

Опыт применения портативных гамма-камер (гамма-визоров) в работах по выводу из эксплуатации и реабилитации ОИАЭ

Обобщен опыт применения различных портативных гамма-камер при проведении работ по выводу из эксплуатации и реабилитации ОИАЭ в НИЦ Курчатовский институт. Приведены типичные примеры использования камер, предложены направления улучшения их функциональности, рассмотрены перспективы метода получения гамма-изображений и возможных новых применений портативных гамма-камер.

**О.П.Иванов, В.М.Ковалев,
А.В.Степанов, В.Е.Степанов,
Е.А.Степанов**

(НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва)

Ключевые слова: гамма-изображения, портативные гамма-камеры, дистанционная дозиметрия, радиоактивное загрязнение.

Во время проведения в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» работ по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) – объектов исторического наследия, связанных с работами по применению атомной энергии на начальном этапе – опробовались и применялись различные новые технологии. Среди них были и новые технологии характеризации радиоактивно-загрязненных объектов. Во многих случаях получение данных для характеризации удобно проводить дистанционными методами, одним из которых является использование портативных гамма-камер (гамма-визоров) для получения распределения излучения радиоактивных объектов в виде их гамма-изображений. За последние 20 лет произошло значительное

изменение в области создания таких приборов – кроме камер на основе принципа камеры обскура (пинхольные камеры), появились камеры с кодирующими апертурами, а в последние годы и камеры на основе комптоновского рассеяния. Разные системы всех указанных типов были испытаны и применялись в проведенных работах. В статье рассмотрен опыт использования 7 различных камер – как опытных лабораторных образцов, так и коммерческих продуктов (к сожалению, в основном зарубежного производства) на разных стадиях проведения работ. Дано краткое описание характеристик камер, рассмотрены задачи, решаемые с их использованием, даны практические соображения о применении камер разных типов.

Методы

Для получения гамма-изображений применялись следующие камеры (здесь мы вводим для них цифровые обозначения):

- Камеры 1а и 1б – разработки Курчатовского института с детектором, собранным из российских компонентов (сцинтиллятор, фокон, МКП-ЭОП, ПЗС-матрица). Исходный вариант 1а [1-3] имел пинхольный коллиматор. В модифицированном варианте 1б [5] простой коллиматор был заменен на кодирующую апертуру с маской типа *MURA*. Вращающиеся маски типа *MURA* [4,6] позволяют уменьшить влияние фона и увеличить чувствительность системы.
- Камера 2 – портативная камера «Картогам» фирмы

«Канберра». Это пинхольная камера со сцинтилляционным детектором на основе фоконов, МКП электронно-оптического преобразователя и ПЗС для считывания сигнала. Особенность камеры – это получение видео и гамма-изображений через одну и ту же оптику на одной ПЗС. Также для уменьшения фона при работе в полях с низкими мощностями дозы проводится покадровая фильтрация отдельных регистрируемых событий в ПЗС-сенсоре [7].

- Камеры 3 [8], 4 [9] и 5 [10] – это похожие по устройству легкие камеры на базе детектора «Медипикс» с использованием разных кодирующих масок.
- Камера 6 – первая коммерческая портативная комптоновская камера «Поларис»

Табл.1. Характеристики портативных гамма-камер, применявшиеся в работах.

N	Камера, ссылка	Тип	Энергетический диапазон, МэВ	Энергетическое разрешение, % (662 кэВ)	Угловое разрешение, град.	Чувствительность, изображение, нЗв (662 кэВ)	Площадь детек., см ²	Объем детек., см ³	Материал детектора
1а	Курчатовский инст. [1,2]	P-h	0,06–1,5	-	2	50	10	3	CsI(Tl)
1б	Курчатовский инст. [5]	C-A	0,06–1,5	-	2	5	10	3	CsI(Tl)
2	«Cartogam», Canberra [7]	P-h	0,04–1,5	-	3	30	8	3,2	CsI(Tl)
3	Курчатовский инст.[8]	C-A	0,04–1,5	-	1,2	150	2	0,4	CdTe
4	iPIX, Canberra [9]	C-A	0,04–1,5	8	2–5	20	2	0,4	CdTe
5	ФВКМ, НПП «Доза», [10]	C-A	0,04–1,5	-	0,5–3	50	2	0,4	CdTe
6	«Polaris», НЗД, [11]	C-C	0,04–1,5	1,1	20 (для точ. ист. – 5)	0,8	4×4	~20	CZT

со спектрометрическими CZT 3-D детекторами. Гамма-изображение получается с использованием принципа комптоновского рассеяния [11,12].

Основные характеристики применявшихся камер приведены в табл.1.

Результаты

В проводимых в НИЦ «Курчатовский институт» работах гамма-камеры применялись для решения разных задач, эффективность их использования и результаты описаны ниже. Все гамма-изображения получены при проведении работ, поэтому некоторые из них недостаточно четкие или контрастные. Это связано с недостатком времени для получения более качественных изображений. Палитра, которая применяется при наложении гамма-изображений на видеоизображение, отличается у разных камер.

Гамма-изображение, наложенное на видеоизображение, это, как правило, итоговое представление результатов измерений. Сигнал в каждом элементе изображения поля зрения камеры представляет парциальную дозу излучения на единицу телесного угла, полученную за время экспозиции. Он включает и фоновую добавку, связанную с методом получения изображения и статистикой регистрируемых гамма-квантов. Эту фоновую часть обычно отбрасывают на уровне 30–50% от максимального значения в изображении. Поэтому для детального анализа результатов измерений надо рассматривать полное гамма-изображение.

Камера 1а применялась при поиске источников на территории временных хранилищ РАО, непрерывном (в течение рабочей смены) контроле за разборкой хранилища, содержащего высокоактивные РАО, контроле

остаточного загрязнения хранилищ после удаления РАО, поиске источников в помещениях, определении распределения загрязнения на отдельных объектах.

На рис.1 показан вид гамма-камеры 1а при поиске отдельных гамма-источников на почве в работах на площадке хранилищ РАО и изображение экрана прибора во время непрерывного контроля за разгрузкой хранилища с высокоактивными пенами.

В работах по разгрузке хранилища N 6 прибор проработал несколько месяцев в зимний период, непрерывно регистрируя изображения в течение рабочей смены продолжительностью 6 часов. Операторы роботов Брок использовали комбинированные гамма-видео изображения для управления роботами (рис.2).

На рис.3. показано применение системы при контроле остаточного загрязнения выгруженного приобъектового



Рис.1.
Гамма-камера 1а в работах на площадке хранилищ РАО (а) и изображение на экране прибора во время непрерывного контроля за разгрузкой хранилища N 6 с высокоактивными пенами (б).

