

# Приборы и методы получения визуального изображения источников гамма-излучения на объектах атомной энергетики. Часть II

В работе описан принцип получения гамма-изображения на основе комптоновского рассеяния.

## **Ключевые слова:**

*визуализация гамма-излучения, гамма-изображение, комптоновская камера.*

В предыдущей части данной статьи были рассмотрены два вида камер для получения гамма-изображений: камеры с пинхольным коллиматором и камеры с кодирующей апертурой. Камеры с пинхольным коллиматором относительно просты в проектировании и используют простые алгоритмы получения изображения, однако имеют крайне низкий угол обзора и большой вес из-за наличия коллиматора из тяжелого металла. Камеры с кодирующей апертурой не требуют тяжелой защиты, позволяют существенно увеличить эффективность регистрации прибора, но при этом требуют значительных вычислительных мощностей при реализации алгоритмов восстановления изображения. Главным недостатком данных камер является пропускание кодирующей маской гамма-квантов с высокой

**Ю.Л.Теверовский**

(НПП Доза, г. Москва, г. Зеленоград)

энергией, что приводит к ухудшению качества изображения. Увеличение толщины маски приводит к уменьшению угла обзора камеры. К тому же камеры с кодирующей апертурой требуют дорогих позиционно-чувствительных детекторов. В данной статье рассматривается метод комптоновской камеры, который лишен вышеперечисленных недостатков.

## **Комптоновская камера**

Впервые метод получения гамма-изображений на основе принципа комптоновской камеры был опробован в астрономии и медицине [1,2]. Данный метод также иногда называют электронной коллимацией. Его суть проиллюстрирована на рис.1. Первичный фотон вылетает из источника и попадает на детектор 1, в котором претерпевает комптоновское

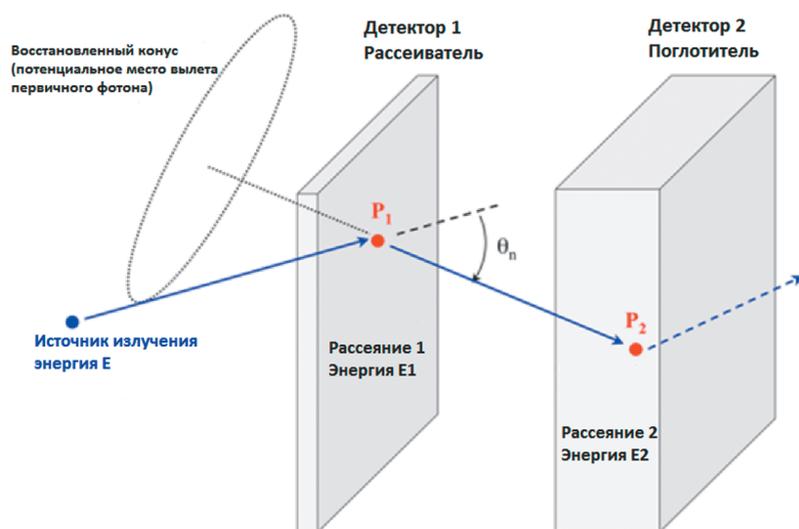


Рис.1. Принцип работы комптоновской камеры.

рассеяние (событие  $P_1$ ). Рассеянный на угол  $\theta_n$  фотон затем попадает на детектор 2, в котором либо поглощается, либо снова рассеивается (событие  $P_2$ ). Детекторы регистрируют координаты событий  $P_1$  и  $P_2$ , а также поглощенную энергию в каждом из событий. Из этой информации можно восстановить область наиболее вероятного вылета первичного фотона. Эта область будет боковой поверхностью конуса, осью которого будет прямая, проходящая через точки  $P_1$  и  $P_2$ , а вершина лежит в точке  $P_1$ . Половинный угол раствора конуса  $\theta_n$  определяется по формуле:

$$\cos \theta_n = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2}, \quad (2.1)$$

где  $E_1$  – энергия, оставленная фотоном в рассеивателе;  $E_2$  – энергия, оставленная фотоном в поглотителе.

