

# Применение инфракрасных изображений для обнаружения и визуализации источников радиоактивного излучения

Рассмотрено применение тепловых изображений для визуализации небольших по размеру, замаскированных источников радиоактивного излучения по вызываемому ими нагреву объектов в результате выделения тепла при радиоактивном распаде. Про моделировано получение ИК-изображений на тепловом имитаторе радиоактивного источника. Проанализированы известные применения тепловизоров для дистанционной визуализации радиоактивных источников. Представлены ИК-изображения фрагментов облученных ТВЭЛ.

**В.Е.Степанов, О.П.Иванов,  
С.В.Смирнов, А.Г.Волкович**

(НИИ «Курчатовский институт» г. Москва)

Во многих областях деятельности человека используется большое количество источников радиоактивного излучения. Правильная эксплуатация и хранение источников, соблюдение правил и мер безопасности сводит к минимуму воздействие радиации на людей и окружающую среду. Однако потеря профессионального контроля над ними (различные нештатные аварийные ситуации, утери при перевозках, хищения) может привести к самым тяжелым последствиям [1]. Таким образом, задача эффективного поиска источника и его идентификация является чрезвычайно актуальной. В настоящее время в России и за рубежом интенсивно разрабатываются различные технологии и приборы для поиска и визуализации источников ионизирующего излучения, необходимые в случае возникновения аварийных и кризисных ситуаций радиационного типа [2-9].

Существует представление о том, что только фотонное излучение дает возможность дистанционного обнаружения и определения распределения активности. Известны возможности применения регистрации УФ-излучения

## **Ключевые слова:**

*тепловизор, источники радиоактивного излучения, ИК-изображения.*

для регистрации альфа-источников. Эти подходы широко обсуждаются и применяются [10,11]. Естественно рассмотреть возможность визуализации радиоактивных объектов за счет выделяемого в них тепла при высокой активности содержащихся в них бета- или альфа-излучающих нуклидов с помощью современных систем получения ИК-изображений.

Визуализация источников с помощью ИК-изображений важна при поиске и контроле малых по размеру источников. Это, например, обнаружение при аварии небольшого высокоактивного источника (размер 1×5 см) на полу разрушенного здания [1]. Для решения задачи с расстояния 10 м надо иметь угловое разрешение примерно 1/20 град, а получаемое гамма-изображение в лучшем случае даст позиционирование 1–2 град и определение положения с точностью порядка 10 см, что недостаточно для указания на источник. Для поиска источника при таких условиях требуется изображение с оптическим разрешением лучше чем 0,1 градуса, которое может быть получено в ИК диапазоне.

В [12] представлены ИК-изображения транспортных упаковочных контейнеров (ТУК) с ОЯТ на разных транспортных средствах. Хотя получение тепловых изображений для таких источников не представляет проблемы, применение данного метода в этом случае не имеет практического значения для поиска источников и контроля, так как заранее известно, что в ТУКе суммарно находится много ТВЭлов, а по правилам транспортирования ТУКов они могут иметь значительный перегрев относительно окружающей среды – до 50 °С.

Существуют и другие работы по применению тепловых изображений для поиска и регистрации радиоактивных источников. Так, недавно проводились исследования [13] по обеспечению при манипуляциях с радиоактивными источниками в брахитерапии с высокой мощностью дозы (ВМД). Был разработан ме-

тод контроля положения мощных источников Ir-192 активностью до 10 Кюри для медицинского применения в брахитерапии с помощью получения их ИК-изображений. Такой контроль помогает избегать опасных манипуляций с незачехленным источником [14].

Следует отметить, что обнаружение малых радиоактивных объектов по их ИК-изображениям имеет специфические трудности. Среди них – малые перепады температуры, дополнительное охлаждение за счет контактов с массивными элементами, конвекция, отражение других «теплых» предметов, разные коэффициенты излучения у поверхностей разного цвета (например, зеленый цвет имеет наибольший коэффициент излучения для тепловизоров *FLIR*).

#### Получение ИК-изображений теплового имитатора радиоактивного источника

Представленные ниже данные измерений получены в ВТО «Изотоп» камерой *ThermaCAM E25* при подготовке к ликвидации аварии с источниками ионизирующих излучений (ИИИ) [1] и в НИЦ «Курчатовский институт» камерой *ThermaCAM Flir E300* во время работ по разборке реактора МР. Основные характеристики приборов приведены в табл.1.

