

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 53.083.7

**ГАММА-СКАНЕР С АНТИКОЛЛИМАТОРОМ  
ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ  $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ**

© 2021 г. О. П. Иванов<sup>а</sup>, С. М. Игнатов<sup>а</sup>, В. Н. Потапов<sup>а,\*</sup>,  
М. А. Самойлова<sup>а,\*\*</sup>, И. А. Семина<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”  
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

*\*e-mail: Potapov\_V@mail.ru*

*\*\*e-mail: Mariya\_Baranova@list.ru*

Поступила в редакцию 24.09.2020 г.

После доработки 05.10.2020 г.

Принята к публикации 07.10.2020 г.

Описан способ визуализации источников  $\gamma$ -излучения, основанный на сканировании объекта исследования (аварийные радиоактивно загрязненные помещения или объекты использования атомной энергии) с применением гамма-сканера с антиколлиматором. Гамма-сканер с антиколлиматором предназначен для поиска источников  $\gamma$ -излучения в обследуемом объекте в автоматическом режиме. В отличие от традиционной схемы сканера с защитой и коллиматором детектора, использование антиколлиматора позволяет создать устройство с массой менее 5 кг. При использовании процедуры восстановления изображения источников излучения методом максимального правдоподобия обеспечивается высокое угловое разрешение порядка  $5^\circ$ . Описаны устройство прототипа такой системы и принцип ее работы, а также приведены примеры упомянутого способа обработки результатов измерений.

DOI: 10.31857/S0032816221020051

Важную роль в обеспечении радиационной безопасности играют контроль за нераспространением источников ионизирующих излучений, обследование радиоактивных загрязнений на всех этапах жизненного цикла объектов использования ядерной энергии и реабилитация объектов ядерного наследия. Для решения задач обнаружения и локализации источников  $\gamma$ -излучения на сегодняшний день существует ряд приборов, позволяющих решать эти задачи как в режиме сканирования, так и в режиме реального времени (гамма-камеры). Каждый из таких приборов имеет свои преимущества и недостатки, обусловленные спецификой решаемой задачи.

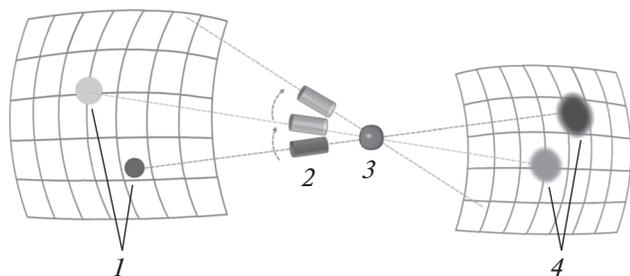
Широкое применение нашли сканирующие системы, в которых детектор помещается в массивную свинцовую или вольфрамовую защиту с небольшим апертурным отверстием для модуляции потока излучения (коллиматором) [1, 2]. Процесс измерения такой системой может занимать длительное время в силу большого количества последовательных измерений области интереса и небольшого шага сканирования, обусловленного малыми размерами апертуры коллиматора. Кроме того, значительное время занимает дополнительное сканирование, т.е. измерения с заглушкой коллиматора для последующего учета влияния

излучения, прошедшего через боковую защиту от источников, расположенных вне поля зрения детектора.

Опыт разработки и эксплуатации таких систем показывает, что повышение мобильности сканирующих устройств связано со снижением их массы. Такое уменьшение времени измерения и массы сканера может быть получено при использовании сканера с антиколлиматором.