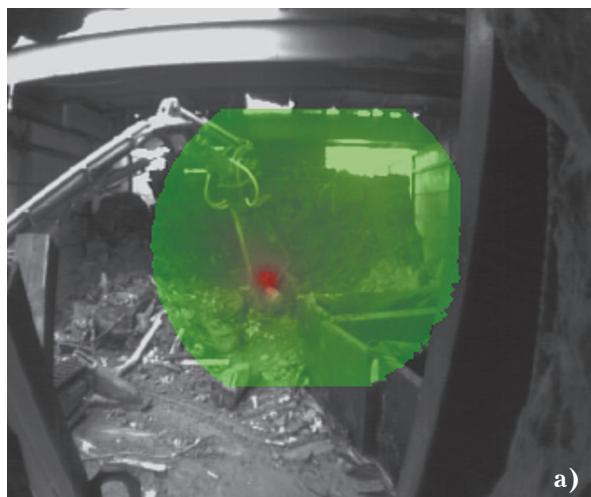


Рис.2. Контроль за перемещением пеналов с РАО при разгрузке хранилища N 6.

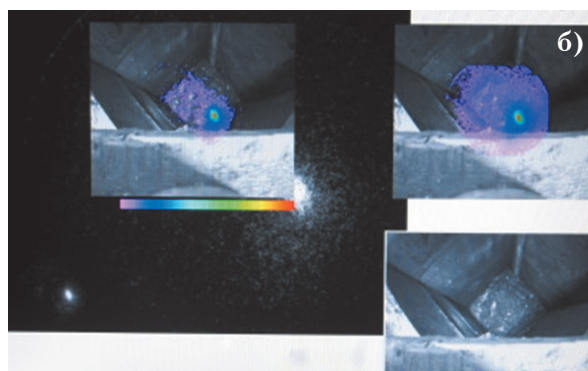


Рис.3. Контроль остаточного загрязнения выгруженного приобъектового хранилища.

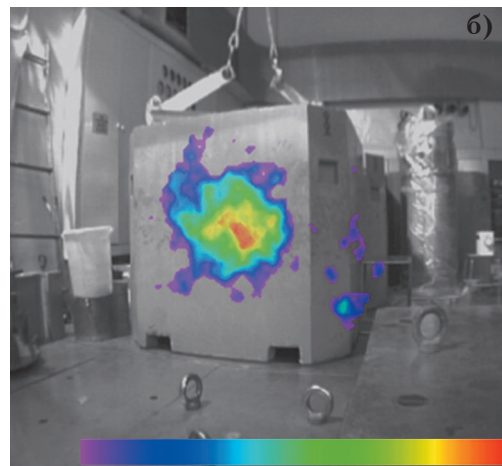


Рис.4. Вид камеры 16 (а), гамма-изображение контейнера с РАО, сделанное для контроля однородности распределения РАО в контейнере (б).

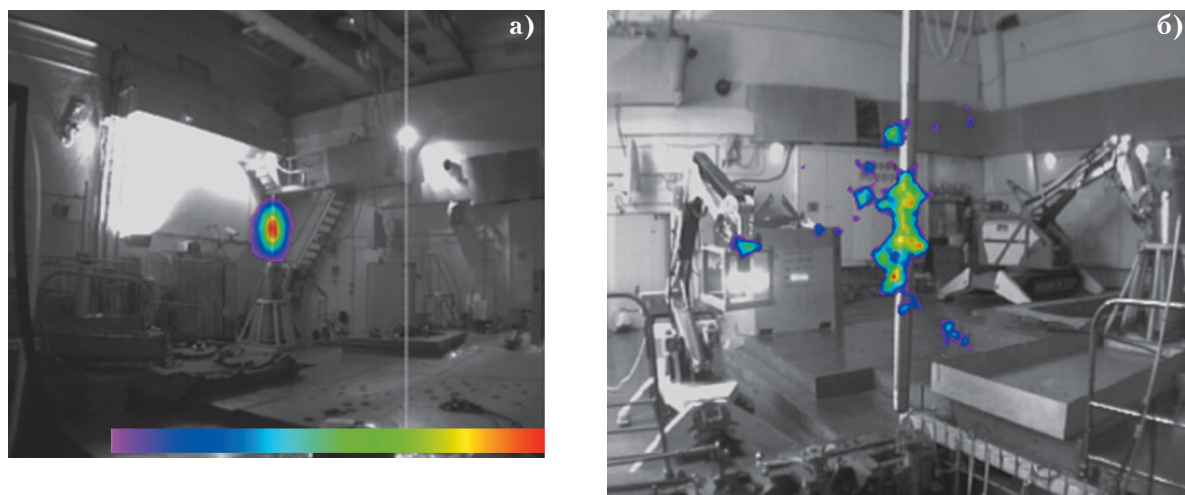


Рис.5. Контроль за загрузкой активного элемента в ТУК (а), применение камеры для определения области наибольшего загрязнения вдоль элементов реакторных петель (б).

хранилища. На дне хранилища обнаружен небольшой достаточно активный объект.

Модифицированным вариантом камеры 1а является **камера 1б**. Пинхольный коллиматор был заменен на кодирующую маску, детектор оставался прежним, разработано новое программное обеспечение [4,5]. Камера использовалась в текущей работе по выводу из эксплуатации реактора МР [4]. С ее помощью получались распределения загрязнения элементов конструкции вспомогательных петель реактора, проводилась съемка необходимых локальных сцен при различных операциях (поиск источников, характеристика загрязненных объектов, резка петель, определение заполнения пеналов отходами с большой активностью). Измерения проводились при МЭД от 0,1 мР/ч до 5 Р/ч в точке установки камеры.

Камера 2 применялась для получения изображений локальных сцен, необходимых при проведении работ: поиск небольших активных источников, характеристика протяженных объектов, сканирование пеналов с высокоактивными РАО. Получение изображений велось в широком диапазоне МЭД в точке расположения прибора – от 30 мкР/ч до 3 Р/ч. Кроме установки на стандартную треногу, камера подвешивалась в специальной корзине над шахтой реактора и над люком камеры резки. Типичные результаты показаны на рис.6, 7.

Интересен и опыт неудачного применения камеры. Была сделана попытка с помощью одного гамма-изображения определить точное распределение дефекта толщины стенки внутриобъектового транспортно-упаковочного контейне-

ра (ВТУК) по регистрации излучения перевозимого в нем длинного тонкого источника. Предварительная оценка дозиметром показывала, что дефект имеет протяженный несимметричный характер (зеленый контур на рис.7-2). Но на любом гамма-изображении, в любом ракурсе видно небольшое круглое пятно. Понятно, что оно находится в точке пересечения луча, попадающего в гамма-камеру, с перпендикулярным оси дефектом. Поэтому для получения истинной формы дефекта по гамма-изображениям надо делать ряд изображений при разных поворотах ТУК относительно камеры и находить форму путем их объединения.

