

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

В работе описаны существующие принципы получения гамма-изображений, рассматриваются серийно выпускаемые гамма-камеры, их принципы работы, рабочие параметры, приведены примеры гамма-изображений.

Ключевые слова:

визуализация гамма-излучения, гамма-изображение, комптоновская камера, пинхольный коллиматор, кодирующая апертура.

Ю.Л.Теверовский

(НПП Доза, г. Москва, Зеленоград)

Портативные системы получения визуальных изображений источников гамма-излучения, или гамма-камеры, применяются для широкого ряда задач в атомной энергетике [1,15-17]:

- поиск наиболее загрязненных элементов оборудования на объектах, отработавших свой ресурс и находящихся на стадии вывода из эксплуатации;
- изучение отработавшего ядерного топлива с целью определения степени выгорания по длине топливного элемента;
- поиск наиболее радиоактивных объектов при авариях и нестандартных ситуациях;
- поиск потерянных источников;
- поиск утечек излучения из дефектоскопов.

Определение наиболее опасных радиоактивных объектов позволяет построить такой сценарий работ, при котором дозовая нагрузка на персонал, участвующий в работе, будет минимизирована. Наиболее часто применение гамма-камер требуется в тех случаях, когда на исследуемом объекте существует мощное фоновое излучение, либо в тесных помещениях, где применение классических приборов

дозиметрического контроля не даст полной информации о распределении источников.

Первые образцы гамма-камер представляли собой весьма массивные конструкции [2-4]. Развитие электроники и новых методов регистрации излучения позволили создать портативные гамма-камеры с небольшой массой, улучшить их угловое разрешение и чувствительность [21-25]. Наличие дистанционного управления позволяет персоналу вести работу в автоматизированном режиме вне загрязненных объектов.

Несмотря на то, что видимый свет и гамма-излучение по своей природе являются фотонами, методы получения оптического и гамма-изображений существенно отличаются. Из-за высокой энергии гамма-излучения не существует материалов и веществ, на которых гамма-излучение могло бы преломляться. Для получения гамма-изображений применяются позиционно-чувствительные детекторы (ПЧД) с пинхольным коллиматором или кодирующей маской и комптоновские камеры.

Пинхольная камера

Первая портативная система получения гамма-изображений основана на принципе пинхольной камеры и была применена при ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС [5]. Конструкция этого прибора приведена на рис.1. Излучение от источника, проходя через отверстие двойного конического коллиматора 1, создает на детекторе 2 перевернутое изображение источника. Детектор представлял собой двумерную матрицу изолированных друг от друга сцинтилляторов CsI(Tl) толщиной 6 мм и сечением 1×1 мм². Общий диаметр детектора составлял 40 мм. Свет от сцинтиллятора усиливался оптическим усилителем 3 и регистрировался малошумящей охлаждаемой ПЗС-матрицей с разрешением 512×512 пикселей. Детектор окружался свинцовой защитой 5 для уменьшения вклада фонового излучения.

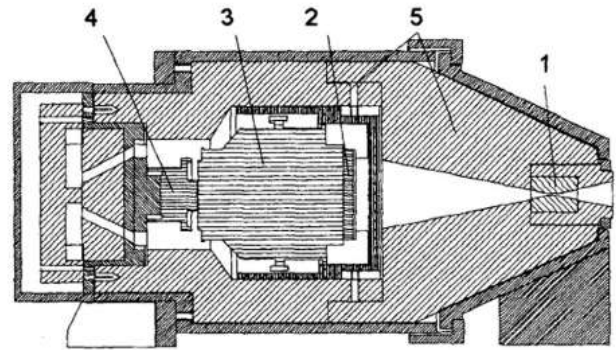


Рис.1. Устройство пинхольной камеры. 1 – двухконусный коллиматор; 2 – сцинтиллятор; 3 – ЭОП (электронно-оптический преобразователь); 4 – ПЗС матрица; 5 – передняя и боковая защита.

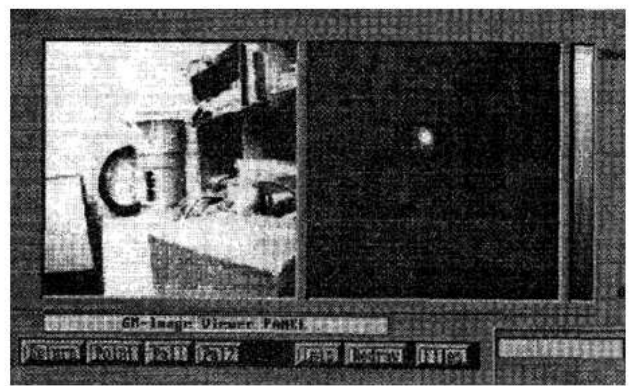


Рис.2. Пример изображения источника, полученного пинхольной камерой.

Сигнал с ПЗС-матрицы затем обрабатывался с помощью компьютера и накладывался на оптическое изображение (рис.2).

При разработке пинхольных камер приходится соблюдать разумный баланс между чувствительностью прибора и угловым разрешением. Увеличение диаметра отверстия коллиматора ведет к увеличению доли излучения, попадающего на детектор, а, следовательно, к увеличению чувствительности. Однако при этом разрешение изображения будет ухудшаться. Также можно варьировать расстояние от отверстия коллиматора до детектора, но при увеличении доли излучения, попадающего на детектор, будет уменьшаться разрешение получаемого изображения.

Современным примером пинхольной камеры служит прибор RadSearch Model G3050 компании Antech (рис.3) [6].

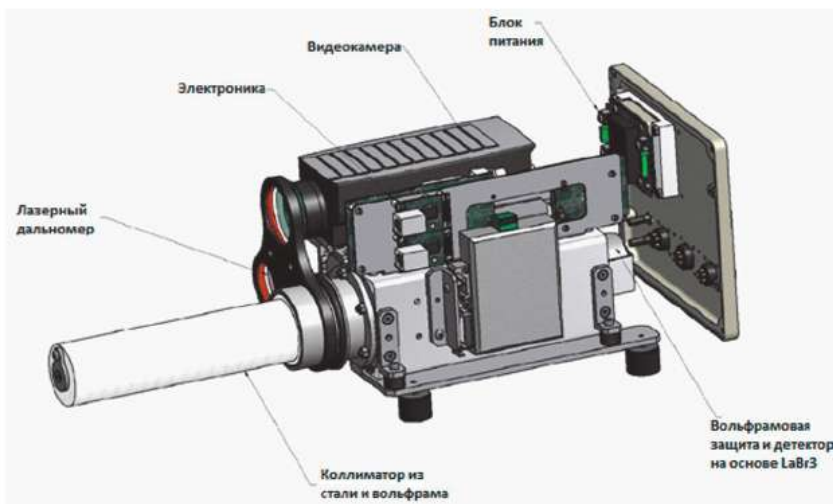


Рис.3. Прибор RadSearch Model G3050.