Прежде всего, проведем оценку тепловыделения типового источника. В качестве такового нами был выбран радиоактивный источник Со-60 ГИК-7 активностью  $4,8 \cdot 10^{13}$  Бк (такие источники применяются, например, в различных облучательных установках [15]). Длина источника составляет примерно 8 см, диаметр около 1 см. Мощность тепловыделения в таком источнике за счет самопоглощения  $\beta$ -излучения составит  $M = A \cdot E \cdot \kappa$ , где  $A$  – активность источника,  $E$  – средняя энергия  $\beta$ -излучения (примерно 150 кэВ),  $\kappa$  – коэффициент перевода электронвольт в Дж ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж/эВ). Таким образом, тепловыделение в этом источнике составит около 1 Вт.

Табл.1.

	ThermaCAM Flir E300	ThermaCAM E25
Тип детектора	Неохлаждаемый микроболометр, 320×240 пикселей	Неохлаждаемый микроболометр, 160×120 пикселей
Дисплей	2,5-дюймовый цветной ЖКД, 16К цветов	2,5-дюймовый цветной ЖКД, 16К цветов
Фокус	Ручной	Ручной
Спектральный диапазон	7,5...13 мкм	7,5...13 мкм
Поле зрения	23°×17°/0,3 м (стандартный объектив)	19°×14°/0,3 м (с объективом 17 мм)
Точность измерения	±2°С или ±2% (большее из них)	±2°С или ±2% (большее из них)
Температурная чувствительность	0,10°С при 30°С	0,20°С при 30°С

За счет такого тепловыделения температура источника повысится на несколько градусов. При таком перепаде температур между источником и окружающей средой можно визуализировать его с помощью тепловизора.

Поскольку эксперименты с такими мощными источниками могут привести к серьезному облучению, для получения ИК-изображений было решено изготовить нерадиоактивный имитатор источника, имеющий такое же тепловыделение. Имитатор источника представляет собой металлический цилиндр длиной 10 см и диаметром 10 мм. Внутри цилиндра помещен нагреватель тепловой мощностью до 1 Вт. Питание нагревателя осуществляется от стандартного сетевого блока питания напряжением 6 В. На рис.1 представлена фотография изготовленного теплового имитатора источника, расположенного на открытой местности во время экспериментов по его визуализации с помощью тепловизора.



Рис.1. Фотография теплового имитатора источника.

Для получения тепловых изображений использовался тепловизор *ThermaCAM E25*. Моделировались следующие случаи расположения теплового имитатора источника:

- тепловой имитатор на открытом месте и хорошо виден;
- тепловой имитатор прикрыт тонким слоем листьев и не видим для глаз;
- источник находится в земле на глубине 3 см.

Во время проведения экспериментов с помощью контактного электронного термометра измерялась температура источника, также измерялась температура окружающей среды. Показания термометра сравнивались с показаниями тепловизора. На рис.1 виден термометр, прикрепленный к имитатору источника.

На рис.2 приведено одно из полученных ИК-изображений имитатора источника.

Справа на изображении показана температурная шкала. Значение температуры – в центре теплового изображения (место отмечено крестиком) – указано в правом верхнем углу. Видно, что распределение тепловыделения в имитаторе неравномерно. Наиболее нагреваются концы имитатора из-за того, что там расположены электрические контакты. Размеры наиболее нагретых концов имитатора соответствуют размерам контактов, что говорит о хорошем пространственном разрешении прибора.

В следующем эксперименте изучались ИК-изображения имитатора источника, при-

крытого слоем листвы. Визуализация источника проводилась с различных расстояний. На рис.3 приведена фотография имитатора источника, находящегося под листвой.