Другой пример связан с получением изображений протяженных объектов при поиске возможного основного загрязнения (пятен) в них. Из-за протяженного характера

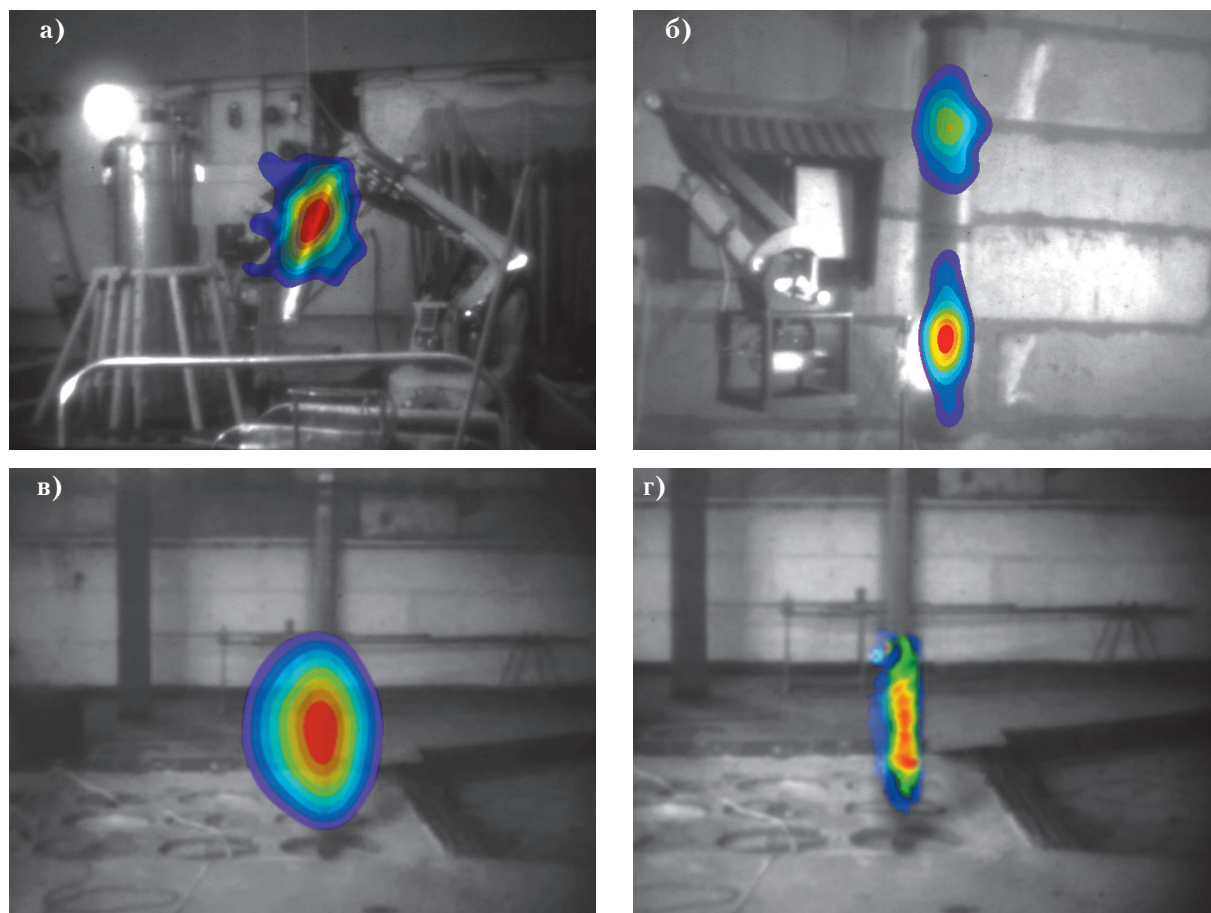


Рис.6-1. Применение камеры «Картогам». Робот «Брокк» переносит активный элемент реактора в ТУК (а). Измерение распределения РАО в пеналах (б) и (в): исходное гамма-изображение (в) и изображение, обработанное итерационной процедурой (г).

источника в изображении имеется значительный статистический шум. При представлении изображения с ограничением уровня сигнала «снизу» на протяженном загрязнении заметны максимумы (пики на рис.7-3а). Но они имеют статистический характер, а не отражают реальное распределение загрязнения, которое в пределах статистического разброса сигнала меняется незначительно. Это видно при рассмотрении гамма-изображения в полном диапазоне сигнала (рис.7-3б).

Рис.8 иллюстрирует использование функции оценки измеряемой камерой парциальной мощности дозы для характеристики найденного источника. При сопровождении работ по демонтажу реактора РФТ проводился поиск горячих точек на дне шахты. Измерения проводились дозиметром и гамма-камерой «Картогам». Расстояние от камеры до дна шахты $H = 3,9$ м, диаметр шахты $D = 2,9$ м. МЭД на срезе шахты 40–70 мР/ч (доза, измеренная дози-

метром у горячей точки, 8 Р/ч). «Картогам» определил МЭД от сильного пятна как 20 мР/ч. Как показывает полное представление распределения излучения (рис.8б), это единственное мощное пятно. Такая мощность дозы может быть создана источником примерно 0,1 Ки Cs-137. Так как облучение топлива завершилось не менее 30 лет назад, то для этого распалось 0,3 г U-235. Приблизительно оценивая обогащение и плотность топлива, для объема объекта

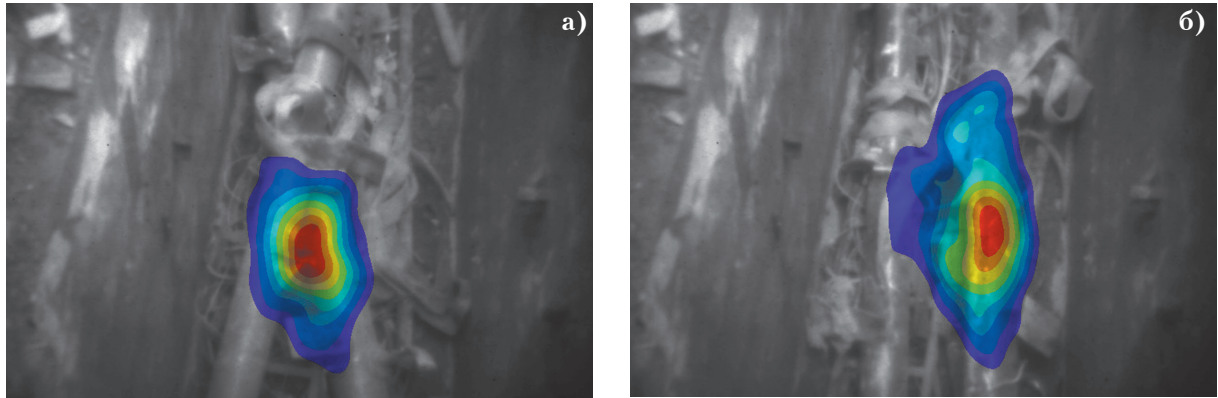


Рис.6-2. Применение камеры «Картогам». Выбор наиболее загрязненного пенала в каньоне. Активное пятно находится между пеналами (а), пенал с большим загрязнением выбран (б).

