

## Современные возможности кардиовизуализации с использованием гамма-камер, оснащенных CZT-детекторами

### Для корреспонденции:

Станислав Михайлович Минин,  
[s\\_minin@meshalkin.ru](mailto:s_minin@meshalkin.ru)

Поступила в редакцию 1 апреля 2020 г.

Исправлена 22 апреля 2020 г.

Принята к печати 30 апреля 2020 г.

### Цитировать:

Минин С.М., Завадовский К.В., Никитин Н.А., Мочула А.В., Романов А.Б. Современные возможности кардиовизуализации с использованием гамма-камер, оснащенных CZT-детекторами. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2020;24(3):11-22.  
<http://dx.doi.org/10.21688/1681-3472-2020-3-11-22>

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 17-75-20118).

### Вклад авторов

Концепция и дизайн: С.М. Минин, К.В. Завадовский, А.Б. Романов

Написание статьи: С.М. Минин, К.В. Завадовский, Н.А. Никитин, А.В. Мочула, А.Б. Романов

Исправление статьи: С.М. Минин, К.В. Завадовский

Утверждение окончательной версии: все авторы

### ORCID ID

С.М. Минин, <https://orcid.org/0000-0001-6626-6408>

К.В. Завадовский, <https://orcid.org/0000-0002-1513-8614>

Н.А. Никитин, <https://orcid.org/0000-0001-5643-9109>

А.В. Мочула, <http://orcid.org/0000-0003-0883-466X>

А.Б. Романов, <https://orcid.org/0000-0002-6958-6690>

© С.М. Минин, К.В. Завадовский, Н.А. Никитин,

А.В. Мочула, А.Б. Романов, 2020

Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

**С.М. Минин<sup>1</sup>, К.В. Завадовский<sup>2</sup>, Н.А. Никитин<sup>1</sup>,  
А.В. Мочула<sup>2</sup>, А.Б. Романов<sup>1</sup>**

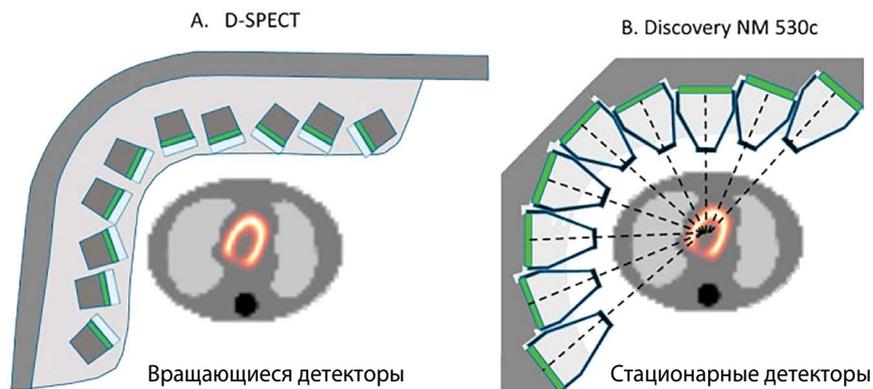
<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт кардиологии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук», Томск, Российская Федерация

Сцинтиграфия миокарда — один из ведущих неинвазивных визуализирующих тестов, широко используемых у больных с подозрением на ишемическую болезнь сердца или установленным диагнозом, а также другой кардиальной патологией. Техническое усовершенствование гамма-томографических установок позволило повысить диагностические возможности данной методики. Все большую актуальность приобретает использование гамма-камер с детекторами на основе кадмий-цинк-теллурида (CZT). В мировой практике накапливаются данные, свидетельствующие о превосходстве новой CZT-технологии по сравнению с существующими моделями сканеров. В связи с разработкой новых CZT-детекторов и конфигурации их расположения появилась возможность выполнять съемку области миокарда с более высокими значениями чувствительности сканирования и пространственного разрешения. Кроме того, за счет значительно более высокой чувствительности новых CZT-детекторов и способов обработки данных в практику начали активно внедрять новые протоколы сканирования, а также методики радионуклидной оценки миокардиального кровотока, резерва и неинвазивной визуализации особенностей функционирования автономной нервной системы. Целью данного обзора является представление данных об основных технических характеристиках гамма-камер, оснащенных CZT-детекторами, и применении CZT-гамма-камер в алгоритме обследования больных различной сердечно-сосудистой патологией.