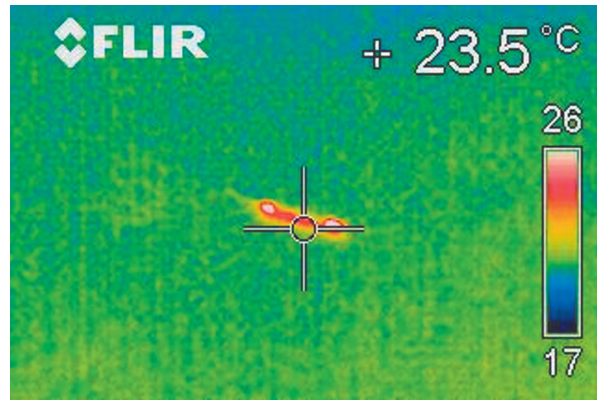
На рис.4 и 5 приведены ИК-изображения имитатора источника, сделанные с расстояния 6 м и 12 м соответственно.

Видно, что при удалении от имитатора качество изображения заметно ухудшается. Это связано с тем, что в поле зрения прибора появляются объекты, имеющие большую температуру, чем температура земли, на которой лежит имитатор, и соответственно падает контраст изображения. Следовательно, для визуализации тепловыделяющих элементов, имеющих маленький контраст температур по сравнению с окружающими предметами, необходимо использовать длиннофокусные объективы, позволяющие сузить поле наблюдения.

В следующем эксперименте с помощью имитатора изучалось получение ИК-изображения источника, помещенного в землю на глубину 3 см. На рис.6 приведена фотография области, где расположен имитатор. Белый провод на земле – кабель питания нагревательного элемента имитатора.

Тепловая визуализация имитатора источника проводилась сразу после помещения источника в землю (рис.7) и через полчаса после его нахождения в земле (рис.8).

На первом изображении видно, что размеры изображения имитатора практически соответс-

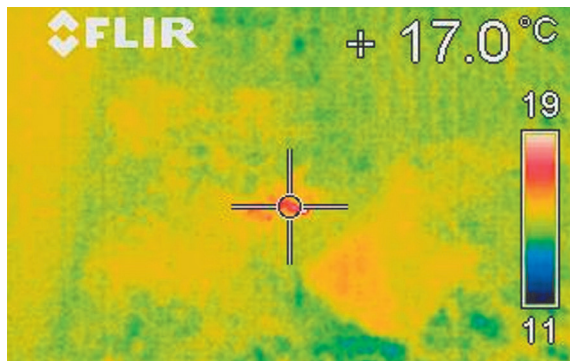


**Рис.2.** ИК-изображение имитатора радиоактивного источника.

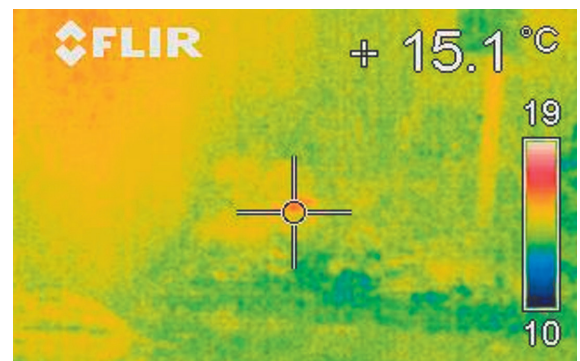


**Рис.3.** Фотография имитатора источника, находящегося под листвой.

туют его геометрическим размерам. За длительное время нахождения имитатора в почве земля вокруг него прогревается и наступает тепловое равновесие. Тепловое изображение имитатора размывается, земля вокруг имитатора нагревается, и его присутствие становится более явным. На тепловых изображениях



**Рис.4.** ИК-изображение имитатора источника, сделанное с расстояния 6 м.



**Рис.5.** ИК-изображение имитатора источника, сделанное с расстояния 12 м.

в правом нижнем углу также виден моток кабеля питания, нагретшегося за счет прохождения через него электрического тока, хотя температура его намного ниже температуры имитатора.

Программное обеспечение, поставляемое в комплекте с тепловизорами, позволяет проводить обработку ИК-изображений. В программу входят следующие процедуры обработки изображений: масштабирование изображений, определение температуры в любой точке по полю изображения, изменение палитры для более удобной идентификации объекта, изменение контраста и яркости изображения, изменение значений диапазона температур и т. д.

На рис.9 приведено ИК-изображение теплового имитатора источника, взятое с рис.2 и обработанное с помощью описанной программы.

На рис.10 показано обработанное ИК-изображение имитатора источника, сделанное сразу после помещения имитатора в землю. На изображении имитатора источника на рис.10 стал более четко виден как сам имитатор, так и моток проводов питания.