**СПОСОБ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ  
ИЗЛУЧЕНИЯ СКАНЕРОМ С  
АНТИКОЛЛИМАТОРОМ**

Впервые техника применения антиколлиматора описана в [3] как метод обнаружения  $\gamma$ -излучения, испускаемого остатками сверхновых и активных галактик. В качестве детектора использовался размещенный на высоте полета воздушного шара сцинтилляционный счетчик, нечувствительный к направлению зарегистрированного  $\gamma$ -кванта. Ось оптического прицела была направлена в сторону исследуемой галактики, а источник периодически перекрывался массивным поглощающим диском. Большое количество измерений позволило определить значение активности источни-

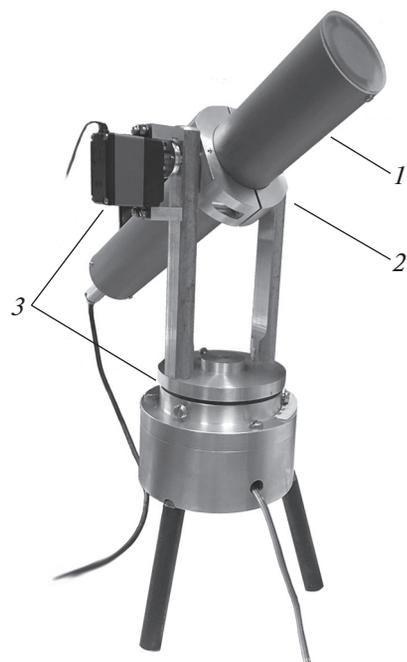


**Рис. 1.** Схема формирования теневого изображения сканером с антиколлиматором. 1 – источники  $\gamma$ -излучения, расположенные в области интереса; 2 – положения антиколлиматора в процессе сканирования; 3 – детектор; 4 – области теневого изображения.

ка, несмотря на то, что она была значительно ниже фоновой.

Способ практического применения системы с антиколлиматором для визуализации источников излучения был описан в [4]. В патенте представлено решение задачи визуализации источников  $\gamma$ -излучения для случая, когда излучение имеет преимущественно одно направление. В нем предложено решение с помощью стационарного позиционно-чувствительного детектора типа камеры Ангера, а для получения изображения объекта необходимо сформировать разностную картину изображений с антиколлиматором и без с последующей обработкой.

В настоящей работе предложен метод обнаружения источников ионизирующих излучений методом антиколлимационной визуализации сканированием, где перед открытым детектором размещается антиколлиматор – объект из материала высокой плотности, например из свинца, для модуляции потока излучения. Перемещая ось антиколлиматора относительно детектора в границах области интереса (рис. 1), можно получить приблизительно инвертированное изображение источников  $\gamma$ -излучения. В точках, когда антиколлиматор будет находиться на оси между источником ионизирующего излучения и детектором, интенсивность регистрируемого сигнала будет значительно ниже, т.е. будут формироваться теневые области. Дополнительная математическая обработка методом максимального правдоподобия позволяет получать изображения с более высоким разрешением, а наложение восстановленного изображения на фотографию области интереса дает возможность привязать их к элементам исследуемого объекта и использовать для дальнейшего анализа и оптимизации реабилитационных работ.



**Рис. 2.** Гамма-сканер с антиколлиматором. 1 – детектирующая головка; 2 – фиксатор детектирующей головки; 3 – поворотные механизмы.

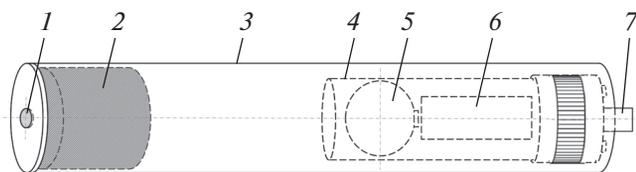
## КОНСТРУКЦИЯ ГАММА-СКАНЕРА С АНТИКОЛЛИМАТОРОМ

Гамма-сканер с антиколлиматором разрабатывался в качестве легкой и компактной альтернативы традиционному. Такой вариант сканера предназначался для обследования подреакторных помещений при выводе из эксплуатации исследовательского реактора [5]. В таких помещениях основными долгоживущими радионуклидами являются  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , и при этом предполагалось, что ожидаемая максимальная мощность дозы в точке размещения сканирующего устройства не превышает 0.1 мЗв/ч.