Рис.4. Прибор RadSearch Model G3050 на штативе.

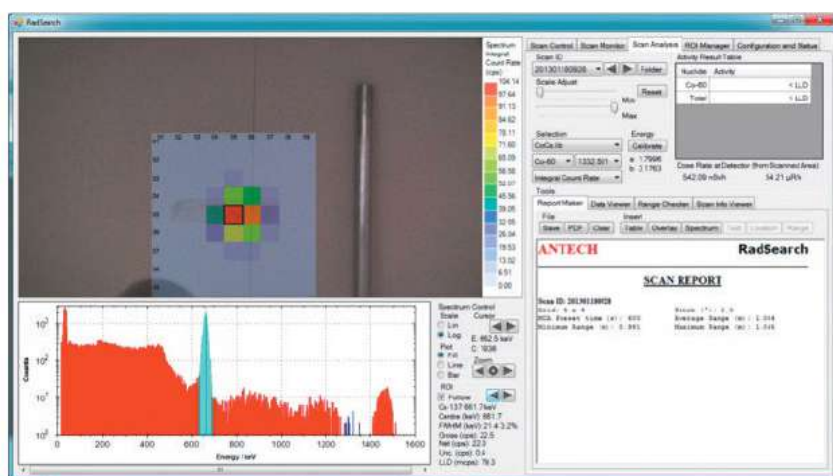


Рис.5. Пример получаемого изображения прибором RadSearch Model G3050.

В этом приборе в качестве детектора используется сцинтилляционный кристалл $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размерами 25×25 мм и ФЭУ. Энергетический диапазон регистрируемого излучения 30–2000 кэВ. В зависимости от наличия коллиматора, поле зрения установки составляет 4 или 18° . Камера устанавливается на специальный штатив, который позволяет сканировать объекты в автоматическом

режиме (рис.4). Углы сканирования $\pm 180^\circ$ и $\pm 90^\circ$ в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно. В данном приборе отсутствует ПЧД. Программное обеспечение формирует суммарное изображение из большого числа экспозиций наложением на оптическое изображение. Пример суммарного изображения показан на рис.5. Встроенный спектрометрический тракт и лазерный дальномер позволяют проводить идентификацию нуклидов и рассчитывать их активность.

Основными преимуществами пинхольных гамма-камер являются: прямое получение изображения радиоактивного источника; широкий энергетический диапазон регистрируемого излучения; несложная электроника.

Однако у таких камер малая чувствительность и очень ограниченное поле зрения. Из-за этих факторов в некоторых задачах приходится увеличивать время экспозиции и проводить несколько измерений одного и того же объекта. Наличие вольфрамовой либо свинцовой защиты существенно увеличивает габариты и массу устройства.

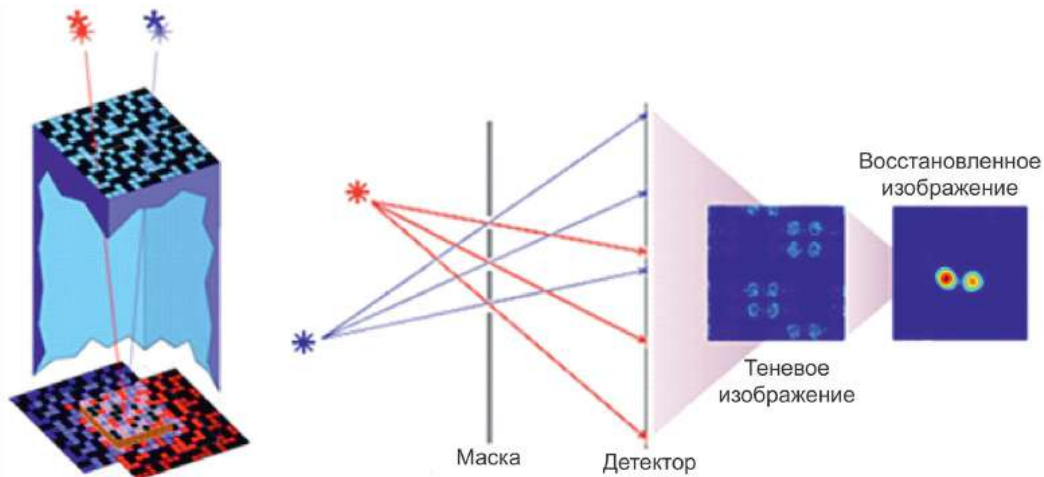


Рис. 6.
Метод получения изображения с использованием кодирующей апертуры.

Многих проблем пинхольных камер можно избежать, если применить метод кодирующей апертуры [7].

Камера с кодирующей апертурой

Чувствительность прибора тем выше, чем большая часть гамма-квантов, испускаемых визуализируемым объектом, регистрируется прибором. Из-за малого диаметра отверстия коллиматора на детектор попадает очень маленькая доля потока квантов. Кодирующая апертура позволяет существенно (в десятки или сотни раз) увеличить число гамма-квантов, регистрируемых детектором, что обусловлено высокой «светосилой» кодирующих масок за счет увеличения площади открытой апертуры. Метод получения гамма-изображений с использованием кодирующей апертуры проиллюстрирован на рис. 6.

Кодирующая маска (металлическая непрозрачная пластина с большим количеством прозрачных элементов) расположена между объектом и детектором. Гамма-излучение модулируется маской и регистрируется ПЧД. Получается теньевая картина, кодированное изображение. Для любого положения источника кодирующая маска создает уникальную тень на детекторе. Затем, с учетом знания геометрии маски и всей системы в целом, компьютер при помощи специального алгоритма восстанов-

ливает исходное распределение потока гамма-излучения от источников. Восстановленное изображение затем накладывается на оптическое и получается синтетическое изображение, на котором видно распределение активности.

