



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Применение портативных гамма-камер для повышения точности характеристики РАО в больших контейнерах

Степалин И.А., Иванов О.П., Потапов В.Н.

Москва 2023

Введение



В настоящее время определение активности различных нуклидов в упаковках РАО больших объемов (контейнерах) делается на основе спектрометрических измерений коллимированными системами и последующего расчета активностей в предположении о ее однородном распределении в контейнере. Однако неоднородность распределения активности может приводить к ошибкам определения искомых величин.

Сейчас имеются различные портативные системы получения гамма-изображений источников излучения (гамма-камеры и гамма-сканеры). Использование таких систем вместе с методом однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОЭКТ) дает возможность получить достаточно точную информацию о распределении нуклидов внутри контейнера, а значит обеспечить более точную характеристику РАО.

В работе представлены предварительные данные, необходимые для повышения точности характеристики контейнеров с РАО.

Метод однофотонной эмиссионной компьютерной томографии

Суть метода заключается в определении объемного распределения активности внутри образца. Для этого использовались данные, полученные с помощью портативного гамма-сканера.

Формально показания гамма-сканера описываются интегральным уравнением:

$$n(\vec{\Omega}_{ij}) = \int_{V_s} K(\vec{\Omega}_{ij}, \vec{\Omega}(\vec{R}_s)) A_s(\vec{R}_s) d\vec{R}_s \quad (1)$$

$$K(\vec{\Omega}_{ij}, \vec{\Omega}(\vec{R}_s)) = f_a(\vec{\Omega}_{ij}, \vec{\Omega}(\vec{R}_s)) \frac{e^{-\tau(\vec{r}_d, \vec{R}_s, E_0) \Delta S \varepsilon}}{4\pi |\vec{R}_s - \vec{r}_d|^2},$$

где ΔS – эффективная площадь сечения детектора, f_a – аппаратная функция детектора, ε – эффективность фотопоглощения кванта.

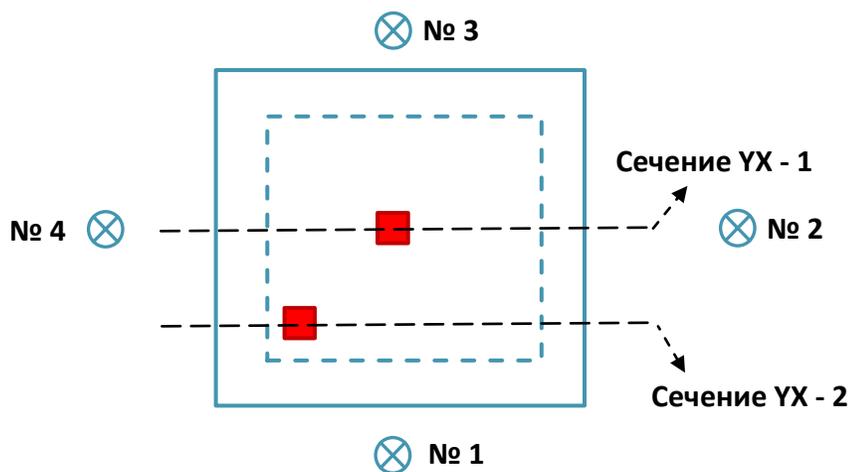
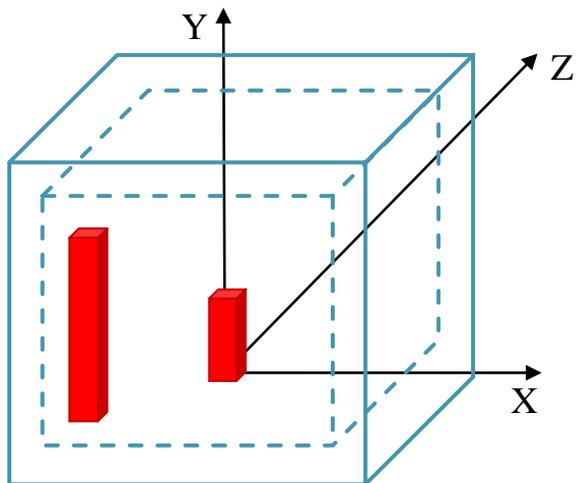
Уравнение (1) можно свести к системе алгебраических уравнений вида:

$$n_{ij} = \sum_{i,j=1}^{M_{scan}} \sum_{k,l,m=1}^{N_{vxl}} K_{ij,klm} a_{klm},$$