Табл.1. Требования к детекторам в комптоновской гамма-камере.

Детектор-рассеиватель	Детектор-поглотитель
Высокая эффективность регистрации гамма-излучения	
Большая вероятность комптоновского рассеяния и малая вероятность фотоэффекта	Малая вероятность комптоновского рассеяния и большая вероятность фотоэффекта
Высокое пространственное разрешение	
Высокое энергетическое разрешение	
Малый вклад многократного рассеяния	

Область наибольшего количества пересечений боковых поверхностей конусов, восстанавливаемых для массива зарегистрированных событий, будет являться местом наиболее вероятного расположения источника. Такой метод восстановления изображения называется обратным проектированием. На рис.2 показано, как в зависимости от количества набранных данных восстанавливается изображение источника излучения.

Основная сложность в практической реализации комптоновской камеры заключается в том, что события  $P_1$  и  $P_2$  должны быть зарегистрированы в совпадении с очень жестким временным разрешением, так как фотон пролетает расстояние между детекторами за время порядка одной наносекунды. Это накладывает очень жесткие требования на качество электроники. Также детекторы должны обладать хорошим энергетическим разрешением для более точного расчета угла  $\theta_n$ . Требования, предъявляемые к детекторам комптоновской камеры, сведены в табл.1.

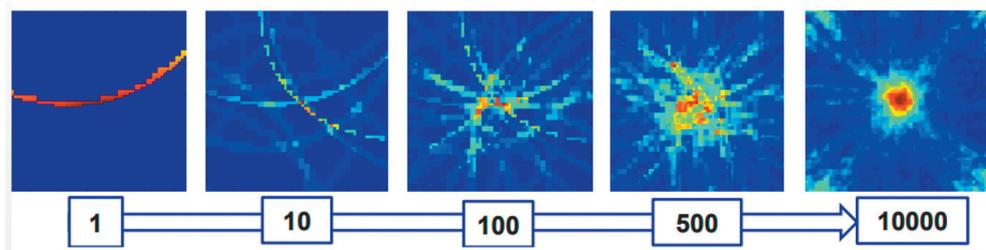
Пространственное разрешение комптоновской камеры зависит от точности восстановления конуса вероятных событий. Погрешность определения угла раствора конуса можно представить следующей формулой:

$$\Delta \theta_n = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2}, \quad (2.2)$$

$$\Delta_1 = \frac{\Delta E_1 \cdot mc^2}{(E - E_1)^2 \cdot \sin \theta_n}, \quad (2.3)$$

$$\Delta_2 \propto \sqrt{\Delta r_k^2 + \Delta r_{\phi\Delta}^2}, \quad (2.4)$$

где  $\Delta_1$  – погрешность, связанная с неопределенностью энергии  $E_1$ ;  $\Delta_2$  – погрешность, связанная с определением координаты событий в детекторах ( $\Delta r_k^2$  – в рассеивателе,  $\Delta r_{\phi\Delta}^2$  – в поглотителе);  $\Delta_3$  – погрешность, связанная



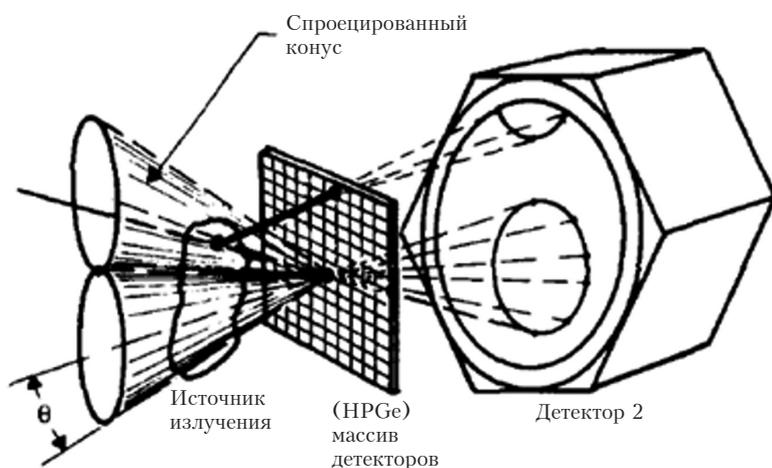
**Рис.2.** Определение наиболее вероятного месторасположения источника в зависимости от количества зарегистрированных событий. Область наибольшего количества пересечений эллипсов дает изображение источника излучения.