**Ключевые слова:** динамическая однофотонная эмиссионная компьютерная томография; гамма-камера; кадмий-цинк-теллурид; метайодбензилгуанидин; миокардиальный кровоток; нарушение ритма; резерв коронарного кровотока; сцинтиграфия

**Рис. 1.** Конфигурация расположения CZT-детекторов в гамма-камерах D-SPECT (А) и GE Discovery NM 530с (В) [54]



### Актуальность

В последнее десятилетие одной из приоритетных задач программ в области здравоохранения является борьба с сердечно-сосудистыми заболеваниями как одной из главных причин утраты трудоспособности населения, приводящей к росту смертности и инвалидизации. При сохранении высоких показателей смертности от сердечно-сосудистой патологии в РФ особенности ранней диагностики стоят в приоритете деятельности как специализированных сердечно-сосудистых центров, так и первичного звена здравоохранения.

Несмотря на успехи в повышении качества диагностики сердечно-сосудистых заболеваний смертность от осложнений ишемической болезни сердца остается достаточно высокой, и обусловлено это, прежде всего, поздней диагностикой и неоказанием своевременной специализированной медицинской помощи.

Внедрение новых прорывных технологий в здравоохранении привело к принципиально новым подходам в аспекте ранней диагностики ишемической болезни сердца.

В последние годы отмечается интенсивный прогресс методов молекулярной кардиовизуализации [1]. Известно, что методы ядерной медицины за счет функциональности позволяют обнаружить патофизиологические изменения в организме раньше наступления структурно-органической перестройки и клинического проявления заболевания. Немаловажную роль играют как используемые радиофармацевтические препараты (РФП), так и технологии цифровой обработки данных, новые программные комплексы и типы оборудования,

позволяющие с более высоким пространственным разрешением получать необходимую диагностическую информацию [2].

В мировой радиологической практике все большую значимость приобретают гамма-томографические установки с использованием твердотельных детекторов на основе цинк-кадмий-теллура (CZT). По сравнению с моделями сканеров, использующими детекторы на основе йодида натрия (NaI), новые CZT-камеры позволяют, наряду с увеличением чувствительности регистрации гамма-излучения, повысить разрешение и качество изображений, а также снизить количество артефактов и получаемой пациентом лучевой нагрузки [3–5].

На мировом рынке существуют две кардиологические гамма-камеры, в которых используются CZT-технологии. Первой серийной CZT-системой была камера D-SPECT (Spectrum Dynamics, Кесария, Израиль), вслед за которой внедрена CZT-камера NM 530с (GE Healthcare, Хайфа, Израиль). Обе гамма-камеры имеют С-образное расположение детекторов, которое содержит несколько рядов CZT-элементов (рис. 1). Количество детекторов в представленных системах различно. Камера GE Discovery NM 530с имеет 19 стационарных CZT-детекторов, оснащенных коллиматорами с точечными отверстиями, расположенных в 3 ряда и ориентированных перпендикулярно длинной оси пациента. Камера D-SPECT, в свою очередь, имеет 9 CZT-детекторов, каждый из которых оснащен вольфрамовым коллиматором с параллельными квадратными отверстиями, при этом каждый детектор может двигаться вокруг своей оси на определенный угол. Основные технические характеристики CZT-гамма-камер представлены в *таблице*.

Основные технические характеристики гамма-камер с CZT-детекторами

| Характеристика                                   | Устройство                                    |                  |
|--|---|------------------|
|  | D-SPECT                                       | NM 530c          |
| Общая площадь CZT-детекторов, см <sup>2</sup>    | 576   | 1216             |
| Конфигурация детекторов                          | 9, вращающиеся                                | 19, стационарные |
| Тип коллиматора                                  | широкоугольный параллельный, locally focusing | multipinhole     |
| Размер отверстия коллиматора, мм                 | 2,26 × 2,26                                   | 5                |
| Реконструируемое пространственное разрешение, мм | 3,9   | 5,2              |
| Максимальная скорость счета в секунду, Мк/с      | 1,4   | 0,4              |
| Энергетическое разрешение (для Tc-99m) [9; 10]   | 5,3   | 5,4              |
| Поле зрения                                      | <40 × 35 × 16                                 | <19, сферическое |
| Типичное время сканирования, мин                 | 2–4   | 2–4              |