Простейший путь восстановления искомого гамма-изображения по теньевой картине – алгоритм инверсии. Если N_T – количество детекторов в массиве, X_m – среднее количество гамма-квантов, приходящих из различных направлений на элемент маски за полное время эксперимента (m изменяется от 1 до N_T). Именно X_m необходимо определить для получения гамма-изображения объекта. Детектор с номером n зарегистрирует приблизительно S_n гамма-квантов, где:

$$S_n = A_{mn} X_m, \quad (1.1)$$

A_{mn} – матрица коэффициентов. На детектор попадают кванты только из тех направлений, на пути которых находится прозрачный элемент маски, т. е. $A_{mn} = I$, если соответствующий элемент прозрачен, и $A_{mn} = 0$ в противном случае. Таким образом, для определения X_m необходимо решить систему из N линейных уравнений с N неизвестными. Если $\det A_{mn} \neq 0$, система (1.1) имеет единственное решение:

$$X_m = C_{nm} S_n, \quad (1.2)$$

где $C_{nm} = (A_{mn})^{-1}$ – обратная матрица.

Пример теньевых и восстановленных изображений показан на рис. 7.

За последние годы накоплен большой объем знаний о кодирующих масках, предложено и изучено множество типов узоров [8,9]. Наибольшее практическое применение в атомной отрасли получили маски с узорами на основе последовательностей URA и MURA в прямоугольной, квадратной и шестиугольной реализациях. На рис.8 приведены примеры таких масок.

Для всех масок матрица A_{mn} состоит из элементов 0 и 1, а обратные матрицы C_{nm} для апертур на основе URA и MURA имеют значение элементов 1 или -1 [10]. Такие матрицы называются унимодальными. Если сравнить отношения сигнал/шум – SNR для элемента изображения S_{ij} пинхольной камеры (ph) и камеры с кодирующей маской (M) с узором URA/MURA с учетом унимодальности матрицы C_{mn} :

$$SNR_{ph} = \frac{S_{ij}}{\sqrt{S_{ij} + B_{ij}}}, \quad (1.3)$$

$$SNR_M = \frac{NS_{ij}}{\sqrt{NS_{ij} + N \sum_{kl} S_{kl} + \sum_{mn} B_{mn}}}, \quad (1.4)$$

то станут понятны преимущества камеры с кодирующей апертурой.

При слабом фоне и для источников среднего размера регистрируются более слабые источники: $S_M/S_{ph} = 1/\sqrt{N}$ ($N = \sum A_{ij}$ – число открытых элементов). Если фоновый сигнал преобладает, можно обнаружить источник при более высоком уровне фона:

$$B_M/B_{ph} = N/2.$$

Увеличение светосилы обусловлено наличием большого количества отверстий в кодирующей маске. Однако увеличение светосилы еще не гарантирует улучшение чувствительности прибора. В случае кодирующей маски детектор регистрирует не само гамма-изображение, а зако-

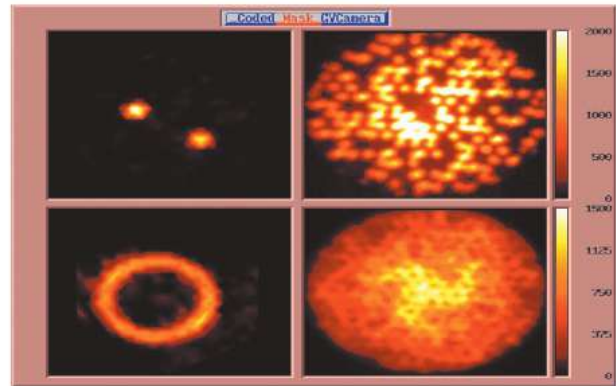


Рис.7. Восстановленные (слева) и теневые (справа) изображения.

дированную в теневой картине информацию. Для восстановления начального гамма-изображения необходимо декодирование теневой картины. Если теневая картина является неидеальной, что может быть из-за неидеальности маски, статистических шумов в изображении, неоднородности чувствительности детектора, то после применения декодирующей процедуры возникнут собственные дополнительные шумы. Наличие этих шумов при определенных условиях может привести к ухудшению чувствительности прибора (в первую очередь это относится к случаю сложных объектов). Зависимость SNR от пропуска маски, сложности/протяженности изображения показаны на рис.9.

Узоры масок URA и MURA строятся по специальному алгоритму. Например, узор базовой структуры гексагональной URA

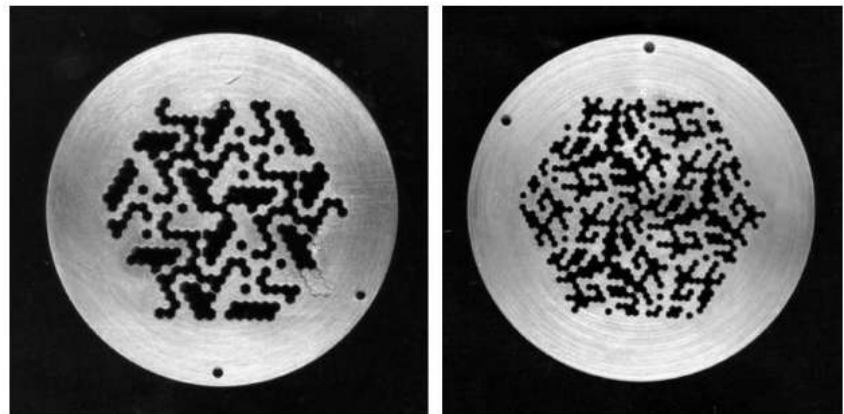


Рис.8. Примеры кодирующих масок (URA ранга 6 слева, URA ранга 9 справа).

(hURA) или MURA маски строятся специальным отображением псевдослучайной последовательности длиной L , получаемой с использованием квадратичных вычетов по следующим правилам. L – простое число. Если $L = 4n - 3$, где n – целое, то маска URA; если $L = 4n + 1$, то маска MURA. Элементы последовательности $A(i)$ ($0 \leq i < L$) имеют следующие значения: $A(0) = 1$ для маски URA; $A(0) = 0$ для маски MURA и $A(i) = 1$, если i является остатком от деления j^2 на L ($0 < j < L$), и $A(i) = 0$ в противном случае. Гексагональные маски возможны только для такого простого числа, для которого выполняется еще условие $L = 3R(R+1)+1$, т. к. последовательность должна заполнить шестиугольник, состоящий из одинаковых элементов. Число R является рангом маски.