с доплеровским уширением, возникающим из-за ненулевого момента орбитальных электронов. Погрешность  $\Delta_3$  является величиной второго порядка, поэтому в данной статье не будет рассмотрена. Соответственно, чем лучше пространственное и энергетическое разрешение детекторов, тем точнее будет определен угол  $\theta_n$  и, соответственно, выше будет угловое разрешение самой камеры.

Первый рабочий прототип комптоновской камеры был разработан в работе [3]. Рассеиватель представлял собой массив  $33 \times 33$  детекторов из сверхчистого германия (HPGe) толщиной 6 мм, а поглотитель был из неорганического сцинтиллятора NaI(Tl). Прототип камеры был разработан для задач однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, где диапазон энергий фотонного излучения ограничен 511 кэВ.

Показано, что применение детектора-рассеивателя вместо кодирующей апертуры или многопинхольного коллиматора позволяет увеличить чувствительность прибора более чем в 15 раз при одинаковом пространственном разрешении. В работах [4,5] предложены прототипы с использованием HPGe как рассеивателя, так и поглотителя. Однако все предложенные варианты могли работать только со стационарной электроникой NIM или CAMAC, что затрудняло применение данных детекторов в портативных камерах.

Первая возможность создать портативную комптоновскую камеру появилась с изобретением полупроводниковых позиционно-чувствительных детекторов на основе кристалла CdZnTe (CZT) [6]. Причем такой кристалл можно использовать один, а не два, как в традиционной схеме комптоновской камеры (рис.4).



**Рис.3.** Первый предложенный прототип комптоновской камеры.

Из-за плохого временного разрешения и малого расстояния пролета гамма-квантов между взаимодействиями выделить последовательные события можно только по поглощенной энергии в каждом событии. Детектор состоит из анода, разбитого на пиксели, и цельного катода на толстом кристалле. Суммарный взвешивающий потенциал каждого пикселя быстро возрастает по мере прибли-

жения к пикселю, а взвешивающий потенциал катода линейен относительно глубины. Поэтому дрейф электронного облака, образованного в результате взаимодействия гамма-квантов с кристаллом, дает сигнал на катоде, а на аноде срабатывает только тот пиксель, к которому облако дрейфовало. Амплитуда сигнала на катоде пропорциональна заряду и глубине взаимодействия, а сигнал на аноде пропорционален только заряду. Следовательно, энергия взаимодействия определяется по сигналу с анода, а глубина взаимодействия по соотношению сигнала катод/анод. Сработавший пиксель анода показывает боковую точку взаимодействия гамма-кванта. Таким образом можно определить трехмерную координату взаимодействия гамма-кванта внутри кристалла. Затем из массива взаимодействий отбираются пары событий, соответствующие двум последовательным

взаимодействиям одного гамма-кванта, после чего производится обратное проецирование. Преимуществом кристалла CZT является высокое энергетическое разрешение (~1%) и возможность регистрировать гамма-кванты, прилетающие со всех направлений. Недостатками таких детекторов, как и всех полупроводниковых детекторов, является низкая эффективность регистрации гамма-квантов с энергией выше 500 кэВ, сложность в изготовлении кристаллов большого объема и сложная электроника для считывания с кристалла.