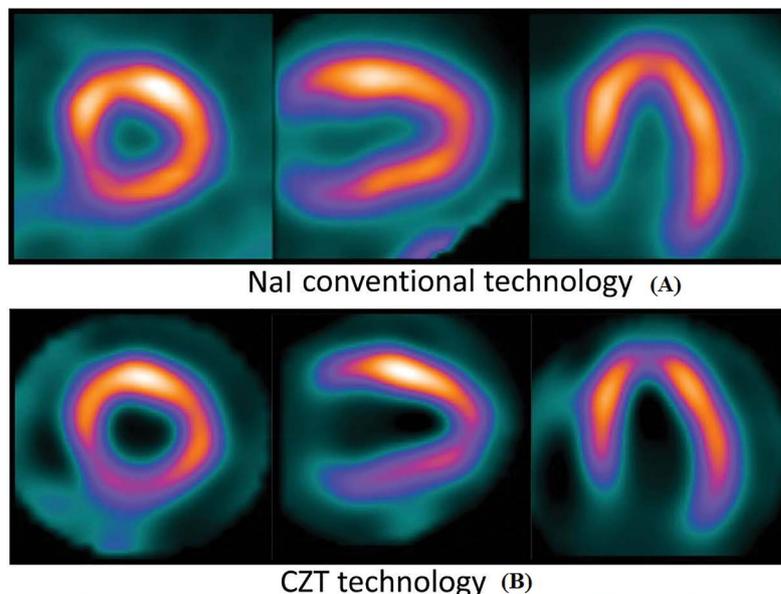
Применение цифровых детекторов и новых конструкций коллиматоров, например multipinhole and locally focusing, сконфигурированных специально для визуализации сердца, привело к развитию таких новых направлений в радионуклидной кардиовизуализации, как низкодозный протокол сканирования, режим полипозиционной сцинтиграфии миокарда, динамическая однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) сердца с оценкой миокардиального кровотока

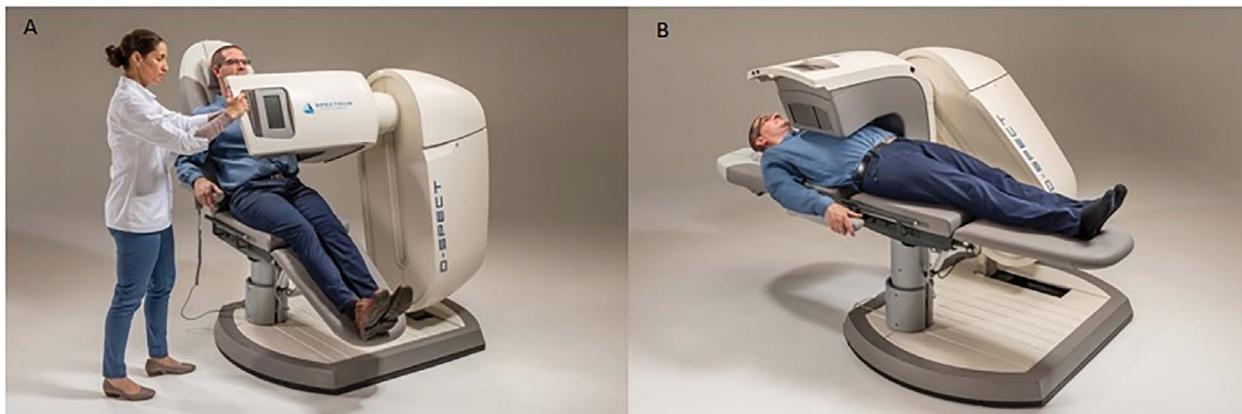
и определением миокардиального резерва, а также одновременное двухизотопное сканирование сердца и визуализация предсердных ганглионарных сплетений.

**1. Использование низкодозных протоколов**

За счет новых технологий современные CZT-гамма-камеры имеют большую чувствительность регистрации гамма-излучения по сравнению с обычны-

**Рис. 2.** Сцинтиграфические изображения миокарда левого желудочка по длинной и короткой осям: на гамма-камере со стандартными (NaI) детекторами через 15 мин после введения 925 МБк <sup>99m</sup>Tc-МИБИ (А) и CZT-камере GE Discovery NM 530c через 3 мин после введения 185 МБк <sup>99m</sup>Tc-МИБИ (В) [54]





**Рис 3.** Положение пациента при проведении полипозиционной сцинтиграфии сердца на CZT-гамма-камере D-SPECT: полувертикальное (А), горизонтальное (В) [рисунок представлен с разрешения компании Spectrum Dynamics]

ми гамма-установками [6]. Это достигается, с одной стороны, строением блока регистрации, который максимально близко расположен к исследуемому органу, а с другой стороны, новым алгоритмом обработки изображений — итеративной реконструкцией с функцией анализа изображений в режиме списка (англ. listmode). Результатом является оптимальное изображение по соотношению контраст/шум при введении низких доз радиофармацевтического препарата (рис. 2).

Впервые при детальном анализе фантомных изображений и сцинтиграмм миокарда у лиц без сердечно-сосудистой патологии L. Imbert с соавт. показали однозначное преимущество получаемых сканограмм миокарда на CZT-гамма-камере по сравнению со стандартной установкой [6]. Хотя первоначально основное внимание уделяли сокращению времени сканирования, использование CZT-технологии позволило разработать протоколы съемки с низкими дозами вводимого РФП и низким уровнем лучевой нагрузки. R. Nakazato с соавт. впервые смоделировали различные уровни вводимой активности у 79 пациентов при исследовании на гамма-камере, оснащенной CZT-детекторами [7]. Анализ полученных изображений показал, что при моделировании вводимой активности, соответствующей эффективной дозе облучения менее 1 мЗв, не наблюдалось достоверной разницы в качественных и количественных параметрах, получаемых перфузионных сцинтиграмм.