Инфракрасное излучение хорошо отражается от гладких поверхностей. Это свойство можно использовать для визуализации источника, не находящегося в прямой видимости. На рис.11 представлено отраженное от полированной металлической пластины ИК-изображение имитатора радиоактивного источника.

Таким образом, можно получать ИК-изображение высокоактивного радиоактивного источника, скрытого от наблюдателя, что позволяет избежать облучения персонала.

### Визуализация источника излучений в контейнере

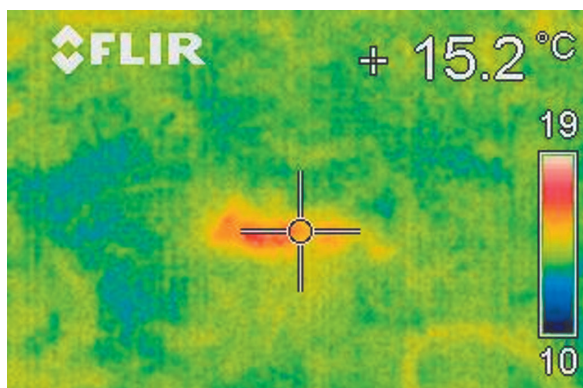
Тепловизор использовался для получения изображений источников излучений, помещенных в контейнер. Источник излучения ГИК-8 (Co-60 активностью  $3,7 \cdot 10^{12}$  Бк) находился в металлическом барабане внутри свинцового

контейнера с толщиной стенки 200 мм.

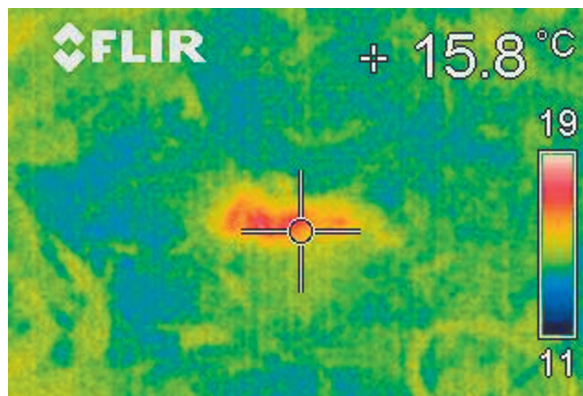
На рис.12 и 13 показаны тепловые изображения контейнера с приподнятым из него барабаном. Изображения получены с разных позиций относительно контейнера. Примерно в одном месте на барабане видна область с повышенной температурой – на нее указывает красная стрелка.



**Рис.6.** Место расположения имитатора источника.



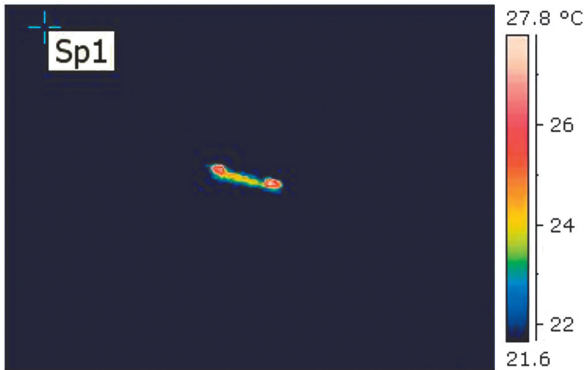
**Рис.7.** ИК-изображение имитатора источника, сделанное сразу после помещения источника в землю.



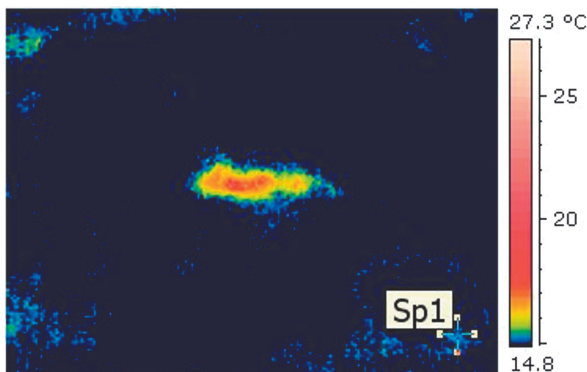
**Рис.8.** ИК-изображение имитатора источника, сделанное через 30 минут после его нахождения в земле.