В разработках в основном используются гексагональные кодирующие маски 6-го и 9-го рангов из семейства URA. По мере увеличения ранга маски R увеличивается количество элементов в восстановленном изображении, т. е. улучшается угловое разрешение системы. Существуют гексагональные маски 1–4, 6, 9–11 и др. рангов из семейств URA и MURA. Размер диагонали гексагональной маски ранга R равен $(4R+1)d$, где d – поперечный размер отдельного элемента маски. Следует подчеркнуть, что размер и расположение массива детекторов соответствуют базовой структуре маски (рис. 10).

При различных углах φ между геометрической осью прибора и направлением распространения гамма-излучения на детектор проецируются разные участки маски. В частности,

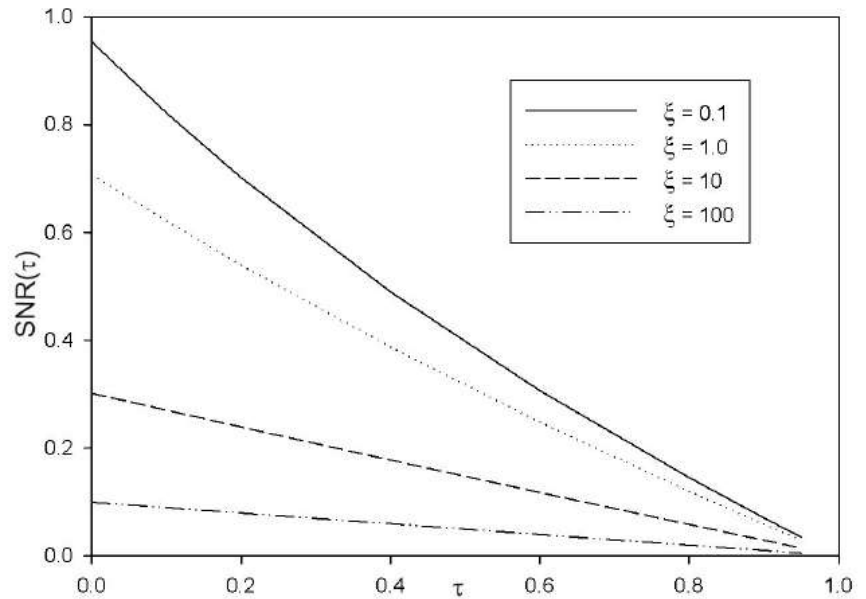


Рис.9. Обобщенный график зависимости отношения сигнал/шум от пропуска маски (зависящего от энергии излучения, толщины и материала маски) и сложности изображения (точечные или протяженные источники, характеризуется параметром ξ). Параметр ξ примерно равен числу источников в поле зрения системы [18].

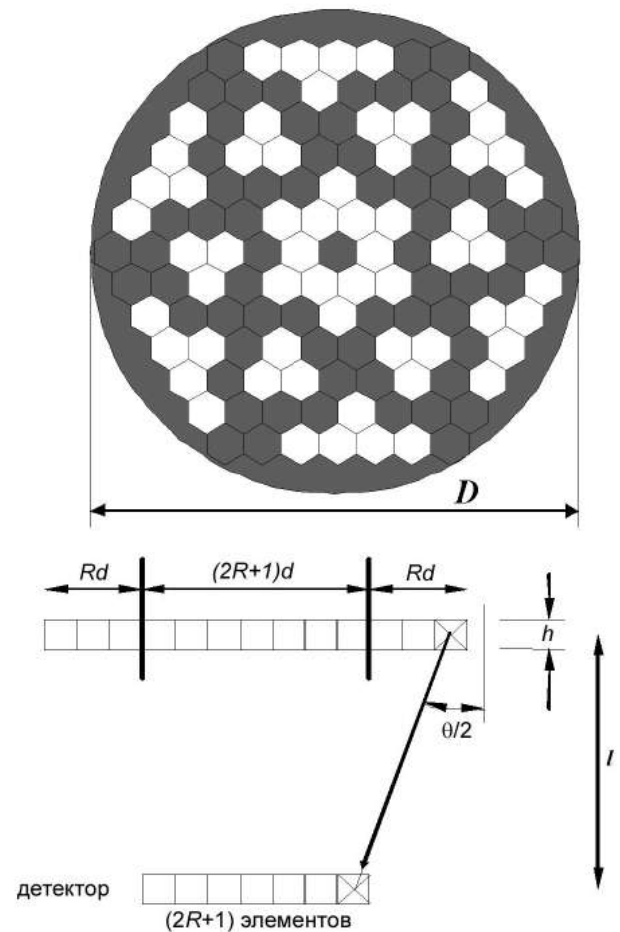


Рис.10. Взаимное расположение кодирующей маски и детектора.

при $\varphi = 0$ на детектор проецируется базовая структура. Можно видеть, что предельный угол наблюдения $\varphi = \varphi_{lim}$ соответствует проекции элемента “х” маски на элемент “х” детектора (рис.10). Другими словами, угол зрения прибора θ определяется из следующего выражения:

$$\theta = 2\varphi_{lim} = 2\arccos(1/F), \quad (1.5)$$

где F – расстояние от крайнего элемента маски до крайнего элемента детектора. Формула (1.5) справедлива лишь для тонкой маски. Для маски конечной толщины существует дополнительное ограничение. Оно связано с ограниченностью угла зрения отдельного прозрачного элемента маски θ_h (отношение диаметра отверстия к толщине маски):

$$\theta_h = d/h. \quad (1.6)$$

Для сохранения чувствительности по всему углу зрения прибора θ желательно выполнение неравенства $\theta_h > \theta$, т. е. необходимо использовать тонкие маски. В то же время необходима большая толщина маски для обеспечения высокой модуляции интенсивности гамма-излучения. Поэтому выбор толщины маски есть компромисс между большим углом зрения и ее высокой поглощательной способностью. В качестве материала для изготовления масок обычно используются вольфрам, сплавы вольфрама или тантал, которые обладают высоким коэффициентом ослабления в области энергий до 1,5 МэВ. Угловое разре-

шение прибора $\delta\theta$ зависит от размера элемента и ранга маски и не может быть лучше, чем:

$$\delta\theta \geq \arctg(d/l) \approx \theta/2R. \quad (1.7)$$

Лишь для маски 9-го ранга возможно разрешение 1–1,5°.