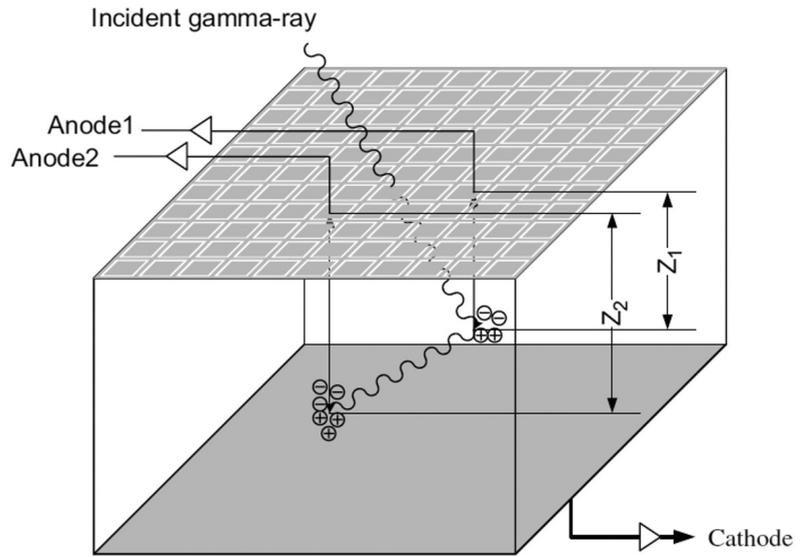


Рис.4. CZT-детектор.

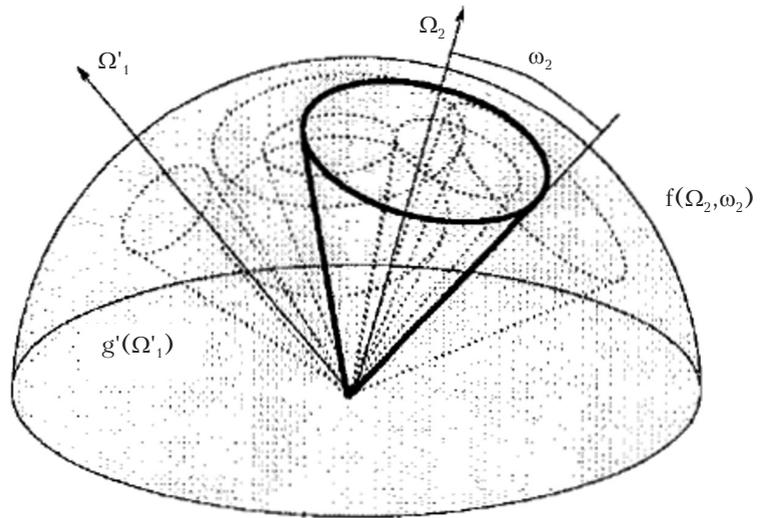


Рис.5. Диаграмма восстановления нескольких конусов [7].

Рассмотрим более подробно процесс восстановления гамма-изображения в комптоновских камерах. Как было показано ранее, самым простым методом получения изображения является обратное проецирование. Обратное проецирование конуса вероятных событий в общем случае выполняется на единичную сферу, как показано на рис.5. Если обозначить за  $g(\bar{\Omega})$  искомое распределение источника, а за  $g'(\bar{\Omega}')$  получаемую обратную проекцию, то искомое распределение источника можно представить в виде:

$$g(\bar{\Omega}) = \sum_i^N g'_i(\bar{\Omega}') . \quad (2.5)$$

Область наибольшего пересечения проекций и будет наиболее вероятным местом источника излучения. Изображение затем проецируется на плоскость (рис.6).