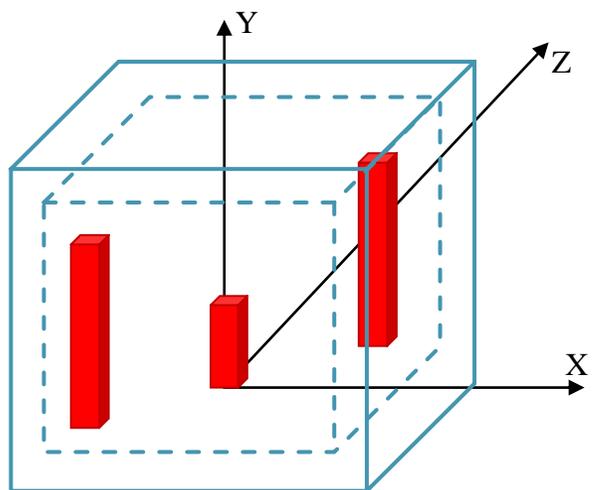
которая решается методом максимального правдоподобия (Тараско).

Визуализация полученных данных.

Численный эксперимент



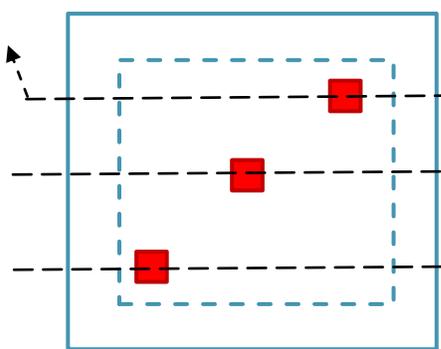
Номер позиции	Сечение YX - 1	Сечение YX - 2
№ 1, 2 $5 * 10^4$ ит.		
№ 1, 2, 3 $5 * 10^4$ ит.		
№ 1, 2, 3, 4 $5 * 10^4$ ит.		



⊗ № 3

Сечение YX - 1

№ 4 ⊗



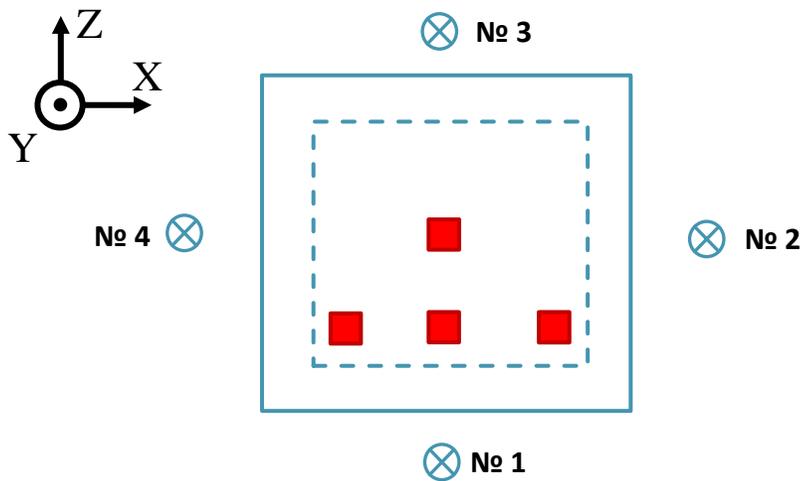
Сечение YX - 2

⊗ № 2

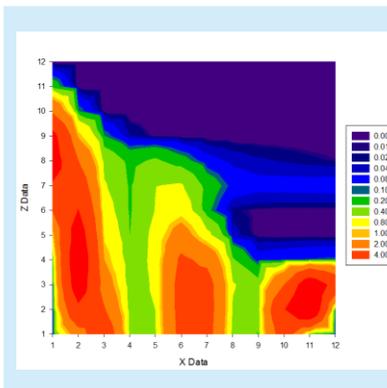
Сечение YX - 3

⊗ № 1

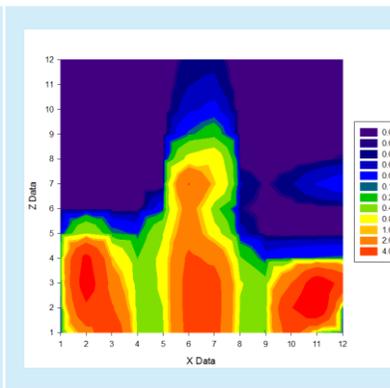
Номер позиции	Сечение YX - 1	Сечение YX - 2	Сечение YX - 3
№ 1, 2, 3 10^5 ит.			
№ 1, 2, 3, 4 10^5 ит.			