Маски URA и MURA обладают еще одним примечательным свойством. При повороте квадратной маски, имеющей узор URA, на 90° из-за ее симметрии открытые элементы переходят в закрытые и наоборот. Если первую половину времени экспозиции проводить для исходного положения маски, а вторую для повернутого, затем вычесть из первой полученной теневой картины вторую, то немодулированная боковая подсветка сократится, а полезный модулированный маской сигнал сохранится. Для шестиугольных масок то же происходит при повороте на 60°. Такое свойство позволяет не использовать боковую защиту, тем самым сохраняя малый вес и габариты устройства. Такой метод иногда называют «маска–антимаска».

Для реализации гамма-камер с кодирующей апертурой требуются компактные ПЧД. В настоящее время несколькими фирмами разработаны универсальные модули считывания сигнала с полупроводниковых детекторов и формирования изображения на основе блока электроники Medipix [11,12] (рис.11). Фирмы-производители изготавливают системы с

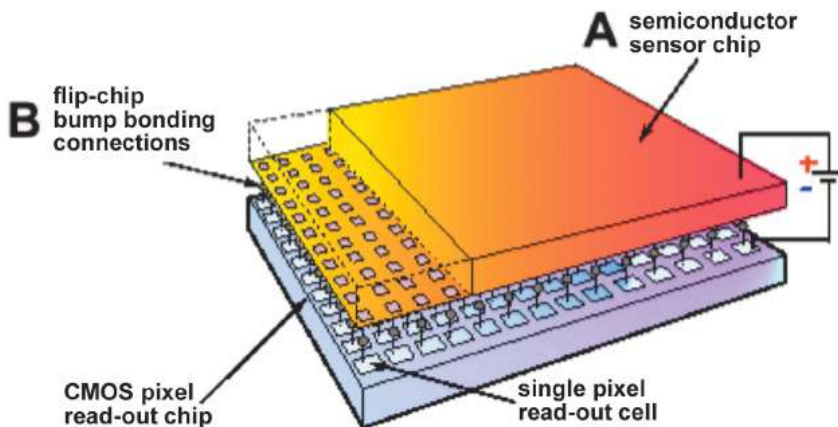


Рис.11. Схема расположения детектирующего кристалла и электроники. Размер кристалла 14×14 мм.

использованием всех возможных для применения полупроводниковых кристаллов Si, GaAs и CdTe. Для использования в системе получения гамма-изображений с энергией гамма-квантов до 1,5 МэВ единственным подходящим кристаллом является CdTe.

Детекторы Медипикс – гибридные детекторы. Это означает, что кристалл полупроводникового датчика

связан со слоем электроники (специальной микросхемой). Падающее излучение создает в кристалле облако электронов и дырок. Заряд затем собирается через бамп-контакты и обрабатывается электроникой попиксельно. Электроника подсчитывает количество событий в каждом пикселе за время экспозиции. Размеры матрицы бывают: 128×128, 256×256, 512×512 пикселей.

Зарегистрированная теневая картина представляет собой двухмерный массив чисел, соответствующих отдельным пикселям ПЗС-матрицы. Эта цифровая информация по ряду причин может сильно отличаться от реального распределения интенсивности гамма-излучения в плоскости детектора. Использование искаженной теневой картины не позволяет получить хорошее качество восстановленного изображения. При восстановлении теневой картины критическим параметром является неоднородность чувствительности детектора по площади. Отсутствие учета неоднородности

чувствительности детектора сильно влияет на качество восстанавливаемых изображений. При этом не только ухудшается чувствительность прибора за счет увеличения шумов декодирующей процедуры. Достаточно высокая степень неоднородности детектора может привести даже к полной потере формы визуализируемого объекта. Поэтому перед измерениями необходимо проводить калибровку детектора по площади. Стоит отметить, что в пинхольной камере неоднородность чувствительности детектора также влияет на получаемые изображения, но это влияние не столь велико.

К искажению теневой картины, получаемой на детекторе, приводят дрейф параметров детектора, например, его температурная зависимость, и влияние боковой засветки.

Для устранения боковой засветки можно разбивать общую экспозицию на кадры. При использовании маски hURA можно воспользоваться методом «маска-антимаска». Тогда на обеих картинах влияние засветки будет