Недостатком простого метода обратных проекций является необходимость набора большой статистики для достижения хорошего углового разрешения. В ином случае изображение будет весьма размытым. Модернизацией

этого метода является метод фильтрованных обратных проекций. Его можно описать следующим образом, согласно [7]. Одиночная проекция будет описываться уравнением:

$$g(\bar{\Omega}) = \int d(\cos \omega_2) \int d\bar{\Omega}_2 f(\Omega_2, \omega_2) R(\omega, \omega_2) . \quad (2.6)$$

Здесь  $R(\omega, \omega_2)$  – это функция отклика системы на комптоновское событие,  $f(\Omega_2, \omega_2)$  – измеренная интенсивность в заданном направлении и угле комптоновского рассеяния.

Функцию  $R(\omega, \omega_2)$  можно представить в виде:

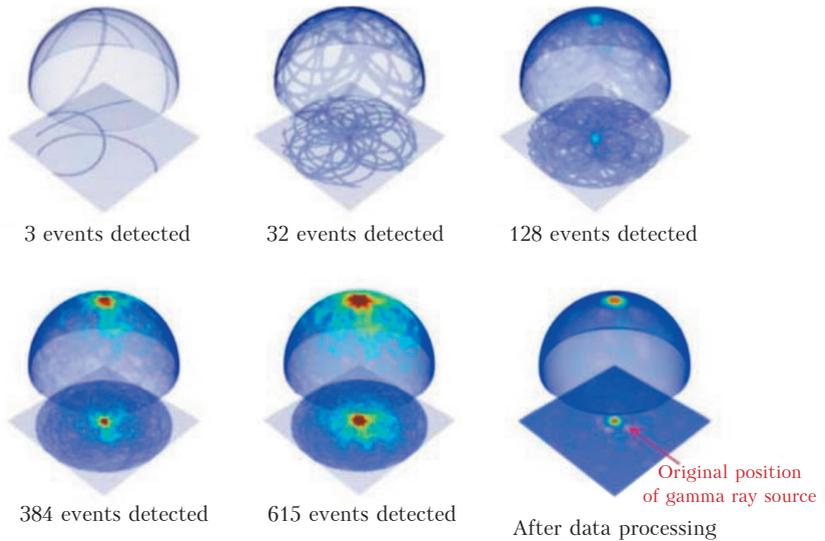
$$R(\omega, \omega_2) = \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{2n+1}{4\pi} \right)^2 \frac{2\pi}{H_n^{bp}} P_n(\cos \omega_2) P_n(\cos \omega) , \quad (2.7)$$

где  $P_n(\cos \omega)$  являются полиномами Лежандра.

В итоге обратная проекция будет записана так:

$$g(\bar{\Omega}_1) = \sum_{v=1}^N R(\omega^v, \omega_2^v) . \quad (2.8)$$

То есть каждому событию присваивается функция отклика в направлении  $\Omega_1$  с измеренным углом рассеяния  $\omega_2$ . Суммирование функций отклика для каждого события дает метод фильтрованных обратных проекций. Сложность данного метода заключается



**Рис.6.** Качество итогового изображения в зависимости от количества событий [8].

в определении функции отклика для каждой конкретной камеры.

Существует еще один метод улучшения качества изображения – итерационный метод максимального правдоподобия (*MLEM*). Суть метода заключается в вероятностном описании механизма набора данных. Описание строится на предположении, что источник излучения является Пуассоновским, и излучение каждого элемента источника независимо и характеризуется только собственным средним значением. Пусть вектор  $\lambda$  – искомый источник излучения, а вектор  $y$  – набранные данные. Вероятность того, что элемент источника  $j$  даст сигнал в элементе детектора  $i$  обозначим  $P_{ij}$ . Тогда функция распределения вероятности набора данных от неизвестного источника  $\lambda$  с учетом того, что  $y = P\lambda$ , будет иметь вид [9]:

$$f(y|\lambda) = \prod_i \frac{(\sum_j P_{ij} \lambda_j)^{y_i}}{(y_i)!} \exp\left(-\sum_j P_{ij} \lambda_j\right) . \quad (2.9)$$