W.L. Duvall с соавт. установили, что при вводимой дозе  $^{99m}\text{Tc}$ -метоксибутилизонтрила ( $^{99m}\text{Tc}$ -МИБИ) на стресс-тесте в 15 мКи и в покое — 5 мКи, средняя лучевая нагрузка не превышала 5,8 мЗв [4]. Аналогичные данные получили J. Oddstig с соавт., при этом используемый низкодозный протокол дал возможность уменьшить лучевую нагрузку с 9,3 до 5,8 мЗв за счет снижения вводимой активности с 4,0 до 2,5 МБк на килограмм массы тела при сохранении сопоставимого качества изображения [7]. В дальнейшем было проведено большое количество исследований, в которых показали, что использование низкодозного протокола на CZT-камерах дает возможность не только получить качественные изображения перфузии миокарда левого желудочка (ЛЖ), но и сократить время исследования, а также значительно снизить лучевую нагрузку на пациента [9–16].

## **2. Коррекция аттенюации и полипозиционное сканирование**

Одним из современных подходов к получению максимально полной информации об анатомо-функциональном состоянии миокарда ЛЖ являются совмещенные с компьютерным томографом ОФЭКТ-изображения. На рынке аппараты нового поколения могут быть доступны в гибридной конфигурации с 64-срезовыми КТ-сканерами (GE Discovery NM/CT 570c), что позволяет делать

коррекцию аттенуации при проведении скинтиграфии миокарда, а также оценивать наличие бляшек в стенке коронарных артерий.

Однако в силу экономических причин все большее распространение получают кардиологические камеры без совмещенных компьютерных томографов, что не позволяет в полной мере проводить коррекцию аттенуации. В то же время при использовании низкодозовых протоколов на CZT-камерах есть большая вероятность недостаточно качественного изображения, особенно у пациентов с избыточной массой тела. Для решения этой проблемы разработаны новые подходы в записи скинтиграфических исследований в зависимости от типа сканера. Данные протоколы включают ряд последовательных сканов при различных положениях пациента на томографическом столе (рис. 3) — горизонтальном и вертикальном (*supine/upright*), а также на спине и животе (*supine/prone*). Такие подходы помогают более точно разграничивать истинные дефекты перфузии от артефактов без использования аппаратной коррекции ослабления излучения [7; 17; 18].

Так, в исследовании R. Nakazato с соавт., проведенном с использованием гамма-камеры D-SPECT, установлено, что последовательное сканирование пациента в горизонтальном и вертикальном положениях позволяет уменьшить количество ложноположительных результатов [7]. Аналогичные данные получены и в работе Y. Nishiyama, выполненной на CZT-камере GE NM 530c [19]. Комбинированный подход оценки перфузии в положении на спине и животе имел достоверно более высокие показатели диагностической точности по сравнению с отдельным анализом данных в положении на спине или животе.

Как известно, фактором, снижающим качество скинтиграфических изображений, являются артефакты от движения сердца. Оценка перфузии миокарда на конечно-диастолических кадрах не осуществима на гамма-камерах с классическими детекторами в связи с недостаточным набором импульсов на каждом из кадров сердечного цикла. Высокая чувствительность и скорость счета CZT-детекторов позволяют за 5–10 мин сформировать серию кадров с плотностью скинтилляционного счета в каждом из них, достаточной для получения качественного диагностического изображения [24]. Таким образом, томосцинтиграм-

мы, реконструированные по конечно-диастолическому кадру, лишены артефактов от движения стенок сердца. Это позволяет более четко визуализировать стенки миокарда ЛЖ, что, в свою очередь, способствует более точной оценке дефекта перфузии [24].