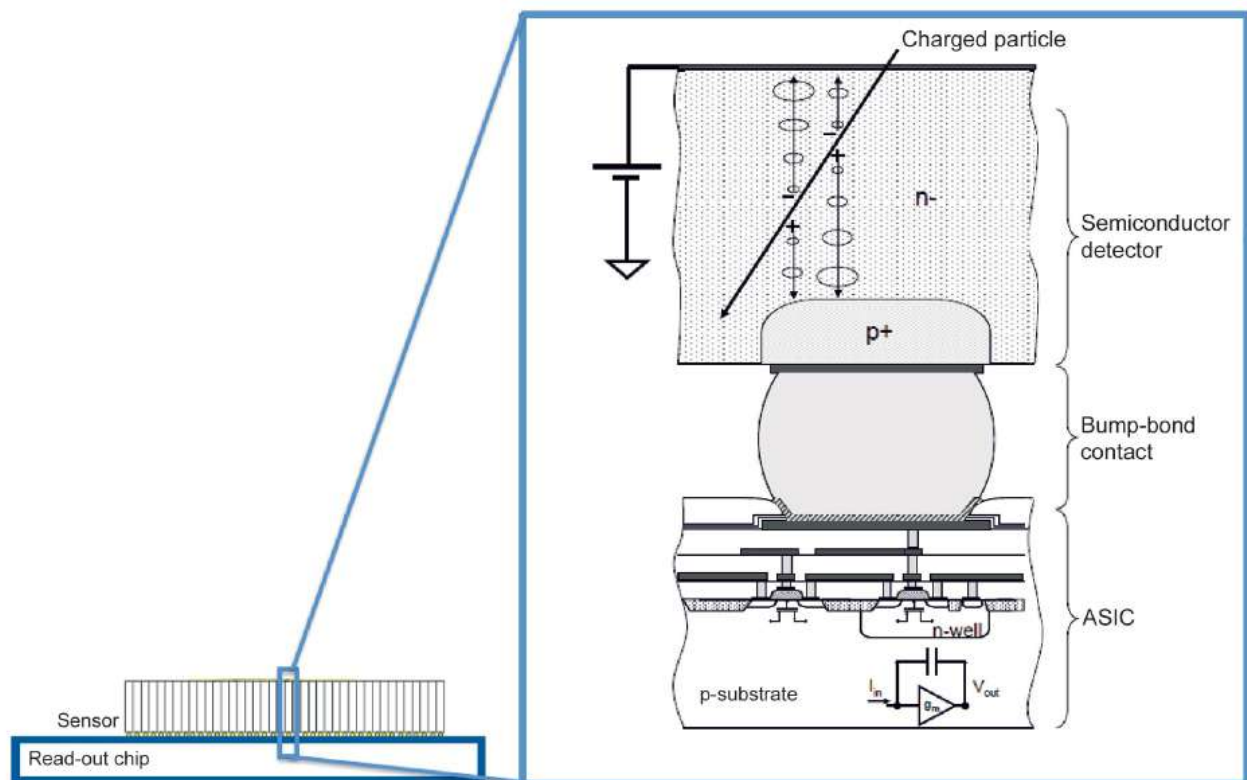
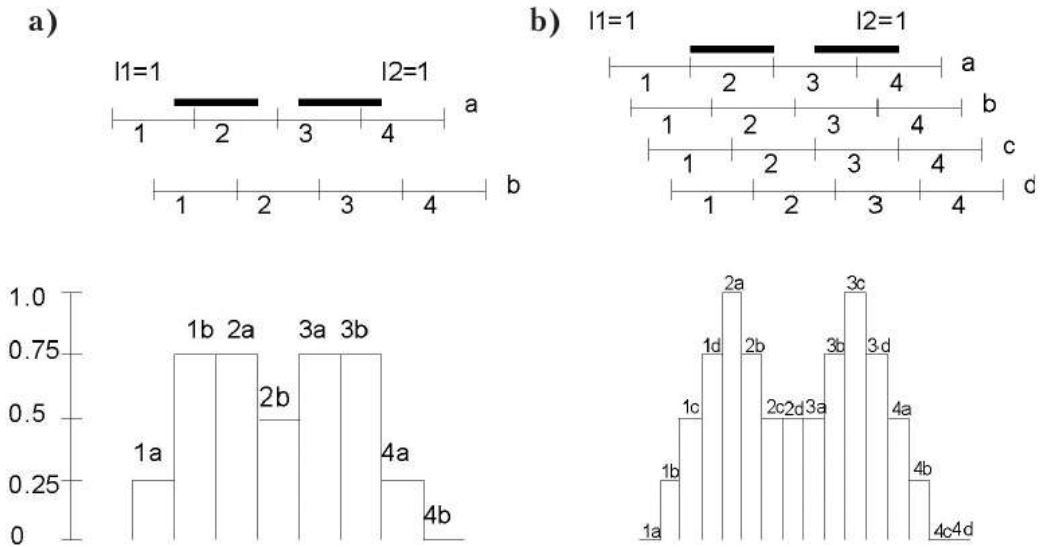


Рис.12. Схема одного пикселя детектора Мединикс.

Рис.13.
Схема дополнительного разбиения детектора для реализации теоретического углового разрешения маски.



одинаковым, и его можно будет вычестть. Однако такой метод не позволяет устранить дрейф параметров детектора. Для устранения этого эффекта в работах [13,14] применяется разбиение экспозиции на 8 кадров в следующей последовательности:

M A A M A M M A,

где M – экспозиция в позиции маска, A – экспозиция в позиции антимаска.

Получаемая при любой экспозиции тeneвая картина на самом деле является избыточной. При использовании гексагональной маски 6 ранга число отверстий в ней будет 127, а количество пикселей, с которых получается тeneвая картина, будет, к примеру, $128^2 = 16384$.

Такая избыточность позволяет применять специальные алгоритмы по улучшению углового разрешения с целью определения нескольких источников в поле зрения камеры. Разобьем зарегистрированную ПЗС-камерой тeneвую картину на массив доменов “a”, шаг, узор и размеры которого соответствуют шагу, узору и размерам базовой структуры маски. В качестве исходного набора чисел, используемых в дальнейшем в процедуре декодировки, возьмем отклики соответствующих доменов. Под откликом домена подразумевается суммарный сигнал от всех пикселей, входящих

в этот домен. После восстановления изображения разобьем тeneвую картину на другой массив доменов “b”. Он отличается от первого смещением на половину шага базовой структуры маски. После повторного декодирования получим два исходных изображения. Понятно, что оба эти изображения с точностью до их дискретности соответствуют истинному изображению объекта. Поэтому объединим их в единое изображение с дискретностью вдвое меньшей прежней, как это показано на рис.13(а). Можно видеть, что такой путь позволяет разрешить два источника (в объединенном восстановленном изображении наблюдается провал яркости между источниками). Отметим, что детектор (домен) “2b” регистрирует вклад от обоих источников. При увеличении количества разбиений, смещенных относительно друг друга на одинаковый шаг, качество восстановленного изображения улучшается (см. случай четырех разбиений на рис.13(б) – восстановленное изображение имеет дискретность, вчетверо меньшую обычной). Это связано с тем, что хотя бы для одного из многих разбиений точечные источники проецируются маской практически точно на массив доменов. Таким образом, рассмотренный алгоритм позволяет заметно повысить угловое разрешение системы без потери ее чувствительности.

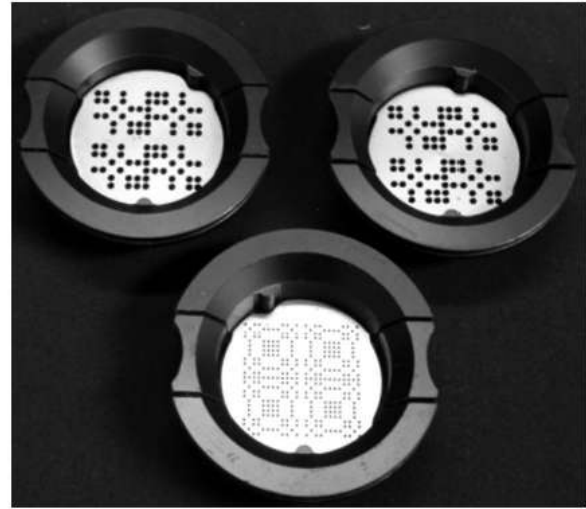


Рис.14. Камера *iPix* и набор кодирующих масок *MURA*.