Подход алгоритма *MLEM* заключается в нахождении такого  $\lambda$ , что  $f(y|\lambda)$ , либо монотонная функция от  $f(y|\lambda)$  будет иметь максимальное значение. Рекуррентная формула для оценки вектора  $\lambda$  на шаге  $k$ :

$$\lambda^{k+1} = \frac{\lambda^k}{\sum_q P_{qk}} \sum_i \frac{P_{ij} y_i}{\sum_k P_{ik} \lambda_k^k}. \quad (2.10)$$

Первоначальное предположение о значении  $\lambda$  можно взять из простого метода обратных проекций. Применение метода *MLEM* требу-

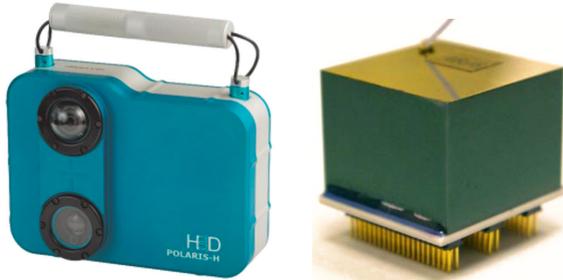


Рис.7. Камера *Polaris* и детектор.

ет меньших знаний о характеристиках самой камеры, но может потребовать существенных затрат на вычисление. Применение данного метода возможно только при постобработке изображения.

Одной из первых камер, построенных на методе комптоновской камеры, является камера *Polaris H-100* (рис.7) [10] с детектором на основе полупроводникового кристалла *CZT*.

Характеристики камеры приведены в табл.2, примеры изображений – на рис.8.

Детектор камеры обеспечивает высокую чувствительность на небольших энергиях и хорошее энергетическое разрешение. Однако



Рис.8. Пример изображений камеры *Polaris H-100* [8].

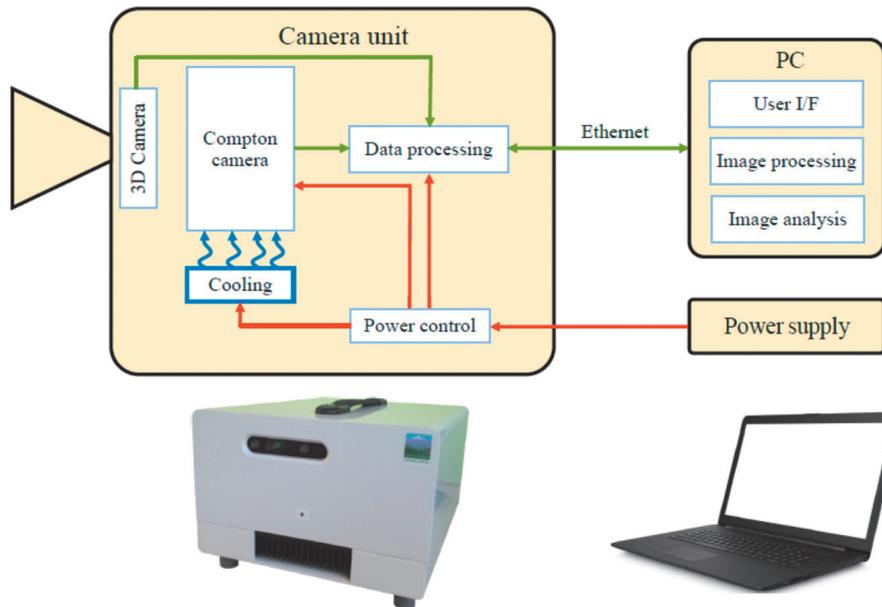


Рис.9. Камера *Temporal delta* и ее структурная схема.

камера обладает невысоким угловым разрешением порядка  $20^\circ$  и малой эффективностью регистрации при высоких энергиях.