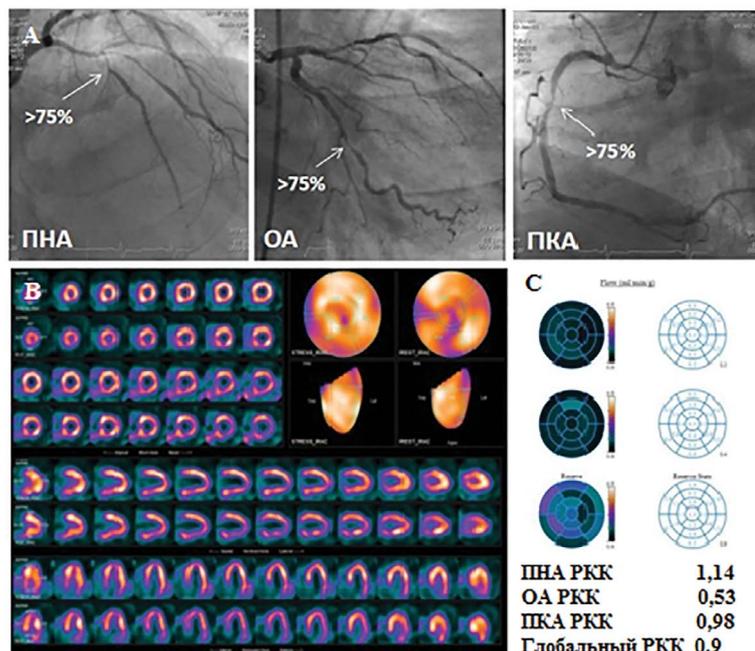
### 3. Двухизотопное сканирование сердца

Еще одним направлением современной кардиовизуализации при использовании CZT-технологий является одновременная регистрация изображений миокарда с изотопами, обладающими разной энергией гамма-квантов. Ключевым фактором при проведении двухизотопного сканирования сердца является высокая чувствительность CZT-детекторов, а также строение гантри-камеры, которое исключает проекционные наложения, что могло бы затруднить получение качественного изображения [21].

Известно, что изотоп <sup>201</sup>Таллий (<sup>201</sup>Tl), по сравнению с комплексами технеция-99м (<sup>99m</sup>Tc), за счет ускоренного клиренса из крови и высокой экстракции при первом прохождении имеет более высокий контраст между областями с нормальной перфузией и зонами сниженного кровоснабжения. С другой стороны, РФП на основе <sup>99m</sup>Tc за счет оптимального спектра излучения и короткого периода полураспада позволяет сократить время сбора данных, что привело к использованию двухизотопного сканирования сердца с препаратами <sup>99m</sup>Tc и <sup>201</sup>Tl по протоколу покой – нагрузка.

Первое исследование с применением данного протокола выполнили D.S. Verma с соавт. у 374 пациентов, которым вводили 2,0–2,5 мКи (74,0–92,5 МБк) <sup>201</sup>Tl на фоне стресс-нагрузки и 8–10 мКи (296–370 МБк) <sup>99m</sup>Tc-МИБИ в покое [20]. Весь протокол двухизотопного сканирования осуществили менее чем за 30 мин, а результаты показали отличное качество изображений. При этом за счет использования CZT-технологий лучевая нагрузка составила 11,9 мЗв, что немногим больше стандартного протокола сканирования с <sup>99m</sup>Tc-МИБИ (нагрузка – покой) — 11,2 мЗв соответственно. Высокие диагностические показатели двухизотопного сканирования сердца также продемонстрированы в исследовании G. Baron-Rochette с соавт., которые использовали тот же последовательный протокол в группе из 214 па-

**Рис. 4.** Клинический пример оценки миокардиального кровотока и коронарного резерва по данным динамической сцинтиграфии миокарда. Мужчина, 69 лет; хроническая сердечная недостаточность III класс по классификации Нью-Йоркской ассоциации кардиологов (англ. New York Heart Association, NYHA), дислипидемия, сахарный диабет II типа. По данным коронарной ангиографии, обструктивное поражение передней нисходящей, огибающей, правой коронарных артерий (А). По данным стандартной сцинтиграфии миокарда с  $^{99m}\text{Tc}$ -МИБИ, достоверных дефектах перфузии не выявлено, феномен «сбалансированной ишемии» (В). По результатам динамической CZT-однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, снижение глобального и регионарных значений резерва коронарного кровотока (С)



циентов [22]. Протокол сканирования выполнен за 22 мин при достаточно высоком качестве изображений. Вводимые дозы были скорректированы с учетом веса пациента: 2–3 МКи (74–111 МБк)  $^{201}\text{Tl}$  и 8,1–12,16 МКи (300–450 МБк)  $^{99m}\text{Tc}$ -МИБИ, при этом средняя доза облучения составила  $12,0 \pm 0,9$  мЗв. В сравнении с инвазивной коронарной ангиографией чувствительность данного протокола в диагностике ишемической болезни сердца составила 94 % при диагностической точности 83%.