При использовании прямоугольных масок логично использовать одинаковые сдвиги массива детекторов (доменов) по обеим координатам. Тогда количество разбиений m должно быть квадратом целого числа k : $m = k^2$. Для гексагональных масок возможное количество разбиений может выражаться формулами $m = k^2$ или $m = 3k^2$. В этих случаях центры шестиугольных доменов всех разбиений ложатся на плоскость в виде “правильных” структур (соседние центры лежат в вершинах равносторонних треугольников).

Рассмотрим более подробно механизм восстановления изображений. Декодирование начинается с разделения теневой картины на области, соответствующие проекции элементов маски на плоскость детектора с центром проекции, расположенным на расстоянии, которое соответствует возможному положению источников, и суммирования сигнала в этих областях. Полный сигнал из этих областей подается на вход процедуры расшифровки. При декодировании необходим учет неоднородности чувствительности детектора. Поэтому перед получением изображений радиоактивных объектов должны быть выполнены калибровка чувствительности детектора по площади и определение

взаимного расположения кодирующей маски и детектора. Для этого получают так называемые единичный и центральный кадры, которые используются для нахождения карты разделения детектора на отдельные элементы, соответствующие элементам маски.

В процедуре декодирования сначала определяется полный сигнал во всех областях карты разделения. Эта процедура повторяется q раз: первый раз – для несмещенной

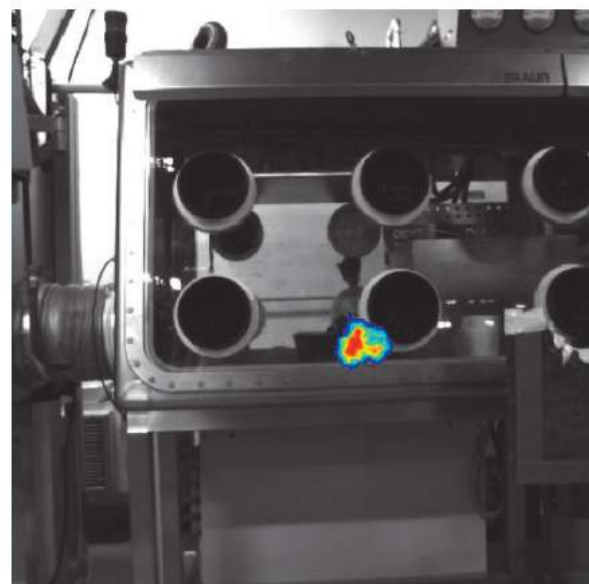
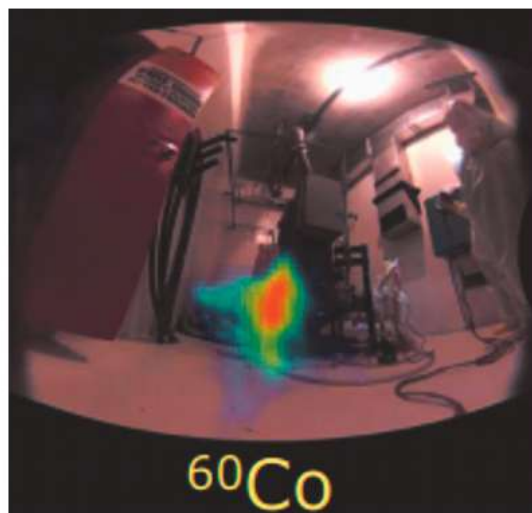


Рис.15. Пример изображения, полученного камерой *iPix*.



Рис.16. Камера Polaris H420 (слева) и пример изображения с нее (справа).



ный на операции свертки. После того как накопление закончено, могут быть применены продвинутые алгоритмы декодирования восстановления, позволяющие лучше устранить шум в восстановленном изображении.

карты разделения, затем $(q - 1)$ раз – для смещенной. Таким образом, вместо начальной теневой картины получается набор qL чисел (здесь $L = 3R(R+1)+1$ – количество элементов в базовом узоре маски ранга R). Полученный набор чисел содержит необходимую информацию для реконструкции γ -изображения. Метод декодирования изображения с использованием смещения карты разделения улучшает угловое разрешение устройства без потери чувствительности.

Для получения γ -изображений, которые представляются на дисплее в течение времени накопления теневой картины, используется быстрый алгоритм восстановления, основан-

Примером камеры, использующей кодирующие маски, является камера iPix фирмы Mirion (рис.14) [19].

В этой камере используется детектор на основе кристалла CdTe на чипе TimePix (модификация чипа Medipix) с КМОП-матрицей из 256×256 элементов. Энергетический диапазон регистрируемого излучения составляет 30–1332 кэВ. Дополнительный спектрометрический тракт позволяет регистрировать и идентифицировать нуклиды с энергией фотонов до 3 МэВ. Набор кодирующих масок позволяет проводить работы в разных условиях внешнего облучения. Поле зрения камеры составляет 45° с угловым разрешением $2,5^\circ$.

Табл.1. Сравнение характеристик камер iPix и Polaris H420.

Характеристика	iPix	H420
Масса, кг	2,5	3,8
Тип детектора	CdTe	CZT
Диапазон регистрируемого излучения	30–1332 кэВ (визуализация) 30–3000 кэВ (спектрометрия)	50–450 кэВ (визуализация методом КА) 250–3000 кэВ (визуализация методом комптоновской камеры) 50–3000 кэВ (спектрометрия)
Ранг кодирующей маски	7 или 13	19
Поле зрения, °	41,4–48,8 (в зависимости от маски)	86
Угловое разрешение, °	2,5–6 (в зависимости от маски)	5
Предельная мощность дозы гамма-излучения, мЗв/ч	до 10000 (в зависимости от маски)	5

На рис.15 приведен пример изображения, полученного камерой iPix. Стоит также упомянуть гамма-камеру Polaris H420 фирмы НЗД (рис.16) [20].

Сравнение характеристик камер iPix и H420 приведено в табл.1.

Камеры с кодирующей апертурой имеют следующие недостатки:

- невысокая эффективность регистрации излучения даже при энергиях 0,5 МэВ;

- пропускание излучения закрытыми частями маски при тех же энергиях;
- невысокое отношение сигнал/шум.