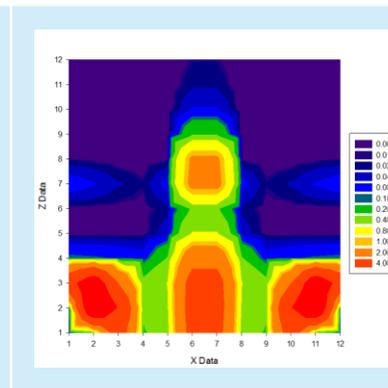
Сечение ZX
№ 1, 2
 $5 * 10^4$ ит.



Сечение ZX
№ 1, 2, 3
 $5 * 10^4$ ит.



Сечение ZX
№ 1, 2, 3, 4
 $5 * 10^4$ ит.



Численный эксперимент показал возможность восстановления распределения активности предложенным методом.

Реальный эксперимент



Контейнер НЗК, мм: 1630 x 1630 x 1360
Полезный объем, мм: 1350 x 1350 x 910

В контейнере находились высокоактивные РАО, часть из которых была упакована в металлическую бочку объемом 200 л (Ø600 x 900 мм). Сверху была насыпана низкоактивная бетонная крошка.



Получение картины распределения активности осуществлялось с помощью гамма-сканера.

Объем детектора CsI(Tl): 6 см³
Энергетическое разрешение: 12% 662 кэВ
Угловое разрешение: 6 град

Схема эксперимента и полученные результаты

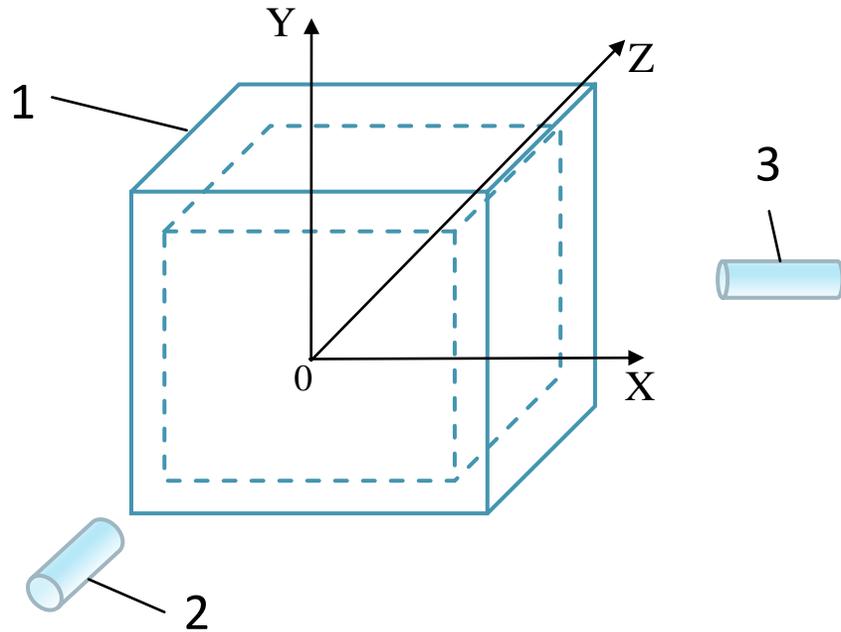
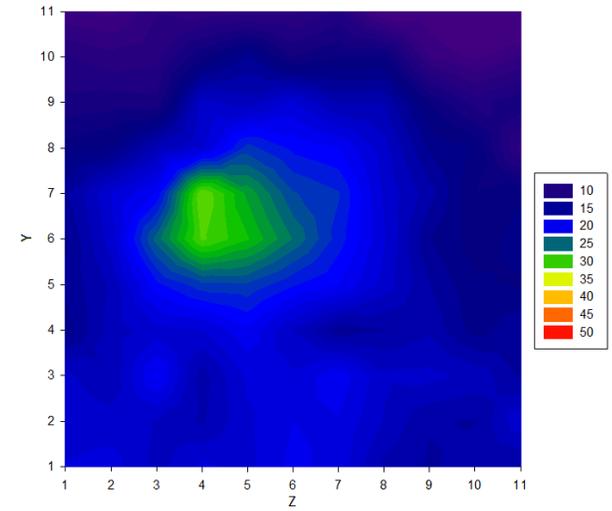
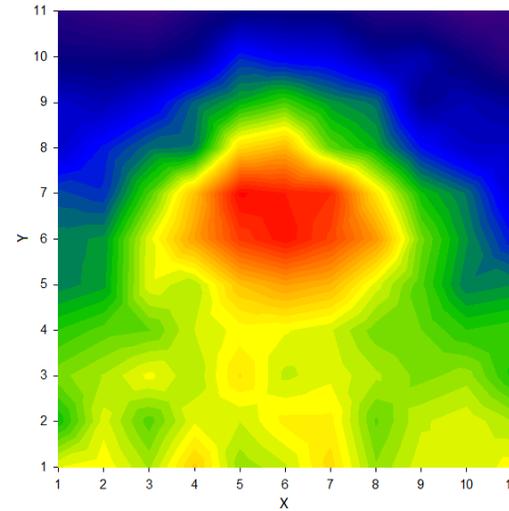