Гамма-сканер с антиколлиматором состоит из детектирующего блока, размещенного с помощью фиксатора на поворотно-наклонном механизме (рис. 2). Управление устройством осуществляется дистанционно персональным компьютером.

Детектирующий блок (головка) (рис. 3) состоит из антиколлиматора 2 и спектрометрического детектора 4, размещенных в едином корпусе с одной оси с видеокамерой 1. Спектрометрический детектор на основе сцинтиллятора йодида цезия  $\text{CsI(Tl)}$  5 с кремниевыми фотоумножителями и предусилительной электроникой 6 расположен в металлическом корпусе и имеет разъем 7 для подачи электропитания и вывода измерительной информации.

Чувствительный объем детектора выполнен в форме шара для сохранения анизотропии чув-



**Рис. 3.** Детектирующий блок. 1 – TV-камера; 2 – антиколлиматор; 3 – корпус; 4 – спектрометрический детектор в корпусе; 5 – сцинтиллятор детектора; 6 – предусилительная электроника; 7 – соединительный разъем.

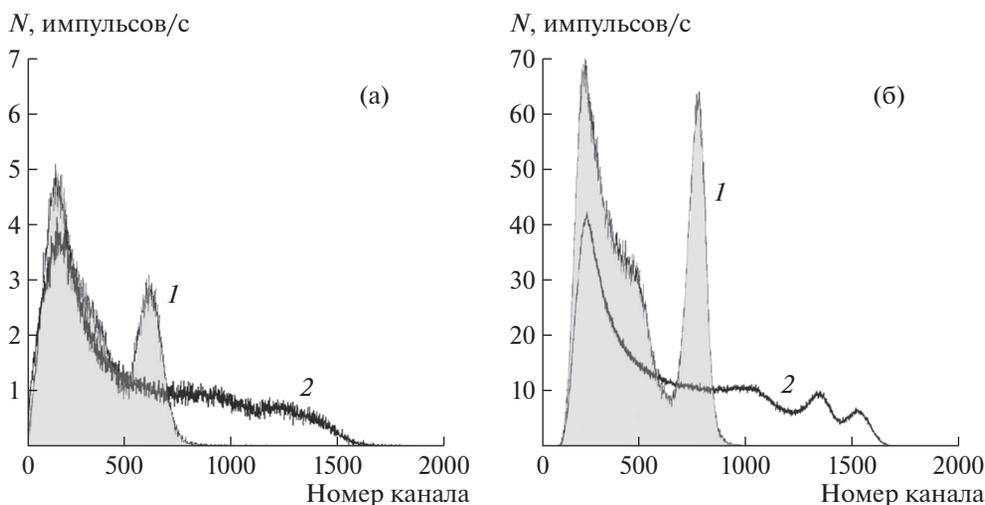
ствительности при повороте детектирующего блока. В качестве сцинтиллятора детектора применяется монокристаллический йодид цезия, активированный таллием CsI(Tl), обладающий достаточными для решения поставленной задачи эффективностью регистрации и энергетическим разрешением, а также достаточно низкой гигроскопичностью и пластичностью, благодаря чему кристаллы CsI(Tl) хорошо подвергаются механической обработке. Для ожидаемой максимальной мощности дозы в обследуемом помещении порядка 0.1 мЗв/ч из расчета предельной загрузки детектора был подобран оптимальный объем кристалла сцинтиллятора – 6 см<sup>3</sup>. Применение твердотельных кремниевых фотоумножителей [6], изготовленных в АО “Центр перспективных технологий и аппаратуры” в качестве фотоприемников, позволило изготовить компактный и легкий детектор, в котором использовались кремниевые твердотельные фотоэлектронные умножители СРТА-149-35 с размером чувствительной области 3 × 3 мм. Результаты лабораторных испытаний показали, что при применении одного фотоприемника энергетическое разрешение по линии 662 кэВ (<sup>137</sup>Cs) со-

ставляет 18% (рис. 4а). Для повышения эффективности светосбора было использовано четыре фотоприемника, что позволило добиться энергетического разрешения по линии <sup>137</sup>Cs в 12.1% (рис. 4б). Испытания спектрометрического детектора показали возможность регистрации  $\gamma$ -излучения в диапазоне энергий от 50 кэВ до 1.5 МэВ. Общие размеры детекторного блока составили  $\varnothing 40 \times 135$  мм, а масса – менее 200 г.