Дополнительные сложности возникают при программной реализации алгоритмов восстановления исходного изображения и при изготовлении самих кодирующих масок. О типах гамма-камер, позволяющих устранить указанные недостатки, речь пойдет в следующей части данной статьи.

Литература

1. Z. He, S.V. Guru, D.K. Wehe, G.F. Knoll, A. Truman, D. Ramsden, «Portable wide-angle γ -ray vision system», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 42, no. 4, pp. 668-674, 1995.
2. O. Gal, C. Izac, F. Jean, F. Laine, C. Leveque, A. Nguyen, «CARTOGAM – a portable gamma camera for remote localization of radioactive sources in nuclear facilities», *Nucl. Instrum. Meth.*, vol. A 460, pp. 138-145, 1999.
3. S.V. Guru, Z. He, D.K. Wehe and G.F. Knoll, «A portable gamma camera for radiation monitoring», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 42, no. 4, pp. 940-945, 1995.
4. Волков В.Г., Волкович А.Г., Ликсонов В.И. и др. Прибор для поиска и идентификации источников γ -излучения и получения γ -изображения (гаммавизор) // Атомная энергия. 1991. т. 71, вып.6. С. 578-580.
5. A.N. Sudarkin, O.P. Ivanov, V.E. Stepanov, A.G. Volkovich, A.S. Turin, A.S. Danilovich, D.D. Rybakov and L.I. Urutskoev, «High Energy Radiation Visualizer (HERV): A New System for Imaging in X-Ray and Gamma-Ray Emission Regions», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, no. 4, pp. 2427-2433, 1996.
6. URL: <https://www.antech-inc.com/wp-content/uploads/G3050-data-sheet-1.7.pdf> (дата обращения: 15.02.2020).
7. G.K. Skinner, «Imaging with coded-aperture masks. Nucl. Instrum.», *Methods Phys. Res.*, A, vol. 221, pp. 33-40, 1984.
8. Федоров Г.А. Интегрально-кодовые системы регистрации ионизирующих излучений // АНРИ. 2008. N 1(52). С. 32-47.
9. R. Accorsi, F. Gasparini, R.C. Lanza, «Optimal coded aperture patterns for improved SNR in nuclear medicine imaging», *NIM*, A, vol. 474, pp. 273-284, 2001.
10. E.E. Fenimore and T.M. Cannon, «Uniformly redundant arrays: digital reconstruction methods», *Appl. Opt.*, N 20, pp. 1858-1864, 1981.
11. Medipix2 [on line]: <http://medipix.web.cern.ch/medipix/pages/medipix2/medipix2.php> (дата обращения: 17.01.2020).
12. X-ray Imaging Europe GmbH [on line] <http://www.xi-europe.de/> (дата обращения: 16.11.2019).
13. O.P. Ivanov, V.N. Potapov, C. Schmidt, et. al., *Development of new version of RayMoS gamma-camera with coded mask*. Abstract Book of IEEE NSS/MIC: Dresden, Germany, 19-25 October 2008, p. 37.
14. O. Gal, M. Gmar, O. Ivanov et. al., «Development of a portable gamma camera with coded aperture», *Nucl. Instr. and Meth.*, A, vol. 563, pp. 233-237, 2006.
15. Волкович А.Г., Иванов О.П., Степанов В.Е. и др. Применение гаммавизора для обследования реакторов // Атомная энергия. Ноябрь 1995. Т. 79, вып. 5. С. 367-370.

16. P.T. Durrant, M. Dallimore, I.D. Jupp and D. Ramsden, «The application of pinhole and coded aperture imaging in the nuclear environment», *Nucl. Instrum. Meth.*, A, vol. 422, pp. 667-671, 1999.
17. А.Г. Волкович, А.С. Данилович, О.П. Иванов и др. Гаммавизор – автоматизированная система для получения изображений радиоактивных объектов // ПТЭ. 1996. N 3. С. 131-135.
18. R. Accorsi et al., «Optimal coded aperture patterns for improved SNR», *NIM*, A, N 474, pp. 273-284, 2001.
19. Система iPIX [on line]. URL: <https://www.mirion.com/products/ipix-ultra-portable-gamma-ray-imaging-system> (дата обращения: 18.03.2020).
20. Polaris-H: Gamma-ray camera [on line]. URL: <http://www.h3dgamma.com/applications.html> (дата обращения: 18.03.2020).
21. О.П. Ivanov, V.E. Stepanov, A.N. Sudarkin, and L.I. Urutskoev. Different methods of image reconstruction for portable X-Ray and gamma-ray imager with coded aperture. – In Proc. of IEEE Nucl. Science Symp. 1997, November 9-15. Albuquerque, New Mexico. Vol. 2, pp. 1586-1590.
22. A.N. Sudarkin, O.P. Ivanov, V.E. Stepanov and L.I. Urutskoev, «Portable gamma ray imager and its application for the inspection of the near-reactor premises contaminated by radioactive substances», *Nucl. Instrum. Meth.*, vol. A 414, pp. 418-426, 1998.
23. О.П. Ivanov, V.E. Stepanov, V.G. Volkov et al. New Portable Gamma-Camera for Nuclear Environment and its Application at Rehabilitation Works, Book of abstracts IEEE NSS-MIC Conference. Rome, Italy, 16-23 October, p. 89, 2004.
24. О.П. Ivanov, A.N. Sudarkin, V.E. Stepanov and L.I. Urutskoev, «Portable Digital X-Ray and Gamma-Ray Imaging with Coded Mask - Performance Characteristics and Methods of Image Reconstruction», *Nucl. Instrum. Meth.*, A, vol. 422, pp. 729-734, 1999.
25. O. Gal, B. Dessus, F. Jean, F. Laine, C. Leveque, «Operation of the CARTOGAM portable gamma camera in a photon-counting mode», *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 48, no. 4, pp. 1198-1204, Aug. 2001.

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

Teverovskiy Yury (Scientific Production Company "Doza", Moscow, Russia)

Abstract. The article gives review of gamma-ray visualization methods. Design, technical characteristics and operation principles of different cameras are discussed. Examples of gamma-images are given; applications and tasks to be solved are reviewed.

Key words: *gamma-ray visualization, gamma image, pinhole collimator, coded aperture.*

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

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