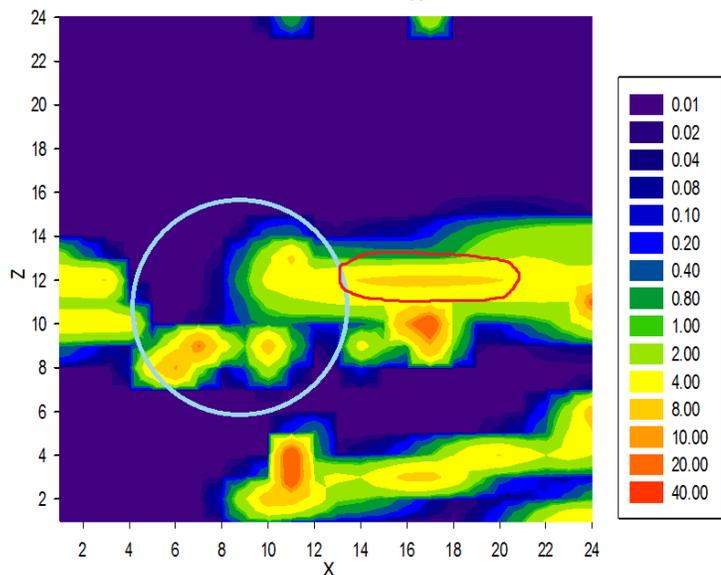
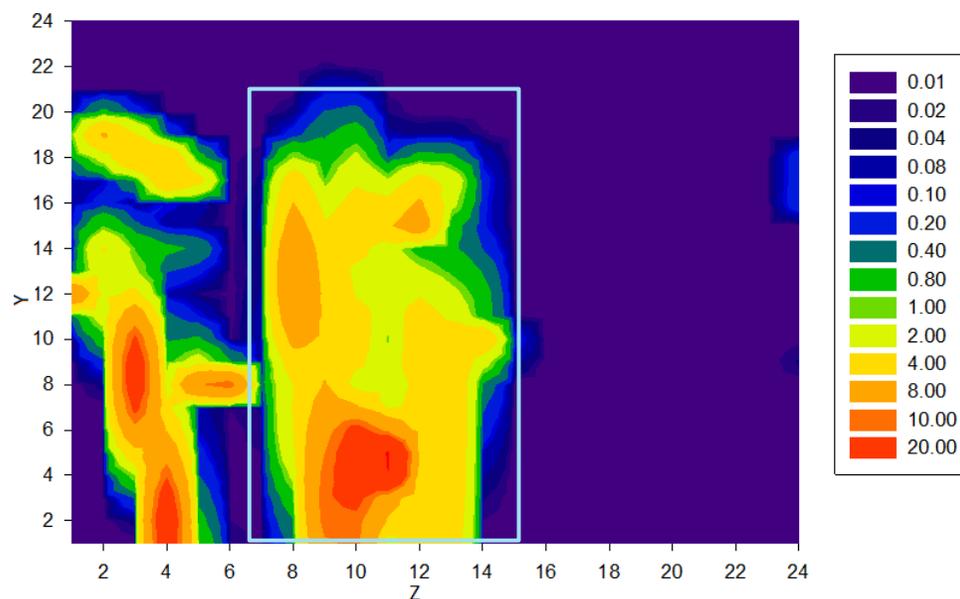
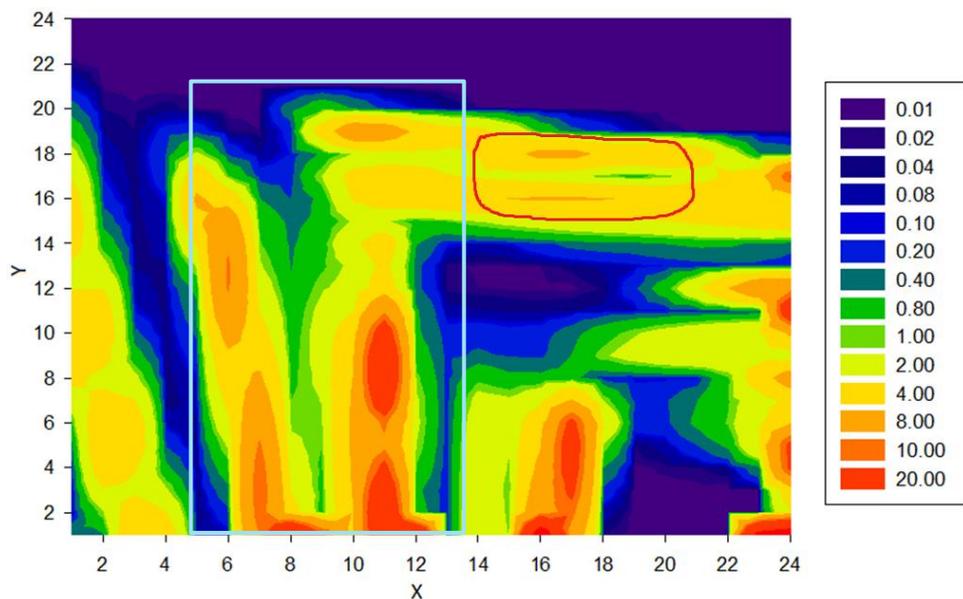
Схема проведения эксперимента. (1) - контейнер НЗК с РАО, (2), (3) - положения гамма-сканера.