Для регистрации аппаратных спектров использовался спектроанализатор “Колибри” [7], предназначенный для преобразования импульсных сигналов с детектора ионизирующего излучения с последующим накоплением, преобразованием и выводом информации в виде получаемых амплитудных спектров.

Предварительное моделирование такой системы методом Монте-Карло позволило оптимизировать ее геометрические параметры. Для этого было выполнено моделирование изображений источников сканирующими системами с различными размерами и формой антиколлиматора (шар, цилиндр) и расстояниями между детектором и антиколлиматором. Моделирование выполнялось для сцинтиллятора CsI(Tl) в форме шара объемом 6 см<sup>3</sup> и антиколлиматора из свинца. Анализ результатов моделирования показал, что оптимальным является антиколлиматор в форме цилиндра высотой 4 и радиусом 1 см, размещенный на расстоянии 10 см от центра детектора.

Поворотный-наклонный механизм состоит из двух сервоприводов, один из которых осуществляет перемещение сканирующей головки по азимутальному направлению, второй – по полярному. При выборе привода для поворотного-наклонного механизма рассматривалось несколько основных вариантов: асинхронный двигатель с редуктором,



**Рис. 4.** Аппаратурные спектры радионуклидов <sup>137</sup>Cs (1) и <sup>60</sup>Co (2), полученные на одном кристалле CsI(Tl) с различным количеством фотоприемников: с одним (а), с четырьмя (б).

коллекторный двигатель, шаговый двигатель, бесколлекторный двигатель и сервоприводы. Однако поскольку для решения поставленной задачи требуется точное позиционирование детекторной головки, то в качестве вращающего элемента поворотного-наклонного механизма были выбраны сервоприводы. В качестве механического привода сканирующей системы применялся сервопривод с крутящим моментом до 18,5 кг·см, позволяющий устанавливать и удерживать угол направляющего вала в диапазоне от 0 до 180° с высокой точностью. Питание обеспечивалось от стабилизированного источника постоянного тока, управление осуществлялось контроллером поворотного механизма.

Для получения оптического изображения при создании сканирующей системы с антиколлиматором был применен ультралегкий (3 г) бескорпусной модуль видеосъемки с разрешением 8 Мпикселей. Высокая скорость работы обеспечивается передачей данных по специальному видеовходу CSI (Camera Serial Interface).

Управление системой осуществляется с помощью одноплатного компьютера со специально разработанным приложением, пользовательский интерфейс которого позволяет с помощью видеосъемки определить область интереса, установить координатные параметры и осуществить сканирование в этой области, а также запустить фоновое измерение сканера.

Для установки необходимого положения детекторной головки управляющий компьютер направляет команду контроллеру поворотного механизма. Контроллер посылает команды с соответствующими значениями координат на каждый сервопривод. После установления нового положения управляющий компьютер подает сигнал о получении фотоснимка с видеосъемки, данное изображение отображается в окне пользовательского интерфейса программы и сохраняется в заданной директории. Затем управляющий компьютер направляет команду к началу измерения с указанием текущей позиции и заданного времени измерения. Сигнал с детектора обрабатывается спектроанализатором и поступает на персональный компьютер в формате спектра из 1024 каналов по стандартному последовательному интерфейсу RS-232.

## СЦЕНАРИЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Окончательным результатом работы гамма-сканера является получение информации в виде наложения картин оптического и  $\gamma$ -изображений обследуемой области.