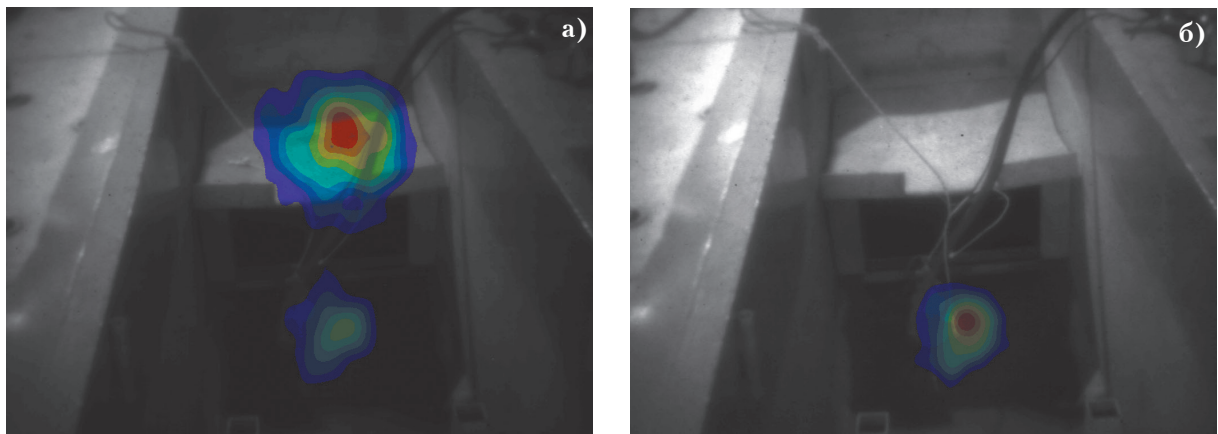


Рис.7-1. Поиск небольшого активного источника. Положение источника определено – верхнее пятно (а), источник удален (б).

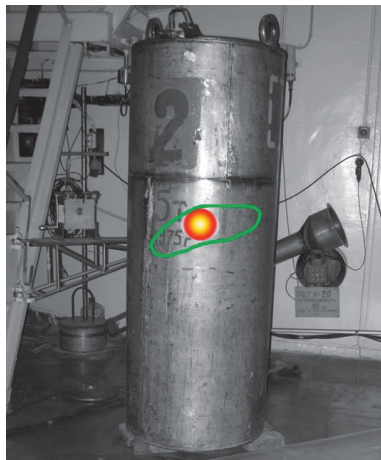


Рис.7-2. Изображение ВТУК, имеющего дефект. Изображение создается активным протяженным источником внутри контейнера. Зеленый контур – оценка формы дефекта, сделанная дозиметром.

получаем $0,3 \text{ м}^3$. Активным объектом мог бы быть обломок графита из кладки реактора, но удельная активность Cs-137 и других гамма-излучателей в графите не больше 10^8 Бк/кг , поэтому фрагмент графита должен иметь объем порядка 10 литров. Так как объект визуально не больше сантиметра, то можно сделать вывод, что обнаружен небольшой обломок облученного ТВЭЛа из реактора.

Камеры 3, 4 и 5. Эти три достаточно легкие и обладающие хорошей чувствительно-

стью камеры (рис.9) основаны на универсальном позиционно-чувствительном детекторе «Медипикс» с полупроводниковым кристаллом CdTe [8]. Камеры используют кодирующие апертуры разных типов. Описание характеристик камер дано в [8-10].

С помощью этих камер возможно получение изображений с рук для достаточно активных точечных источников. Камеры можно использовать при разных работах (упаковка/укладка объектов в контейнеры, поиск источников,

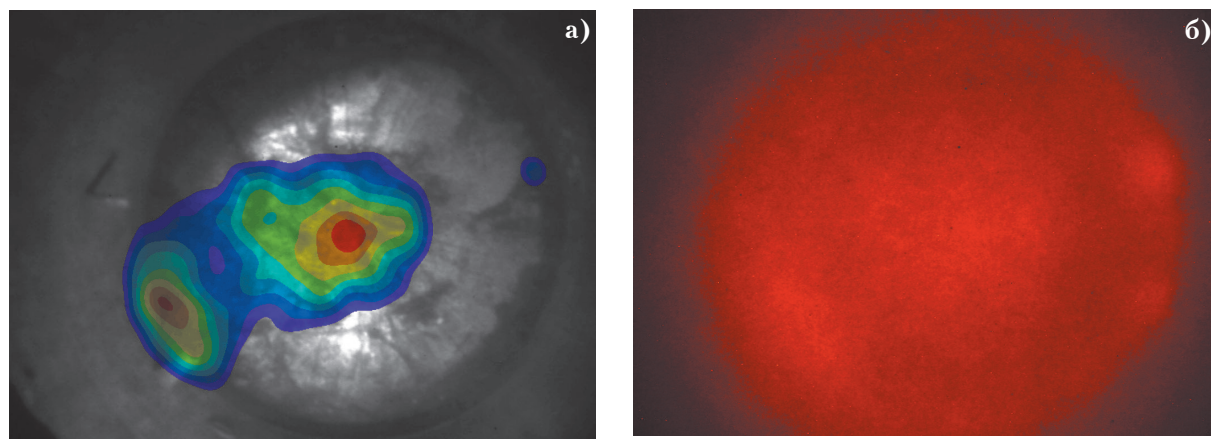


Рис.7-3. Поиск загрязняющих объектов на дне реакторного сосуда после удаления элементов реактора. Автоматическое представление изображения программным обеспечением с удалением более слабого сигнала (а) и полное представление распределения излучения, поступающего со дна (б).

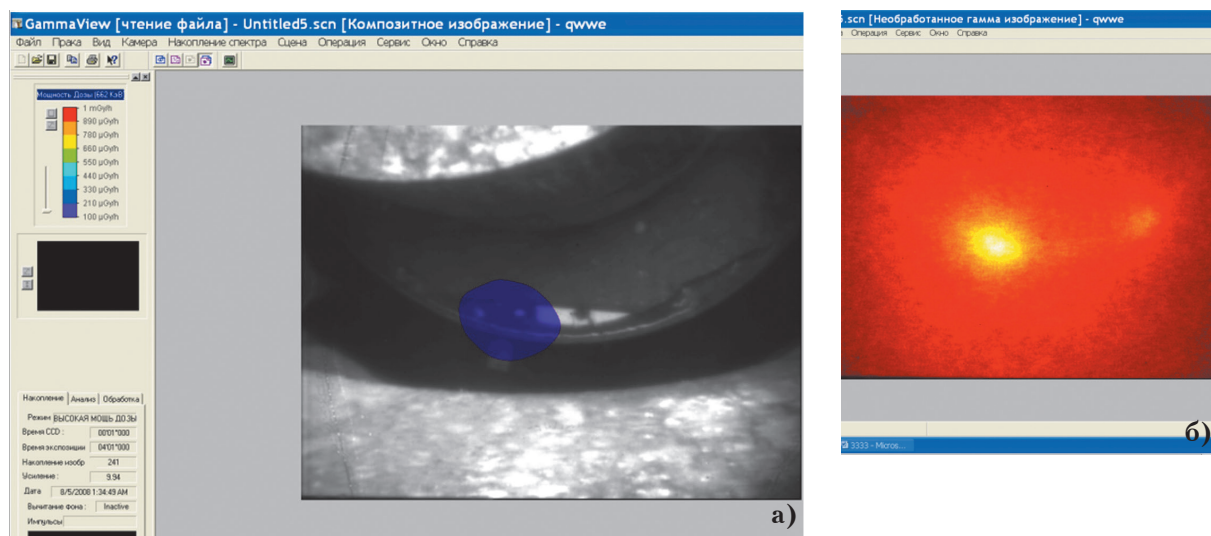


Рис.8. Локализация и характеристика источника на дне шахты реактора РФТ после удаления элементов зоны. Автоматическое выделение программным обеспечением области с повышенным излучением и оценка парциальной МЭД из этой области (а), полное представление распределения излучения (б).