На рис.12 повышение температуры в месте расположения источника незначительное.

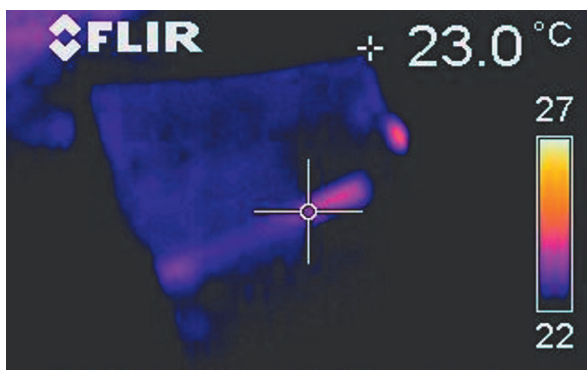
На рис.13 источник хорошо виден над горловиной контейнера, хотя он находится в металлическом барабане. Толщина стенок барабана составляет 5–10 мм. Таким образом, по-



**Рис.9.** Обработанное ИК-изображение теплового имитатора источника.



**Рис.10.** Обработанное ИК-изображение имитатора источника, находящегося под слоем земли.



**Рис.11.** Отраженное от полированной металлической пластины ИК-изображение имитатора радиоактивного источника.

казана возможность визуализации источников в различных упаковках.

### Визуализация фрагментов ТВЭЛов

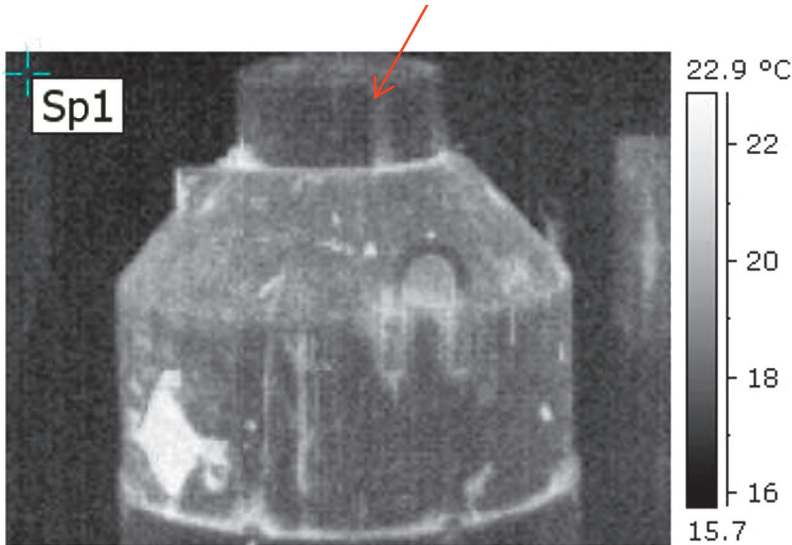
Обследование хранилища высокоактивных РАО включало проведение измерений спектров гамма-излучения над ячейками, видео-обследование ячеек с помощью видеокамеры, закрепленной на штанге, получение ИК-изображений с помощью тепловизора. Во время обследования на дне одной из ячеек обнаружены два стержня, похожие на фрагменты ТВЭЛов. Анализ спектра гамма-излучения показал, что основным дозообразующим элементом является Cs-137. На рис.14 показан кадр видеоизображения дна ячейки хранилища, на котором видны стержни.

Если эти стержни – фрагменты ТВЭЛов, то они должны нагреваться за счет самопоглощения излучения. Над ячейкой был установлен тепловизор (рис.15).

На рис.16 представлено ИК-изображение двух фрагментов ТВЭЛов, находящихся на дне одной из ячеек.

Перепад температуры между стенками ячейки и поверхностью объектов составляет примерно 1–2 °C. Этот перепад и изображение надежно фиксируются в течение нескольких минут после открытия крышки ячейки, а потом исчезают, вероятно, из-за возникновения конвекции, эффективно снимающей тепло, выделяемое радиоактивными элементами в ТВЭЛ.