Для получения указанного результата дальнейшие действия реализуются тремя этапами. Поскольку первичная информация  $\gamma$ -изображе-

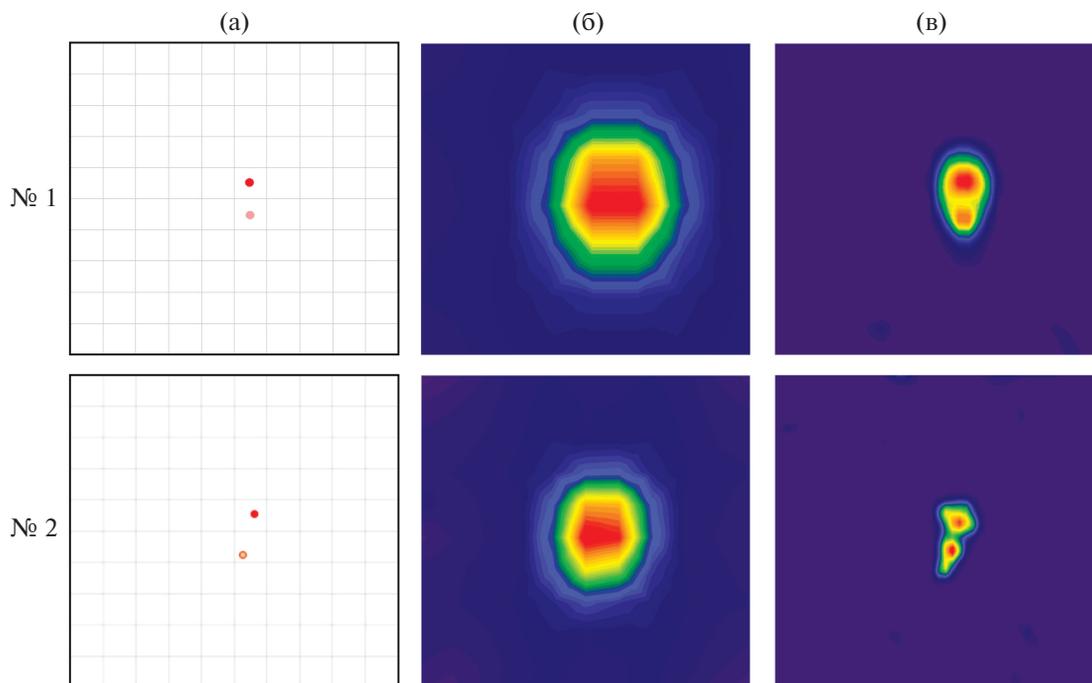
ния является теневой, то для преобразования ее путем инвертирования необходимо получить дополнительный фоновый спектр. Эта процедура является первым этапом. Фоновый спектр — это спектр от всех источников в помещении, получаемый в таком положении детекторной головки, когда антиколлиматор находится вне области сканирования, например ось детектор-антиколлиматор расположена вертикально. В дальнейшем этот спектр используется для получения разностных спектров, которые являются основой для инвертирования теневых изображений.

На втором этапе требуется формирование массива спектров в каждой точке сканирования области интереса, которое выполняется в автоматическом режиме. Для старта измерений оператор задает начальную и конечную точки сканирования, шаг перемещения и время измерения в каждой точке сканирования. После этого управляющая программа компьютера приступает к исполнению алгоритма измерений: в каждой точке сканирования детекторная головка фиксирует свое положение на время измерения, формируется спектр, соответствующий данному положению, и осуществляется фотоснимок, затем детекторная головка перемещается в новое положение.

На третьем этапе полученные данные объединяются в массив, а разностные спектры обрабатываются для восстановления картины распределения активности итерационным методом с помощью программы, использующей метод максимального правдоподобия. Затем с использованием специальных программно-технических средств выполняется сшивка оптических снимков в панорамное изображение и наложение на него  $\gamma$ -изображения.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Возможность применения антиколлимационного метода сканирования для визуализации распределения гамма-загрязнений определялась модельным экспериментом. Для этого на координатной сетке (рис. 5а) располагались два источника с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$ . На рис. 5б приведены результаты сканирования, на рис. 5в — результаты восстановления. Целью данного модельного эксперимента была оценка качества восстановления изображения источников излучения. Чтобы исключить неточность позиционирования детекторной головки при работе в автоматическом режиме, сканирование выполнялось по узлам координатной сетки, соответствующим угловому шагу 5° в ручном режиме с использованием лазерной указки. Угловое расстояние между источниками составляло 5°. Измерения проводились с использованием двух источников  $\gamma$ -излучения разной активности при соотношении 2 : 1.