Еще одним подходом двухизотопного сканирования сердца на CZT-камерах может быть сцинтиграфия сердца с  $^{123}\text{I}$ од-метайодбензилгуанидином ( $^{123}\text{I}$ -МИБГ). D. Bellevre с соавт. впервые выполнили одновременную двухиндикаторную сцинтиграфию сердца с  $^{123}\text{I}$ -МИБГ ( $6,38 \pm 1,07$  МКи [ $236,4 \pm 39,7$  МБк]) и  $^{99m}\text{Tc}$ -тетрафосмином ( $20,35 \pm 3,59$  МКи [ $753 \pm 133$  МБк]) у 44 пациентов с кардиомиопатией и застойной сердечной недостаточностью [23]. Результаты исследования показали высокую корреляцию данных на CZT-камере в сравнении с обычной гамма-камерой. В связи с растущим интересом к изучению роли симпатической дисфункции сердца у пациентов с сердечной недостаточностью и больных различными видами нарушений ритма сердца подобные протоколы могут использоваться в клинической

практике в будущем.

#### 4. Оценка миокардиального кровотока и коронарного резерва

Актуальным направлением CZT-технологии в ядерной кардиологии является количественный анализ сцинтиграфических данных с оценкой коронарного кровотока и резерва в абсолютных значениях (рис. 4). Высокая диагностическая информативность этих показателей, полученных при помощи позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), в оценке ишемических изменений миокарда ЛЖ продемонстрирована в работе S.A. Kajander с соавт. [26]. Чувствительность, специфичность и диагностическая точность количественной оценки данных ПЭТ в выявлении обструктивного поражения коронарных артерий у пациентов с многосудистой формой ишемической болезни сердца составили 96, 94 и 94 % соответственно, в то время как при визуальном анализе эти параметры были значимо ниже — 38, 68 и 61 % соответственно. Однако для ОФЭКТ полноценная количественная оценка результатов исследования не представлялась возможной до появления технологии CZT. Кардиоспециализированные гамма-камеры этого типа позволяют получать томографические дан-

ные о динамике первого прохождения болюса РФП и с помощью заимствованных из ПЭТ математических алгоритмов обработки определять показатели коронарного кровотока и резерва [27; 28].

Одной из первых работ в этом направлении было исследование R.G. Wells с соавт. [29]. В эксперименте на крупных животных выявлена сильная корреляция между результатами ОФЭКТ с тремя наиболее распространенными кардиологическими индикаторами ( $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{99\text{mTc}}$ -тетрафосином,  $^{99\text{mTc}}$ -МИБИ) и сцинтиграфией сердца с макроагрегатами альбумина человеческой сыворотки крови — 0,81, 0,82, 0,8 соответственно. Связь коронарного кровотока и резерва, определенных при помощи динамической ОФЭКТ, с результатами инвазивной коронарной ангиографии продемонстрирована в исследованиях S. Ben-Haim и B. Bouallègue с соавт. [27; 31]. В этих работах обнаружена зависимость показателей коронарного кровотока и коронарного резерва от степени сужения артерии ( $p < 0,001$ ), а также ступенчатый характер снижения этих показателей по мере возрастания стеноза коронарных артерий.

В ряде исследований проведена валидизация динамической ОФЭКТ относительно «золотого» стандарта оценки гемодинамической значимости стенозов коронарных артерий — показателя фракционного резерва кровотока [31–34]. Авторы выявили сильную корреляцию между методами, однако показатели чувствительности и специфичности сцинтиграфического подхода в оценке гемодинамической значимости стенозов коронарных артерий варьировали: 69,2 и 93,3 % при пограничном значении коронарного резерва  $\leq 1,48$ , по данным K. Zavadovsky с соавт. [33], и 89 и 82% при пороговом значении коронарного резерва  $< 2$ , по результатам B. Bouallègue с соавт. [31]. Сравнительный анализ двух модальностей радионуклидной диагностики — ПЭТ и динамической ОФЭКТ — проведен в работах R. Giubbini, R. Nkoulou [36; 37]. В исследованиях продемонстрировали согласованность результатов этих методов, несмотря на некоторую недооценку стресс-индуцированного коронарного кровотока со стороны сцинтиграфического подхода.

Описанные выше результаты в значительной степени согласуются с данными многоцентрового клинического исследования WATERDAY, в котором проведен сравнительный анализ результатов

динамической ОФЭКТ, фракционного резерва кровотока и ПЭТ с 150, подтвердивший сильную взаимосвязь между исследуемыми методами [38]. При этом чувствительность и специфичность сцинтиграфического показателя резерва коронарного кровотока в оценке ишемических изменений миокарда составили 83,3 и 95,8 %, а в определении гемодинамической значимости сужения коронарной артерии — 58,3 и 84,6 % соответственно.

### **5. Применение CZT-гамма-камер для оценки симпатической иннервации сердца**

Методики радионуклидного исследования с  $^{123}\text{I}$ -МИБГ достаточно широко используются для оценки симпатической иннервации сердца при различных заболеваниях [39]. В частности, в ряде клинических исследований показана важная роль изучения особенностей накопления и распределения  $^{123}\text{I}$ -МИБГ в миокарде у пациентов с хронической сердечной недостаточностью для прогнозирования риска нежелательных событий и желудочковых аритмий, а также у пациентов с фибрилляцией предсердий (ФП) для прогнозирования клинической эффективности интервенционного лечения [40–42].