контроль защитных ТУК, установка временной радиационной защиты). Изображение пенала на рис.10б получено камерой, установленной на штатив, с применением процедуры маска-антимаска [4]. МЭД в точке расположения прибора 100 мР/ч, МЭД на расстоянии 10 см от пенала 100 Р/ч, расстояние

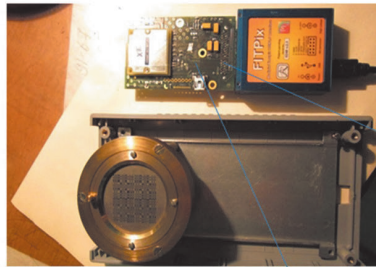
до этих областей примерно 7 м. Экспозиция 300 сек.

На рис.11–13 показаны результаты измерений с использованием камеры 4 для загруженных контейнеров НЗК-150 за бетонной стеной биологической защиты и около нее. На рис.11 видна щель между плитами и излучение, исходящее из этой щели. Дан-

ный источник излучения был известен дозиметристам, но именно система iPIX позволила получить детальное распределение этого излучения.

На рис.12 показано явление обратного рассеяния – дополнительный источник выше контейнеров на бетонной защите. Обратное рассеяние обусловлено из-

Прототип
НИЦ КИ



Camera iPIX
Canberra

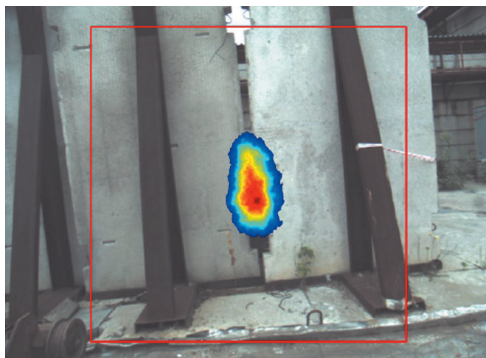
Камера ФВКМ
НПП «Доза»



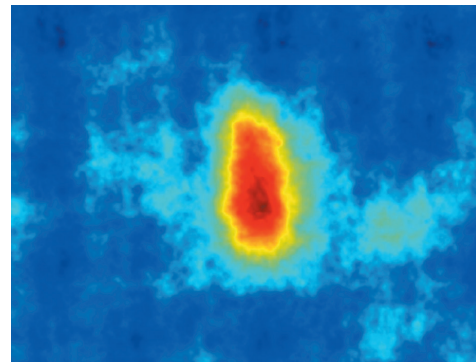
Рис.9. Фото трех камер, использующих детектор «Медипикс». Вверху в центре детектор «Медипикс» и одна из используемых кодирующих масок [8].



Рис.10. Камера 3. Получение изображения без установки камеры на штатив (а). Изображение пенала, содержащего РАО с нуклидом Co-60 (б).

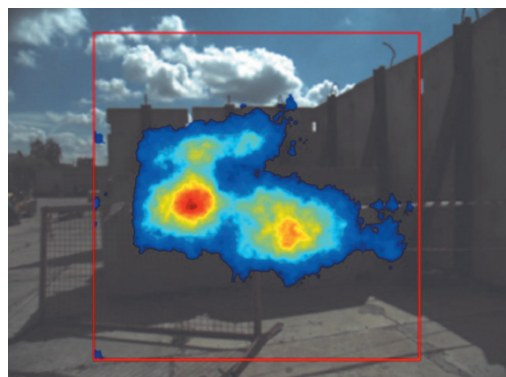


Superimposed Image

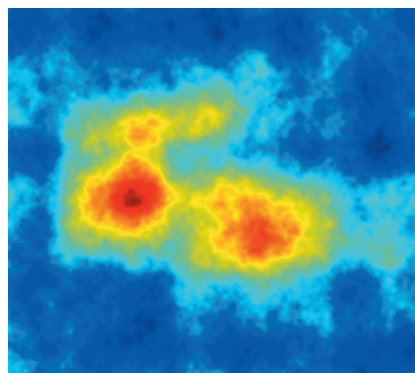


Decoded Gamma Image

Рис.11. Гамма-изображение контейнера за защитной стенкой [9].

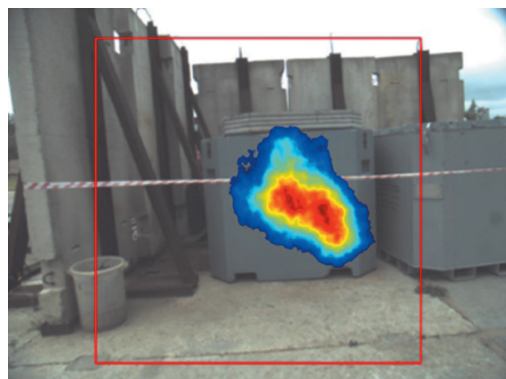


Superimposed Image

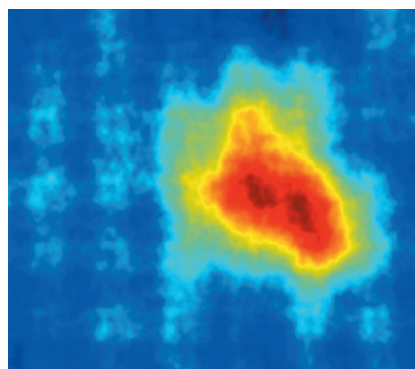


Decoded Gamma Image

Рис.12. Камера 4. Гамма-изображение контейнеров, дающих обратное рассеяние гамма-излучения на защитной стенке [9].



Superimposed Image



Decoded Gamma Image

Рис.13. Несколько линейных объектов в контейнере НЗК [9].

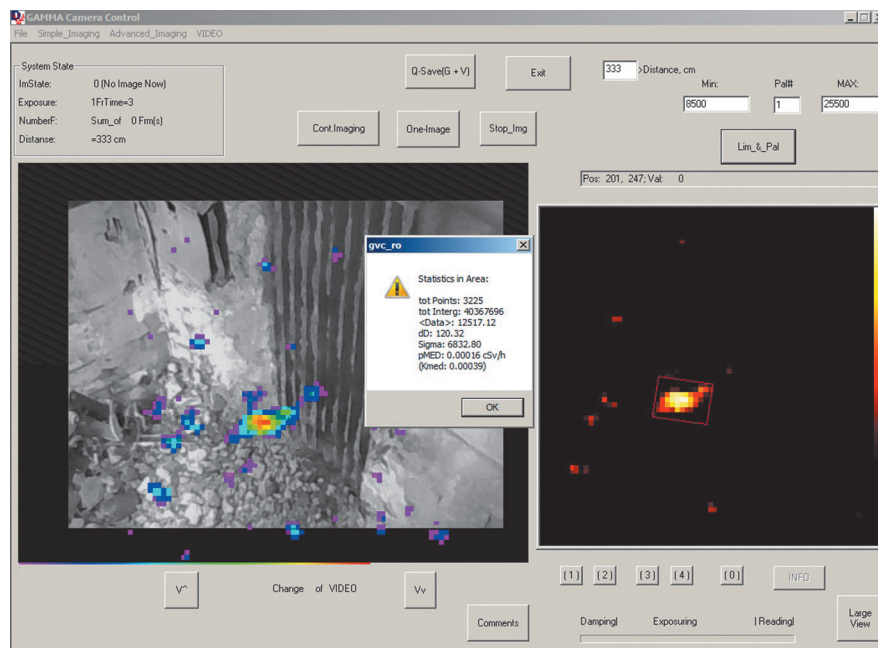


Рис.14. Камера 5. Пример определения МЭД из заданного телесного угла по полученному гамма-изображению.