**Рис. 5.** Схемы расположения двух точечных источников на сетке сканирования (а), результаты измерений (б) и восстановления (в) распределений источников с помощью гамма-сканера с антиколлиматором.

Как видно из рис. 5, восстановленные изображения имеют очень хорошее пространственное разрешение. При измерении № 1 источники размещались равноудаленно от узлов сетки сканирования, поэтому восстановленное изображение максимально точно демонстрирует расположение и соотношения активностей источников. При измерении № 2 положения источников были смещены случайным образом, и при восстановлении наблюдаются незначительные артефакты при достаточно точной локализации.

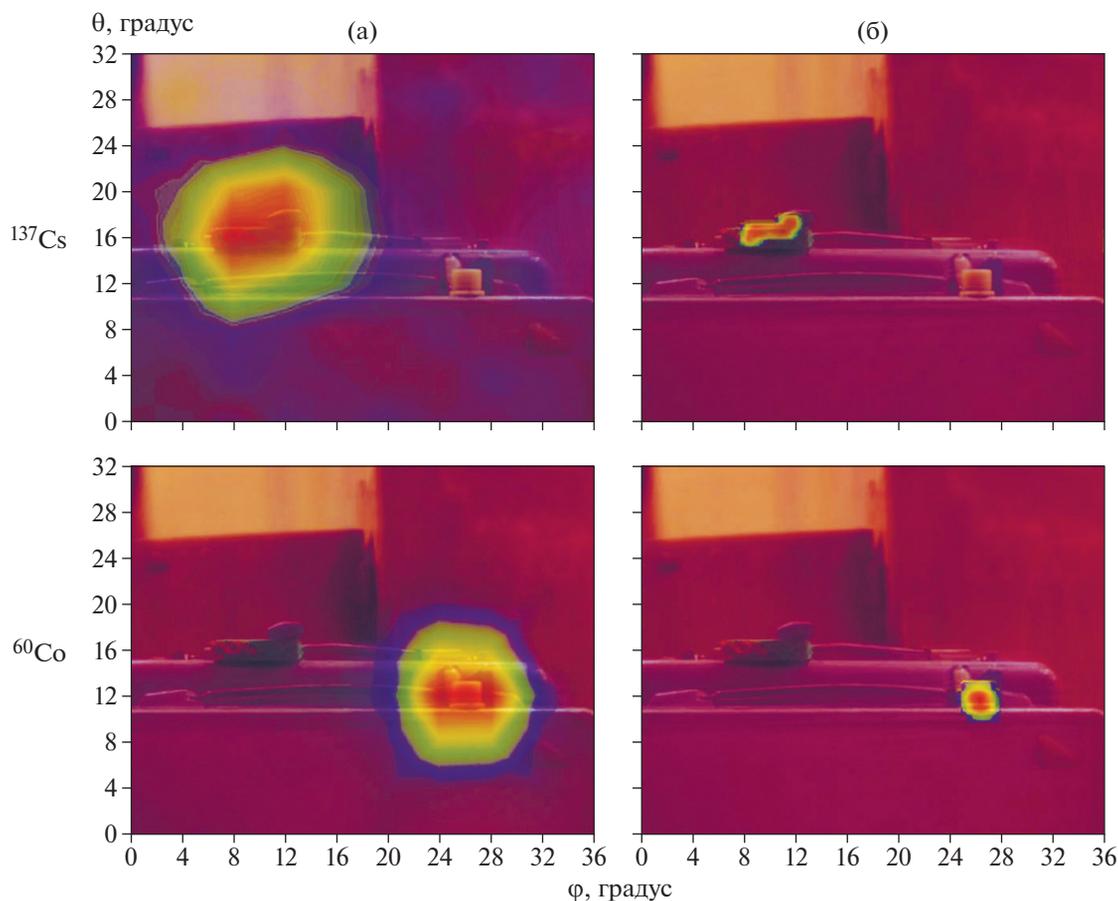
Для восстановления распределения источников  $\gamma$ -излучения была определена аппаратная функция гамма-сканера с антиколлиматором, которая представляет собой зависимость скорости счета в пике полного поглощения от углового положения точечного источника относительно оси детектор–антиколлиматор. Ширина полученной функции на половине высоты составила  $10^\circ$ .