Оценим возможный перепад температуры между поверхностью ячейки камеры и поверхностью ТВЭЛ в модели теплопроводности по воздуху для цилиндрической геометрии. Основной канал тепловыделения для топлива с выдержкой 30–50 лет – это бета-распад Sr-Y. В цилиндрически симметричной модели перепад температуры  $\Delta T$  между стенкой ячейки и поверхностью объекта можно оценить по формуле:

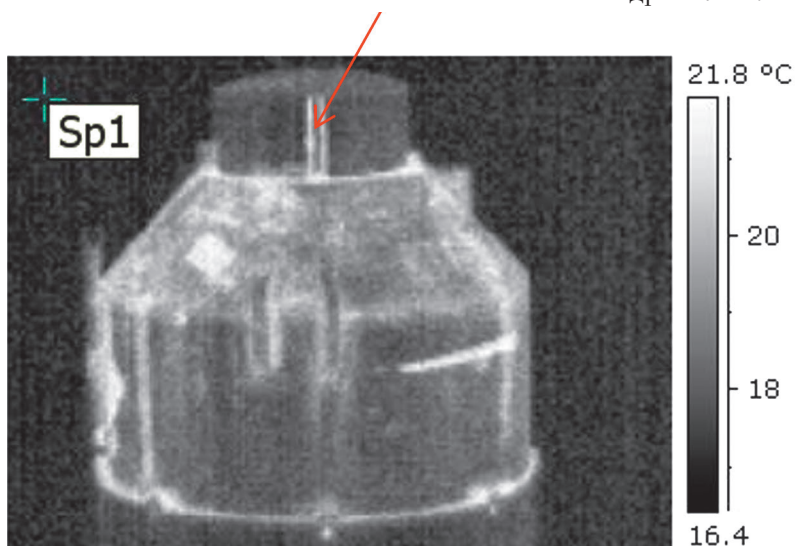


**Рис.12.** ИК-изображение контейнера с находящимся в нем источником.

$$\Delta T = \ln(R/r) \cdot W / (2\pi \cdot \lambda \cdot L), \quad (1)$$

где  $W$  – мощность тепловыделения в объекте,  $L$  – длина объекта,  $\lambda = 0,026$  Вт/(м·град) – теплопроводность воздуха. Радиус объекта примем равным  $r = 0,5$  см, радиус ячейки  $R = 10$  см.

Согласно имеющимся данным [16], при глубине выгорания ядерного топлива 2 ГВт·сут/т U (примерно 0,001 от общего числа атомов U в объекте) после выдержки облученного топлива 40 лет тепловыделение составляет примерно 30 Вт/т U. Предположив, что выгорание (топливо исследовательских реакторов)



**Рис.13.** ИК-изображение контейнера с выдвинутым вверх барабаном с источниками.

равно 0,03 для ТВЭЛа с  $UO_2$  и сечением  $5 \times 5$  мм, получаем тепловыделение  $W/L = 0,25$  Вт/м, что даст перегрев согласно (1) порядка 4 град. Эта величина близка к измеренному перегреву 2 град, что подтверждает возможное наличие ОЯТ. Других источников с подобным тепловыделением не предполагается.

Изображение видно в течение ограниченного времени после открытия ячейки. Через некоторое время в ячейке возникает конвекция, которая

приводит к охлаждению ТВЭЛа, и прибор уже не чувствует превышение температуры на стержне.

Дальнейшие исследования подтвердили предположение, что эти стержни являются фрагментами ТВЭЛов.

### Обсуждение результатов

Современные телевизионные системы используются для визуализации тепловых потерь и утечек в электроэнергетике, строительстве и др. областях промышленности. При применении тепловизоров для обнаружения ИИИ необходимо

учитывать много параметров: температуру окружающей среды, влажность, условия проведения измерений и т. д. Используемый тепловизор имел не самые лучшие характеристики. Более современные (и соответственно более дорогие) приборы имеют лучшую минимально измеряемую разницу температур, лучшее пространственное разрешение, оснащаются сменными



**Рис.14.** Кадр видеоизображения дна ячейки хранилища.

объективами, что особенно важно для получения тепловых изображений с больших расстояний.