Разработка и внедрение в клиническую практику специализированных кардиологических гамма-камер с CZT-детекторами позволило значительно улучшить пространственное разрешение томографических изображений [43]. При этом стало возможным предполагать, что получаемые изображения позволят идентифицировать структуры размером 5–10 мм. К таким структурам относятся компоненты автономной нервной системы сердца, а именно ганглионарные сплетения левого предсердия, участвующие в инициации и поддержании ФП, а также являющиеся потенциальным объектом аблации при интервенционном лечении данной аритмии [[44; 45]. Впервые возможность визуализации очагов симпатической активности (ОСА) в участках, типичных для локализации ганглионарных сплетений левого предсердия, у пациента с пароксизмальной ФП показана в работе A. Romanov с соавт. [46]. Анатомическую локализацию ОСА удалось определить, во многом используя технологию совмещения КТ-изображений сердца и данных  $^{123}\text{I}$ -МИБГ ОФЭКТ, полученных на гамма-камере с CZT-детекторами. J. Stirrup с соавт. продемонстри-

ровали высокую точность и воспроизводимость данной технологии перед радиочастотной аблацией у больных ФП, при этом в качестве верификации сцинтиграфических данных использовали электрофизиологическое исследование [47]. В пилотном клиническом исследовании показано, что аблация ОСА, выявленных с использованием данной технологии, приводит к сохранению синусового ритма у большинства пациентов с пароксизмальной ФП в периоде наблюдения 6 мес. после интервенционного лечения. При этом радиочастотное воздействие на ганглионарные сплетения левого предсердия у пациентов с ФП приводило к уменьшению количества ОСА, визуализируемых при сцинтиграфии с  $^{123}\text{I}$ -МИБГ [48; 49]. Одновременно с этим установлено, что данная технология позволяет оценивать области ОСА, соответствующие типичной локализации ганглионарных сплетений левого предсердия у лиц без сердечно-сосудистой патологии, а в дальнейшем, возможно, найти отличительные характеристики ОСА, являющихся основной причиной развития и поддержания фибрилляции предсердий.

В ряде исследований показано, что благодаря специализированным кардиологическим гамма-камерам с CZT-детекторами можно проводить комплексную оценку регионарной перфузии и симпатической иннервации миокарда ЛЖ со значительным снижением лучевой нагрузки и улучшением пространственного разрешения [50–52]. Используя данные преимущества, A. Gimelli с соавт. установили, что сегменты миокарда ЛЖ, демонстрирующие несоответствие перфузии и симпатической иннервации при двухизотопной сцинтиграфии сердца с  $^{123}\text{I}$ -МИБГ и  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -тетрафосмином, чаще содержат источники патологической электрофизиологической активности, являющиеся целью аблации при интервенционном лечении пациентов с желудочковыми нарушениями ритма [53]. Кроме этого, данная группа исследователей установила, что уменьшение количества сегментов миокарда ЛЖ, демонстрирующих несоответствие перфузии и симпатической иннервации, может являться предиктором позитивного клинического эффекта аблации у пациентов с постинфарктной желудочковой тахикардией. По совокупности полученных результатов, исследователи предложили использовать двухизотопный протокол сцинтиграфии сердца  $^{123}\text{I}$ -МИБГ/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -тетрафосмин для

разработки дорожных карт аблации у пациентов с желудочковой тахикардией, что может существенно повлиять на сокращение времени процедуры и, вероятно, повысить эффективность интервенционного лечения [53].

Несмотря на представленные преимущества новых CZT-детекторов и подходов в оценке миокардиальной перфузии и симпатической активности сердца у данной технологии существует ряд недостатков. К наиболее важным можно отнести отсутствие возможности проведения компьютерной томографии с аттенуацией, что снижает диагностическую ценность изображений, полученных на CZT-камерах. Кроме того, камеры с CZT-детекторами имеют небольшую площадь сканирования области сердца, что создает трудности при оценке изображений миокарда ЛЖ увеличенного размера, в частности при дилатационной или ишемической кардиомиопатии, а также не позволяют проводить вычисление общепринятых индексов сердце/средостение при сцинтиграфии с  $^{123}\text{I}$ -МИБГ.