Возможность применения гамма-сканера с антиколлиматором для идентификации радионуклидного состава загрязнения демонстрирует эксперимент по визуализации источников  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ . В области интереса размещались точечный источник с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$  и протяженный источник с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  сложной Г-образной формы. Сканирование выполнялось в автоматическом режиме с шагом  $4^\circ$  по каждому направлению. Процедура восстановления изображений источников по результатам сканирования осуществля-

лась методом максимального правдоподобия. На рис. 6 показаны результаты наложения  $\gamma$ -изображений, полученных по результатам измерения, на панорамное фото обследуемого объекта. На рис. 6а приведены результаты измерений, а на рис. 6б показаны восстановленные изображения источников  $\gamma$ -излучения с радионуклидами  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$  в области интереса. По результатам обработки экспериментальных данных для каждого радионуклида получены восстановленные изображения источников, которые не только определяют их более точное расположение, но также различают сложную структуру источника  $^{137}\text{Cs}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан легкий, малогабаритный гамма-сканер с антиколлиматором, что позволило почти на порядок сократить его массу по сравнению с системами, основанными на сканировании с коллиматором. Использование таких систем также сокращает время сканирования за счет однократного “фонового” измерения, позволяет идентифицировать источники  $\gamma$ -излучения с угловым разрешением до  $5^\circ$ . Результаты лабораторных испытаний показали, что данная реализация системы сканирования обеспечивает стабильную работу в условиях мощности дозы в точке размещения до  $0.1 \text{ мЗв/ч}$ . Предложенный способ получения  $\gamma$ -изображения позволяет не только визуализировать расположение радиоактивных источников на загрязненных



**Рис. 6.** Результаты измерений (а) и восстановления (б) распределений источников  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$  с помощью гамма-сканера с антиколлиматором.

объектах, но и идентифицировать их радионуклидный состав.

Следует отметить, что стоимость изготовления такой системы значительно ниже, чем изготовление устройства на основе любого другого метода визуализации  $\gamma$ -изображения, поскольку в данном случае не требуется применение сложных элементов, таких как позиционно-чувствительные детекторы, массивная защита с соответствующим поворотным механизмом и т.д.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы весьма признательны А.М. Сафронову за помощь при проведении модельного эксперимента.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов В.Е., Смирнов С.В., Иванов О.П., Данилович А.С. // Атомная энергия. 2010. Т. 109. № 2. С. 82.
2. Hughes K.A., Mottershead G., Thornley D.J. // WM'04 Conference. Tucson, USA. 2004.
3. Baker R.E., Lovett R.R., Orford K.J., Ramsden D. // Nature Physical Science. 1973. V. 245. P. 18. <https://doi.org/10.1038/physci245018a0>
4. Patent. European Patent Application. Application number 94300288.1/ Date of filing: 17.01.94, Priority: 22.01.93 GB 9301206. Applicant: British Nuclear Fuels PLC Risley Warrington Cheshire, WA3 6 AS (GB).
5. Danilovich A., Ivanov O., Potapov V., Semenov S., Semin I., Smirnov S., Stepanov V., Volkovich A. // WM'2013 Conference. Phoenix, USA. 2013.
6. Golovin V., Saveliev V. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 2004. V. 518. P 560. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.11.085>
7. <http://www.greenstar.ru>