Выпускаемые телевизионные системы работают в телевизионном стандарте. Современные тепловизоры имеют видеовыход, через который можно передавать изображение на другое устройство. Для повышения чувствительности и качества изображения предлагается использовать тепловизор совместно с персональным компьютером, в который передаются изображения непосредственно в процессе визуализации. Применение компьютера позволит складывать изображения, вычитать фоновые изоб-



**Рис.16.** ИК-изображение двух фрагментов ТВЭЛов, находящихся на дне одной из ячеек.



**Рис.15.** Получение ИК-изображения содержимого ячейки.

ражения и применять другие процедуры обработки изображений в реальном времени, что позволит улучшить качество получаемых изображений. Конечно, такой подход к проблеме требует проведения дополнительных исследований и разработки специализированного программного обеспечения.

Следует отметить, что рассмотренные радиоактивные источники дают гамма-излучение, а их поиск велся по тепловому нагреву, вызываемому бета- и альфа-излучением. Сделанные ИК-изображения позволяют решать практически важные задачи. Стал возможным поиск маленьких по размеру источников на неоднородном фоне. При обследовании хранилища среди загрязненных гамма-излучающих объектов благодаря большому количеству бета- и альфа-излучателей по ИК-изображениям были обнаружены элементы облученных ТВЭЛ.

Задачи, где используются тепловые измерения для определения наличия только чистых бета- и альфа-излучателей в радиоактивных отходах, связаны с поиском следов плутония в больших упаковках. Для таких измерений применяются специальные высокочувствительные калориметры большого объема [17,18].



## Выводы

Очевидно, что применение только одного из способов для идентификации источников ионизирующего излучения не всегда эффективно. Совместное использование дистанционных систем для визуализации ИИИ – гамма-визоров [6], тепловизоров, спектрометрических коллимированных детекторов [7-9] и систем видеонаблюдения – позволяет более точно определить местоположение и характеристики источников излучения.

Системы видеонаблюдения обеспечивают возможность дистанционной локализации источников, наведения на них дистанционных захватов или робототехнических средств, захвата источников и перемещения их в контейнеры, позволяют оперативно принимать решения в зависимости от обстановки.

Благодарим Акакиева Б.В. за помощь в проведении измерений и полезные обсуждения.

## Литература

1. Акакиев Б.В., Агапов А.М., Волков В.Г., Волкович А.Г., Иванов О.П., Смирнов С.В., Степанов В.Е. Ликвидация последствий радиационной аварии на Грозненском химическом комбинате. Опыт поиска мощных радиоизотопных гамма-источников в сложных радиационных условиях. Международный ядерный форум, 25-29 сентября, 2006. С-Пб, Сборник докладов. С. 4-8.
2. O. Gal, M. Gmar, C. Le Goaller, O.P. Ivanov, V.E. Stepanov, V.N. Potapov and B. Dessus. Development of Coded-Aperture Imaging with Compact Gamma Camera. 2003 IEEE NSS/MIC Conf. Rec, Oct. 2003. Portland, Oregon, USA.
3. O.P. Ivanov, A.N. Sudarkin, V.E. Stepanov and L.I. Urutskoev, «Portable Instrument for Coded-Aperture Imaging of Gamma-ray Source», *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 41, no. 4, pp. 563-568, 1998.
4. Степанов В.Е., Волков В.Г., Волкович А.Г., Данилович А.С., Иванов О.П., Игнатов С.М., Потопов В.Н., Смирнов С.В. Применение автоматизированной системы гамма-локатор для контроля радиационной обстановки при аварийных работах и работах по реабилитации территории. Конференция «Ядерное приборостроение 2007: Аппаратурное обеспечение ядерной и радиационной безопасности объектов Росатома». 18-19 апреля 2007. ФГУП «Научно-инженерный центр «СНИИП», М., Сборник докладов. С. 103-106.
5. S. Herpworth, P. Griffiths et al. Remote Two Dimensional Gamma Imaging of Wide Area High Dose Environments Using the Radscan™: 800 4PI Gamma Imager. The 10th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. September 4-8, 2005, Glasgow, ICSEM05-1112.
6. 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. 20-35.
7. Степанов В.Е., Смирнов С.В., Иванов О.П., Данилович А.С. Дистанционно управляемый коллимированный детектор гамма-излучения для измерения радиоактивных загрязнений// Атомная энергия. 2010. Т. 109, вып. 2. С. 82-84.
8. Иванов О.П., Степанов В.Е., Смирнов С.В., Данилович А.С., Игнатов С.М., Дистанционно-управляемые приборные средства для проведения измерений в интенсивных полях гамма излучений// Ядерные измерительно-информационные технологии, № 2 (38) 2011 г., С. 48-50.
9. Степанов В.Е., Смирнов С.В., Лемус А.В., Иванов О.П., Данилович А.С., Павленко В.И. Применение коллимированной радиометрической системы, установленной на робот БРОКК для обследования хранилища СУЗ в помещении реактора МР РНЦ «Курчатовский институт»// Атомная энергия. 2010. № 4. Т. 109. С. 194.