Перспективной разработкой является камера *Temporal δ* фирмы *Damavan Imaging* [10] (рис.9). Эта камера состоит из двух детекторов на основе сцинтилляторов  $\text{CeBr}_3$  размером  $32 \times 32$  мм, считываемых цифровыми *SiPM Philips DPC3200*. Главное преимущество камеры, помимо высокой эффективности регистрации излучения, является временное разрешение менее 300 пс, что позволяет с высокой избирательностью отбирать истинные события. Установленная оптическая 3D камера в будущем позволит получать объемное изображение источника излучения. Также камера оснащена дальномером и спектрометром на основе кристалла CZT. Характеристики камеры приведены в табл.2, примеры получаемых изображений приведены на рис.10.

Из-за большого сечения фотоэффекта при энергии фотонов менее 250 кэВ использовать камеры *Polaris H100* и *Temporal δ* для визуализации источников с энергиями менее



**Рис.10.** Пример изображения с камеры *Temporal δ*.

**Табл.2.** Характеристики камер *Polaris* и *Temporal δ*.

	Polaris	Temporal δ
Объем кристалла, $\text{см}^3$	6	26
Разрешение на Cs-137, %	< 1	< 7
Угловое разрешение, $^\circ$	20	6
Энергетический диапазон, кэВ	250–3000	250–3000
Чувствительность	3 мкР/ч < 1 мин	3 мкР/ч < 1 мин 0,03 мкР/ч ~ 1 час

250 кэВ невозможно. Для покрытия диапазона визуализации 50–250 кэВ можно использовать метод кодирующей апертуры, рассмотренный в первой части данной статьи.

Примеры практической реализации методов получения изображений источников гамма-излучения, анализ влияния условий измерения, характерные ошибки и области применения различных методов будут рассмотрены в третьей, заключительной части статьи.

## Литература

1. R. Todd, J. Nightingale, D. Everett, "A proposed Gamma camera", *Nature*, vol. 251, pp. 132-134, 1974.
2. V. Schonefelder et al, "The imaging Compton telescope COMPTEL on the gamma ray observatory", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, no. 31, pp. 766-70, 1984.
3. Manbir Singh, "An electronically collimated gamma camera for single photon emission computed tomography. Part 1: Theoretical considerations and design criteria", *Medical Physics*, vol. 10, no. 4, pp. 421-427, 1983.
4. J.B. Martin et al, "A ring Compton scatter camera for imaging medium energy gamma rays", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, no. NS-40, 1993.
5. J.B. Martin et al, "A data acquisition system for a Ring Compton-scatter Camera", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, no. NS-41, 1994.
6. Z. He et al, "Position-sensitive single carrier CdZnTe detectors", *NIM A*, no. 388, pp. 180-185, 1997.
7. L.C. Parra, "Reconstruction of cone-beam projections from Compton scattered data", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 47, no 4, 2000.
8. O.P. Ivanov et al, "The Improving of the Angular Resolution of Gamma-Ray Images of Portable Compton Camera with Special Iterational Method", 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Manchester, United Kingdom, pp. 1-5, 2019.
9. Tom Hebert, Richard Leahy, Manbir Singh, "Three-dimensional maximum-likelihood reconstruction for an electronically collimated single-photon-emission imaging system", *J. Opt. Soc. Am.*, A 7, pp. 1305-1313, 1990.
10. Камера Polarix H100 [online]. URL: <https://h3dgamma.com/H100Specs.pdf> (дата обращения: 07.06.2020).
11. Камера Temporal [online]. URL: <http://damavan-imaging.com/temporal-delta-compton-camera/> (дата обращения: 01.07.2020).

## Instruments and Methods for Gamma-Ray Visualization at Nuclear Facilities. Part II

*Teverovskiy Yury* (SPC «Doza», Ltd, Zelenograd, Russia)

**Abstract.** The article gives review of gamma-ray visualization method based on Compton camera.

**Key words:** *gamma-ray visualization, gamma image, Compton camera.*

*Ю.Л.Теверовский (нач.гр.) – НИИ «Доза», г. Москва, г. Зеленоград.*

*Контакты: тел. +7 (495) 777-84-85; e-mail: yurytever@doza.ru.*