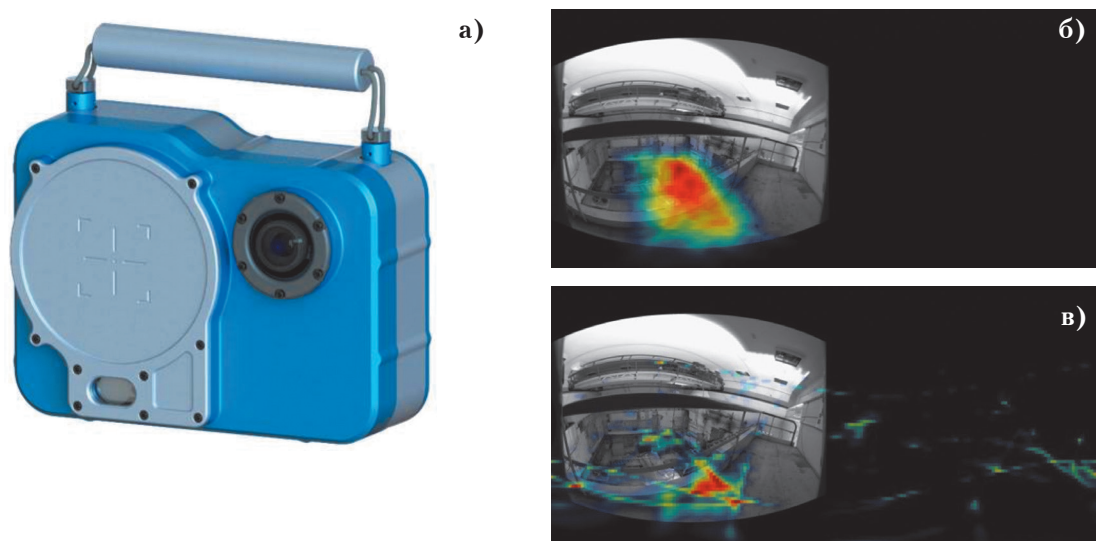


Рис.15. Комptonовская гамма-камера «Поларис» (а) [13]. Гамма-изображение загрязнения в зале реактора, выведенного из эксплуатации: нуклид Cs-137 (б), нуклид Co-60 (в). МЭД в точке расположения прибора 1,0 мР/ч, МЭД в области расположения активных источников 30 мР/ч, расстояние до этих областей примерно 15 м. Экспозиция 240 сек. [13].

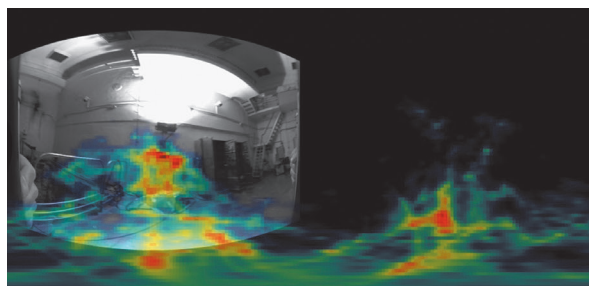


Рис.16. Помещение с загрязнением на полу – отдельные точки ближе к «южному» полюсу картины распределения загрязнения растягиваются в горизонтальные линии. Нуклид Cs-137, МЭД в точке расположения прибора 3 мР/ч, МЭД на расстоянии 10 см от пятен 5–8 мР/ч, расстояние до стен примерно 10 м. Экспозиция 200 сек. [13].

лучением, исходящим из контейнера, стоящего во втором ряду рядом с защитной стенкой. Таким образом, по обратному рассеянию излучения можно обнаруживать источники излучения в местах, труднодоступных для дозиметриста.

На рис.13 представлено изображение нескольких линейных объектов (пеналов с ионообменной смолой), находящихся в контейнере. Через бетонную стенку контейнера хорошо видна структура объектов.

Последние версии камеры 4 включают детектор CZT объемом 1 см³ в коллиматоре, направленном соосно с гамма-камерой для оценки нуклидного состава отображаемого загрязнения.

Применение камеры 5 состояло в поиске активных источников, контроле за дозовой обстановкой (рис.14). Программное обеспечение камеры имеет удобную и полезную функцию определения парциальной МЭД (и других характеристик изображения) в выбираемой оператором

области [10]. Используя эту функцию, оператор оценивает парциальный вклад в МЭД в точке расположения прибора от выбранной им области и, таким образом, имеет возможность определить основные источники излучения, создающие МЭД в этой точке. Например, как видно на рис.14, выделенный источник создает в точке расположения камеры МЭД 0,00016 сЗв/ч (0,0016 мЗв/ч = 0,16 мР/ч).

Камера 6 – комptonовская камера «Поларис», фирма НЗД (рис.15а). Камера приме-

нялась для исследования общей картины дозовой ситуации в месте проведения работ и поиска создающих ее источников. Оперативно получаемые изображения со спектральным разрешением – это подсказка по определению возможных источников. Места применения – центральный зал реактора МР, отдельные помещения и площадка территории приобъектовых хранилищ РАО. Высокая чувствительность и построение изображений для разных энергий излучения – большой плюс при контроле за текущей ситуацией как при проведении работ, так и при контроле остаточного загрязнения после проведения дезактивационных и реабилитационных работ. Результаты применения камеры приведены на рис.15–17. Отобраны изображения, которые показывают уникальные возможности комптоновских камер.

Обсуждение

Как показывают результаты работ по выводу из эксплуатации и реабилитации радиационно-опасных объектов Курчатовского института, гамма-камеры являются полезным, а иногда и единственным инструментом для определения характера распределения активности в/на объектах при различных

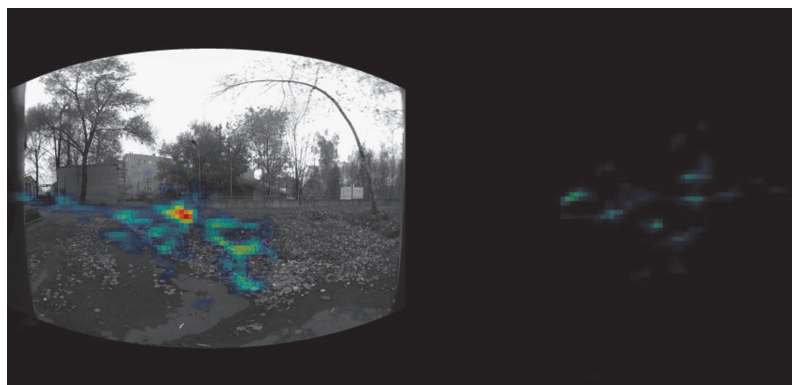


Рис.17. Найденное незначительное загрязнение почвы нуклидом Cs-137 в зоне особого контроля. МЭД в точке расположения прибора 25 мкР/ч, МЭД на расстоянии 10 см от пятна 70 мкР/ч, расстояние до горячей точки примерно 6 м. Экспозиция 600 сек. [13].