Изображения источников излучения (Cs-137) в контейнере, полученные с двух взаимно перпендикулярных сторон.

Излучения (Cs-137) в контейнере, полученные с двух взаимно перпендикулярных сторон.

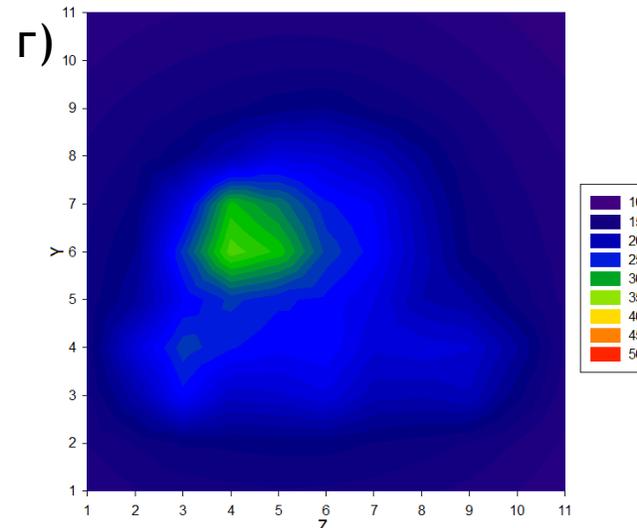
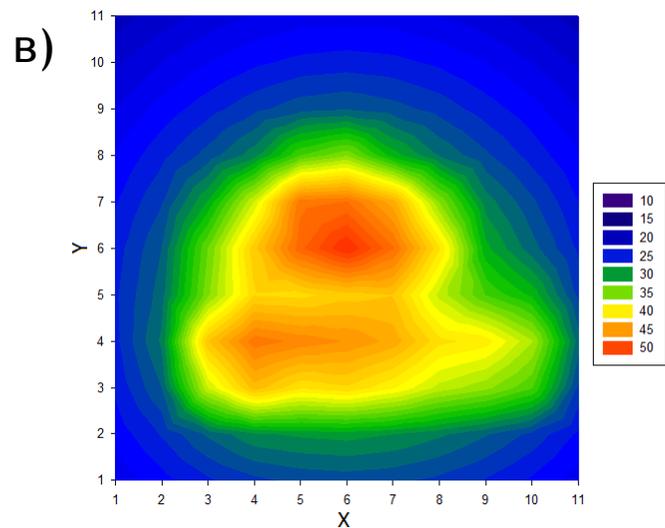
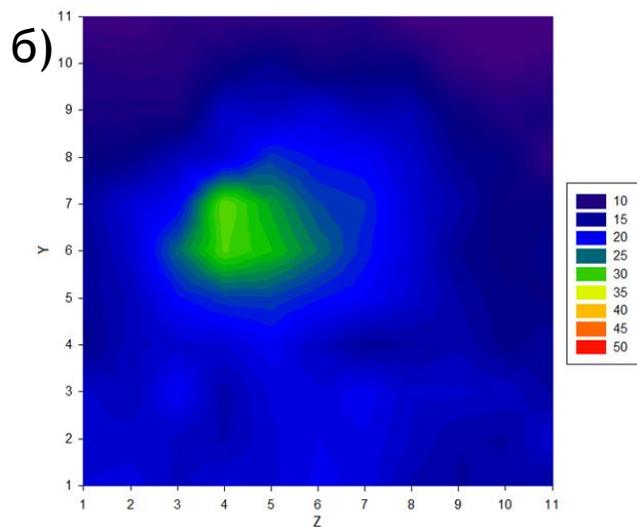
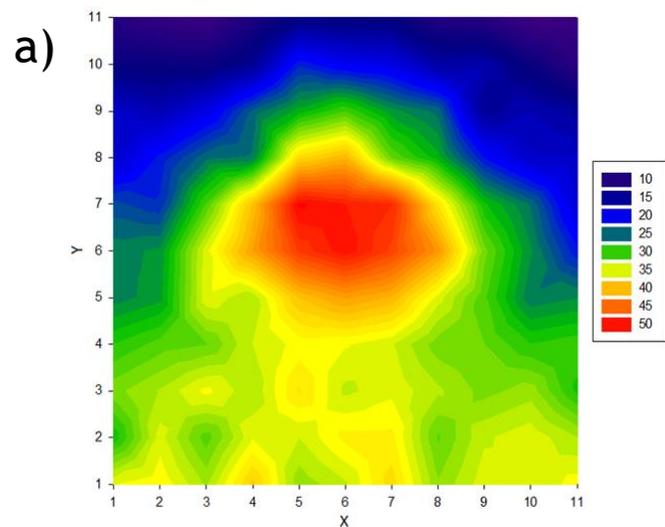
