanning the area of interest using anti-collimation technique is described. This method can be used for development of devices for gamma-ray imaging. It can be applied for decommission and decontamination atomic energy facilities and in the management of radioactive waste. The use of anti-collimator scanning techniques makes it possible to significantly reduce the weight and size of the gamma-visualization system unlike the traditional scanning technique with a shield and a collimated detector.

**Keywords:** *visualization of gamma-ray sources by the scanner with an anti-collimator.*

<sup>1</sup> National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup> LLC RPE «RADICO», Obninsk, Kaluga Region, Russia

**Ivanov** Oleg Petrovich, Doctor of Science, Head of Division NRC «Kurchatov Institute», e-mail: olegivanov@mail.ru;  
**Potapov** Victor Nicolaevich, Doctor of Science, Leading Researcher NRC «Kurchatov Institute», e-mail: potapov\_v@mail.ru;  
**Samoylova** Mariya Andreevna, Postgraduate NRC «Kurchatov Institute», Leading Engineer LLC RPE «RADICO», e-mail: mariya\_baranova@list.ru.