уровнях МЭД. Целесообразно использовать гамма-камеры при подготовке к проведению работ, например, по дезактивации, а также непосредственно при операциях, например, резке неравномерно загрязненных элементов оборудования, контроле результатов дезактивации.

Данные о создаваемом объектами гамма-поле позволяют контролировать упаковку контейнеров, правильность создания радиационной защиты, определять нежелательное рассеяние излучения от открытых источников на окружающих конструкциях.

Необходимо указать и выявленные недостатки использованных камер, которые желательно доработать для повышения их эффективности и удобства использования.

В конструкции камер желательно предусмотреть возможность их надежного крепления на различные

средства доставки – крановое оборудование, манипуляторы роботов. Например, сделанная нами подвеска в виде корзины для достаточно тяжелой камеры «Картогам» на крюк мостового крана позволила проводить измерения над высокоактивными объектами (рис.7-3).

В программном обеспечении почти у всех камер отсутствует функция сохранения изображения, содержащего гамма-сигнал, в доступном для пользователя формате, например, в черно-белом *.BMP или *.TIFF файле для самостоятельной обработки полученных изображений пользователем.

Программное обеспечение камер позволяет определять значение МЭД из определенной области (парциальную мощность дозы в точке установки камеры) в предположении о наличии нуклида, на излучение которого

проведена калибровка. Для комптоновских камер парциальную МЭД можно определять по отдельным нуклидам. Эту, безусловно, важную функцию необходимо дорабатывать. Следует также устранить неправильности цветовой шкалы у некоторых камер и создать возможность выбора области для оценки парциальной МЭД. Так, в программном обеспечении камеры «Поларис» шкала интенсивности МЭД на изображениях не связана с фактически измеряемой парциальной МЭД (т. е. (мР/ч)/стерадиан), нет возможности определения парциальной МЭД из выделенной области.

В программном обеспечении всех камер желательно предусмотреть возможности для автоматизации процесса измерений для работы камеры по различным сценариям. Например, сделать возможным получение нескольких последовательных изображений, старт экспозиции от внешнего сигнала.

При разработке камер принимается определенный компромисс в выборе углового разрешения и чувствительности при получении гамма-изображений. Для всех типов систем была показана возможность улучшения углового разрешения путем обработки полученных гамма-изображений с помощью

итерационного алгоритма Тараско. Один из примеров улучшения пространственного разрешения гамма-изображения показан на рис.6-1г, более подробные результаты приведены в [13-15].

Выводы

Полученный нами опыт использования портативных гамма-камер показывает, что гамма-изображения, как дистанционный метод исследования дозовой обстановки и распределения загрязнения объектов, является важной процедурой сопровождения работ по выводу из эксплуатации и реабилитации ОИАЭ. Поскольку рабочие характеристики зависят от типа камеры, для решения разнообразных возникающих задач целесообразно применять разные типы камер.

Комптоновские камеры имеют большой угол зрения – порядка 90×90 град. (а некоторые до 4π), обладают высокой чувствительностью, регистрируют изображение с энергетическим разрешением. Из-за необходимости регистрировать спектральную информацию рабочая МЭД для таких камер ограничена – порядка $0,1$ Р/ч и ниже. Камеры регистрируют изображения гамма-источников с энергией большей $200-300$ кэВ. Для преодоления этого ограничения неко-

торые камеры дополняются также кодирующими масками для получения изображений при низких энергиях.

Камеры на основе пинхола или кодирующих масок, как правило, используют детекторы, работающие в токовом или счетном режиме. Они имеют меньший угол зрения (порядка $30-40$ град.), могут работать в условиях МЭД до десяти Р/ч. Существуют также камеры этих типов, работающие в спектрометрическом режиме, при этом значительно уменьшается МЭД для их применения. Имеются разработки камер с несколькими кодирующими масками и детекторами для увеличения угла обзора.

Применение кодирующих масок для малых энергий в комптоновских камерах можно расширить и на диапазон высоких энергий, переводя детектор в токовый или счетный режим. Таким образом, появляется возможность работать при более высоких МЭД.

В настоящее время в мире ведутся разработки всевозможных портативных гамма-камер, и они образуют целую линейку визуализирующих гамма-излучение приборов – от миниатюрной камеры nanoPIX [22] до сложных и дорогостоящих комптоновских камер фирмы H3D [12].

Для существующих в настоящее время камер уже

можно определить практически важные и массовые области использования. Так, портативные комптоновские камеры (типа «Поларис», «ДЕЛЬТА-Т») целесообразно использовать для решения следующих задач:

- быстрый оперативный контроль на качественном уровне расположения источников в работах по выводу из эксплуатации – приблизительно где и какие источники присутствуют (здесь не важно, что у изображений плохое пространственное разрешение);
- определение положения основных дозообразующих источников при планировании защитных мероприятий;
- поиск слабых источников загрязнения, которые незаметно превышают фоновый уровень;
- заключительный/выходной контроль дезактивированных помещений, объектов;
- использование в качестве полевого спектрометра для решения некоторых задач. Например, на основе комптоновских камер можно разработать методики характеристики РАО в различных упаковках без применения спектрометров с тяжелыми коллиматорами.

Для гамма-камер с «механической» оптикой (кодирующей маской или обскурой) имеются и другие области

применения. Это работа в высоких гамма-полях, получение изображений с высоким пространственным разрешением при проведении технологических операций, например, резки. Объединение нескольких методов получения гамма-изображения в одной системе может расширить круг решаемых задач.

Реализация новых методов измерений для определения характеристик объектов в стандартной геометрии – характеристика различных упаковок с РАО, измерение загрязнения почвы и конструкций – также возможна и будет способствовать более широкому применению метода получения гамма-изображений на объектах использования атомной энергии.

Методы получения гамма-изображений для сопровождения работ в ядерном комплексе с помощью гамма-камер, несомненно, перспективны. Для расширения применения этих методов требуется знакомство с их возможностями и оборудованием, проведение обучения. Если у потребителя есть выявленная и методически формализованная задача для использования камер в рутинном режиме, то возможна автоматизация работы камеры для использования ее техниками, лаборантами, дозиметристами без привлечения высококвалифицированного персонала.

Для использования камеры в нестандартных ситуациях – при авариях, в случае сложного распределения дозовых полей или сложного состава источников – необходимо специальное обучение персонала. В частности, базой для такого обучения может служить НИЦ «Курчатовский институт», где имеются высококвалифицированный персонал и необходимые радиационно-физические условия для проведения практических измерений и обучения.

Заключение

Разработки в области создания новых портативных гамма-камер продолжают во многих странах. Испания, Южная Корея, Япония, Китай разрабатывают как камеры с кодирующими масками, так и комптоновские камеры [16-22]. В них используются как полупроводниковые, так и сцинтилляционные детекторы. Основное предполагаемое применение камер – это широко развертываемые в настоящее время во многих странах работы по выводу из эксплуатации АЭС.

В России представительства известных в области радиационных измерений фирм поставляют потребителям камеры разных типов [9,10,12]. НПП «Доза» и французская компания «Damavan Imaging» осуществили недавно совмест-

ную разработку портативной комптоновской камеры «ДЕЛЬТА-Т». Камера основана на сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторах с уникальной системой считывания сигнала с помощью цифровых SiPM – кремниевых фотоумножителей. Начались поставки этой оригинальной камеры на АЭС России [24].