Визуализация воксельных данных



Воксельное изображение распределения активности, полученное в 3-х различных плоскостях.

Голубой линией выделен профиль металлической бочки, красной - область проявления артефактов.

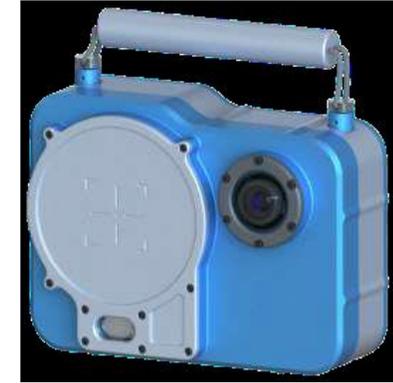
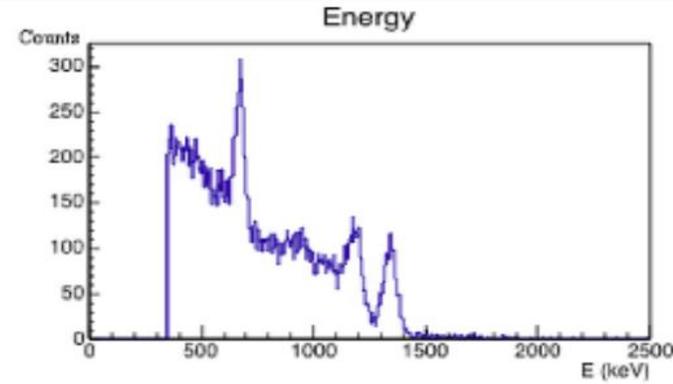
Оценка качества полученных данных