10. O.P. Ivanov, V.E. Stepanov, S.V. Smirnov, A.G. Volkovich. Development of method for detection of alpha contamination with using uv-camera «DayCor» by OFIL. In: Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). IEEE: Valencia, 2011, pp. 2192-2194.
11. A.J. Crompton, K.A.A. Gamage, A. Jenkins, C.J. Taylor, Alpha particle detection using alpha-induced air radioluminescence: A review and future prospects for preliminary radiological characterisation for nuclear facilities decommissioning. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29597340/> (дата обращения: 10.10.2022).
12. URL: <https://www.alamy.com/a-picture-taken-with-an-thermal-imaging-camera-shows-castor-containers-at-a-station-in-dannenbergsouth-of-hamburg-november-28-2011-castor-cask-for-storage-and-transport-of-radioactive-material-containers-carrying-spent-german-nuclear-fuel-from-the-french-reprocessing-plant-in-la-hague-will-be-loaded-on-to-trucks-in-dannenbergbefore-its-transportation-to-a-nearby-storage-facility-in-the-northern-germany-village-of-gorleben-reuterswolfgang-rattay-germany-tags-environment-transport-energy-image377872535.html> (дата обращения: 13.10.2022).
13. X. Zhu, Y. Lei, D. Zheng, S. Li et al, «A Feasibility Study of Applying Thermal Imaging to Assist Quality Assurance of High-Dose Rate Brachytherapy», *Cancer Transl Med*, no. 3(5), pp. 159-166, 2017, doi: 10.4103/ctm.ctm\_25\_17.
14. Kumagai Shinobu, Arai Norikazu, Takata Takeshi et al. «First experience of <sup>192</sup>Ir source stuck event during high-dose-rate brachytherapy», *Japan Journal of Contemporary Brachytherapy*, vol. 12, no. 1, pp. 54-60, 2020.
15. URL: <http://www.isotop.ru/files/treecontent/nodes/attaches/0/95/noname..pdf> (дата обращения: 12.10.2022).
16. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-11032020-n-106-ob/rb-093-20/prilozhenie-n-1/tablitza-n-18/> (дата обращения: 12.10.2022).
17. D.S. Bracken and C.R. Rudy, *Principles and applications of calorimetric assay* in book *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials*, Addendum LA-UR-07-5226, ch. 10, pp. 1-46, 2007.
18. W.R. Kubinski, C. Carasco, D. Kikola, et al, «Calorimetric Non-Destructive Assay of Large Volume and Heterogeneous Radioactive Waste Drums», *ANIMMA-2019*, 06-1201.

## Application of Infrared Imaging to Detect and Visualize Sources of Radioactive Radiation

Stepanov Vyacheslav, Ivanov Oleg, Smirnov Sergey, Volkovich Anatoly  
(NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia)

**Abstract.** The application of thermal images for visualization of small-sized, masked sources of radioactive radiation by the heating of objects caused by them as a result of heat release during radioactive decay is considered. The acquisition of IR images of a thermal imitator of a radioactive source is simulated. Known applications of thermal imagers for remote visualization of radioactive sources are analyzed. IR images of fragments of irradiated fuel elements are presented.

**Key words:** *thermal imager, sources of radioactive radiation, infrared images.*

В.Е. Степанов (к.ф.-м.н., зам.нач.отд.), О.П. Иванов (д.ф.-м.н., нач.отд.),  
С.В. Смирнов (к.ф.-м.н., в.н.с.), А.Г. Волкович (к.ф.-м.н., нач.лаб.) – НИЦ «Курчатовский институт» г. Москва.

Контакты: e-mail: [olegivanov@mail.ru](mailto:olegivanov@mail.ru); тел.: +7 (499) 196-95-42.