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Управления «Реабилитация» НИЦ «Курчатовский институт» за помощь при проведении измерений. Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ от 14.08.2019 N 1808).

Литература

1. O. Ivanov, V. Stepanov, V. Volkov et. al. New Portable Gamma-Camera for Nuclear Environment and Its Application at Rehabilitation Works. Book of abstract NSS-MIC Conference, Rome, Italy, October, 16–23, 2004. P. 89.
2. O. Ivanov, V. Stepanov, V. Volkov et al. Application of portable gamma camera for the control on extraction of the radioactive wastes from temporal storage in territory of RRC Kurchatov Institute, ICEM05/DECOM05, Glasgow, UK, 2005. P. 78. Conference Record on CD: paper ICEM09-1197.
3. A. Stepanov, O. Ivanov, V. Stepanov, V. Potapo, «Simulation of Safe Methods for Performing Decontamination Work», *Atomic Energy*, vol. 90, no. 6, pp. 495-499, 2001.
4. Иванов О.П. Программное обеспечение гамма-камер для картирования радиоактивного загрязнения // Атомная энергия. 2010. N 3, Т. 108, С. 164-172.
5. В. Artem'ev, O. Ivanov, V. Stepanov, A. Danilovich. Gamma-imaging systems for ecological and nuclear environment measurements. 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю. ЕКНК, М., 2010. URL: https://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/3_08.pdf (дата обращения 17.02.2022).
6. Федоров Г.А., Дмитриев А.М., Терещенко С.А., Антаков М.А. Реконструкция изображений пространственных распределений источников ионизирующего излучения на основе итеративного обратного проецирования в интегрально-кодовых системах измерений // АНРИ. 2012. N 1(68), 2012. С. 62-70.
7. O. Gal, F. Jean, F. Laine, et al. The CARTOGAM portable gamma imaging system. IEEE Trans. Nuc. Sci. Vol. 47, no. 3, June 2000. P. 952-956.
8. O. Ivanov, I. Semin, V. Potapov, et al. Ultra-Light Gamma-Camera for Security and Emergency Situation. Proceedings of WM2014 conference. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7465584> (дата обращения: 17.02.2022).
9. Иванов О.П., Семин И.А., Сафронов А.М., Торицын О.С. Испытания системы визуализации полей гамма-излучения iPIX в НИЦ «Курчатовский институт» // АНРИ. 2017. N 2(89). С. 66-70.
10. Ю.Н. Мартынюк и И.Б. Вишневский. Промышленный прототип портативной гамма-камеры для применения на объектах атомной энергетики // АНРИ. 2016. N 4(87). С. 13-23.
11. Christopher G. Wahl, Willy Kaye, Weiyi Wang et al. Polaris-H measurements and performance. Published in: Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Seattle, WA, United States, 2014.
12. Сайт фирмы H3D. URL: <https://h3dgamma.com/polarishquadspecs.pdf>; сайт ООО «ГаммаТех». URL: <https://h3dgamma.com/H400Specs.pdf>? (дата обращения: 17.02.2022).
13. Иванов О.П., Потапов В.Н., Сафронов А.М. Исследование возможностей портативной комптоновской гамма-камеры «Поларис» при выводе из эксплуатации и реабилитации объектов атомной промышленности // АНРИ. 2018. N 2(89). С. 24-36.

14. O. Ivanov, V. Potapov, I. Semin. The Method to Improve the Angular Resolution of the Portable Gamma Camera with Pinhole Collimator (paper no. 08-4). Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Strasbourg, France, 2016.
15. O. Ivanov, V. Potapov, V. Stepanov, Y. Martynyuk. The Image Processing for Improvement of Angular Resolution and Sensitivity of the Portable Gamma Camera with Medipix Detector (paper no. 08-5). Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Strasbourg, France, 2016.
16. O. Ivanov, V. Potapov, A. Safronov, A. Stepanov. The Improving of the Angular Resolution of Gamma-Ray Images of Portable Compton Camera with Special Iterational Method. Published in: Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Manchester, UK, 2019.
17. H. Lemaire, R. Abou Khalil, K. Amgarou et al., «Implementation of an imaging spectrometer for localization and identification of radioactive sources», *Nucl. Instrum. Meth. A.*, vol. 763, pp. 97-103, 2014.
18. D. Matsuura, K. Genba, Y. Kuroda, H. Ikebuchi, T. Tomonaka. “ASTROCAM 7000HS” – Radioactive Substance Visualization Camera. Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev., vol. 51, no. 1, March 2014. P. 68-75. URL: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e511/e511068.pdf> (дата обращения: 17.02.2022).
19. S. Takeda, A. Harayama, Y. Ichinohe et al., «A Portable Si/CdTe Compton Camera and its Applications to the Visualization of Radioactive Substances», *Nucl. Inst. and Met. in Phys. Res. A*, vol. 787, pp. 207-211, 2015.
20. G. Carosi, M. Burks, L. Heffern, E. Hull. A Dual Planar Germanium Compton Imager. In Proceedings of SORMA West, Oakland, CA, United States, 2012.
21. D.S. Judson, A.J. Boston, P.J. «Coleman-Smith et al. Compton Imaging with the PorGamRays Spectrometer», *Nucl. Inst. and Met. in Phys. Res.*, A, vol. 652, no. 1, pp. 587-590, 2011.
22. L. Caballero et al. «Gamma-Ray Imaging System for Real-Time Measurements in Nuclear Waste Characterization», *Journal of Inst.*, vol. 13, P03016, 2018. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/13/03/P03016/pdf> (дата обращения: 17.02.2022).
23. Камера NanoPIXpix. URL: https://www.cea-tech.fr/cea-tech/english/Pages/ec_2018/nanopix-smallest-gamma-camera-information-communication-technologies.aspx (дата обращения: 17.02.2022).
24. Гамма-камера «ДЕЛЬТА-Т», НПП «Доза». URL: https://www.doza.ru/about_us/news/6799/ (дата обращения: 17.02.2022).

Experience in the Use of Portable Gamma Cameras (Gammavisors) in Decommissioning and Remediation of Nuclear Facilities

Ivanov Oleg, Kovalev Vladimir, Stepanov Alexey, Stepanov Vyacheslav, Stepanov Evgeniy
(NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia)

Abstract. The experience of using various portable gamma cameras during decommissioning and remediation of nuclear facilities at the NRC Kurchatov Institute is summarized. Typical examples of the use of cameras are given, directions for improving their functionality are proposed, prospects for the method of obtaining gamma images and possible new applications of portable gamma cameras are considered.

Key words: *gamma images, portable gamma cameras, remote dosimetry, radioactive contamination.*

О.П.Иванов (д.ф.-м.н., нач.отд.), В.М.Ковалев (инж.), А.В.Степанов (к.ф.-м.н., с.н.с.), В.Е.Степанов (к.ф.-м.н., зам.нач.отд.), Е.А.Степанов (инж.) – НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Контакты: тел. +7 (499) 196-95-42; e-mail: Ivanov_OP@nrcki.ru.