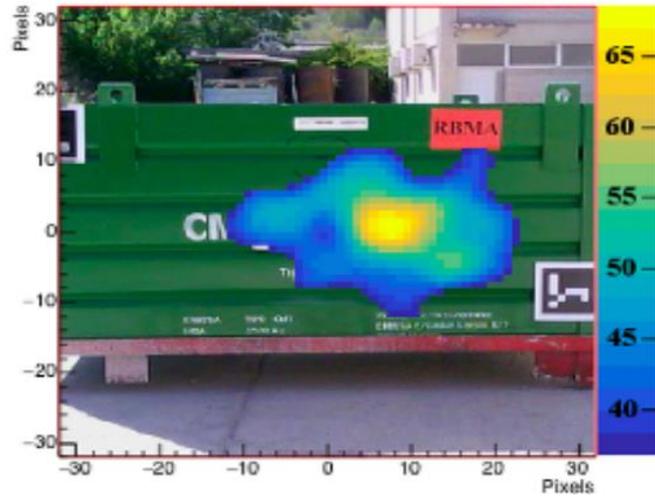
Оценка качества восстановления осуществлялась методом восстановления исходных данных по результатам расчета.

Результаты измерений сканером в двух взаимно перпендикулярных положениях (а, б), восстановленные показания (в, г) при тех же положениях сканера.

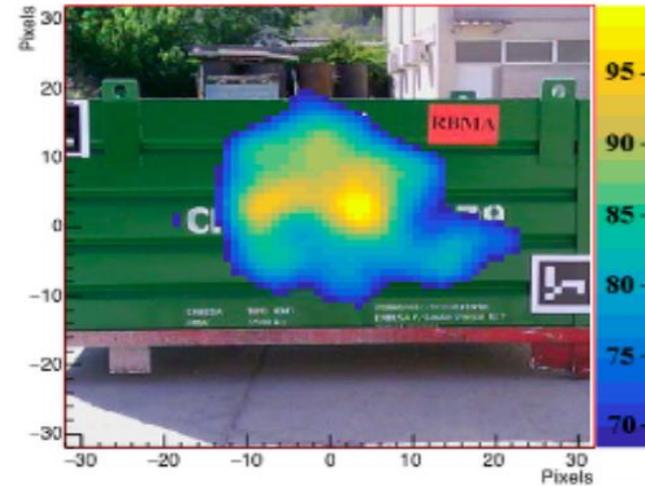
Применение гамма-камер для обследования контейнеров



¹³⁷Cs isotope distribution



⁶⁰Co isotope distribution



Применение гамма-камеры для обследования контейнера (L. Caballero et al. Gamma-ray imaging system for real-time measurements in nuclear waste characterisation. J of Instrumentation V. 13, March 2018).



Комптоновская гамма-камера Поларис и полученное изображение объекта, содержащего загрязнение Cs-137.

Заключение

- Показана возможность использования гамма-сканеров и гамма-камер для решения задачи определения объемного распределения активности в контейнере. Использование последних является более предпочтительным из-за меньшего времени, требующегося на измерения.
- Возникновения артефактов в основном происходило при 2-х позиционном сканировании. Увеличение количества ракурсов, повысило качество восстановления картины объемного распределения и позволило устранить артефакты.
- Центральная область контейнера является проблемной для всех рассмотренных случаев ввиду существенного ослабления излучения наполнением контейнера. Тем не менее, даже 2-х ракурсные измерения дают качественно правильную информацию о распределении активности в объеме контейнера.

Спасибо за внимание.