## Заключение

Развитие CZT-технологий в последнее десятилетие привело к созданию нового класса аппаратов для радионуклидной кардиовизуализации. Представленные данные о клиническом использовании CZT-камер показали ряд преимуществ перед стандартными установками. За счет значительно более высокой чувствительности новых CZT-детекторов и скорости обработки данных в практику внедрены новые протоколы сканирования со значительным сокращением времени получения качественного изображения и уменьшением лучевой нагрузки на пациента. Кроме того, активно разрабатываются способы радионуклидной оценки миокардиального кровотока, резерва и неинвазивной визуализации особенностей функционирования автономной нервной системы. Все это открывает новые возможности к внедрению персонализированного подхода в диагностике и лечении пациентов с различной сердечно-сосудистой патологией.

Вместе с тем существует ряд ограничений, лимитирующих более широкое использование сцинтиграфии сердца на CZT-гамма-камерах в клинической практике. В первую очередь это относится к отсутствию унифицированных протоколов скани-

рования. На наш взгляд, дальнейшие исследования и усилия профессиональных сообществ должны быть направлены именно на решение данного вопроса, что позволит снизить межцентровую вариабельность результатов исследований и повысить клиническую значимость диагностических заключений. В отношении визуализации ганглионарных сплетений левого предсердия практически отсутствуют сведения о количестве симпатических ганглиев, которое должно быть подвергнуто аблации для устранения ФП, и долгосрочном прогнозе данной группы пациентов. Также не установлена прогностическая значимость показателей миокардиального кровотока и резерва, полученных на CZT-камерах, в аспекте развития неблагоприятных сердечно-сосудистых событий. Требуется дополнительные исследования для лучшего понимания целесообразности и диагностической ценности двухизотопного сканирования сердца, помимо одного только улучшения внутригоспитальной логистики.

### Список литературы / References

1. Dobrucki L.W., Sinusas A.J. Molecular imaging. A new approach to nuclear cardiology. *Q J Nucl Med Mol Imaging*. 2005;49(1):106-1015.
2. Garcia E.V., Faber T.L. New trends in camera and software technology in nuclear cardiology. *Cardiol Clin*. 2009;27(2):227-236. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2008.12.002>
3. Mouden M., Timmer J.R., Ottervanger J.P., Reiffers S., Oostdijk A.H., Knollemans S., Jager P.L. Impact of a new ultrafast CZT SPECT camera for myocardial perfusion imaging: Fewer equivocal results and lower radiation dose. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2012;39(6):1048-1055. <https://doi.org/10.1007/s00259-012-2086-z>
4. Duvall W.L., Croft L.B., Ginsberg E.S., Einstein A.J., Guma K.A., George T., Henzlava M.J. Reduced isotope dose and imaging time with a high-efficiency CZT SPECT camera. *J Nucl Cardiol*. 2011;18(5):847-857. <https://doi.org/10.1007/s12350-011-9379-7>
5. Songy B., Guernou M., Lussato D., Queneau M., Geronazzo R. Low-dose thallium-201 protocol with a cadmium-zinc-telluride cardiac camera. *Nucl Med Commun*. 2012;33(5):464-469. <https://doi.org/10.1097/MNM.0b013e3283504543>
6. Imbert L., Poussier S., Franken P.R., Songy B., Verger A., Morel O., Wolf D., Noel A., Karcher G., Marie P.Y. Compared performance of high-sensitivity cameras dedicated to myocardial perfusion SPECT: A comprehensive analysis of phantom and human images. *J Nucl Med*. 2012;53(12):1897-1903. <https://doi.org/10.2967/jnumed.112.107417>
7. Nakazato R., Tamarappoo B.K., Kang X., Wolak A., Kite F., Hayes S.W., Thomson L.E., Friedman J.D., Berman D.S., Slomka P.J. Quantitative upright-supine high-speed SPECT myocardial perfusion imaging for detection of coronary artery disease: Correlation with invasive coronary angiography. *J Nucl Med*. 2010;51(11):1724-1731. <https://doi.org/10.2967/jnumed.110.078782>
8. Oddstig J., Hedeer F., Jögi J., Carlsson M., Hindorf C., Engblom H. Reduced administered activity, reduced acquisition time, and preserved image quality for the new CZT camera. *J Nucl Cardiol*. 2013;20(1):38-44. <https://doi.org/10.1007/s12350-012-9634-6>
9. Einstein A.J., Blankstein R., Andrews H., Fish M., Padgett R., Hayes S.W., Friedman J.D., Qureshi M., Rakotoarivelo H., Slomka P., Nakazato R., Bokhari S., Di Carli M., Berman D.S. Comparison of image quality, myocardial perfusion, and left ventricular function between standard imaging and single-injection ultra-low-dose imaging using a high-efficiency SPECT camera: The MILLISIEVERT study. *J Nucl Med*. 2014;55(9):1430-1437. <https://doi.org/10.2967/jnumed.114.138222>
10. Gimelli A., Bottai M., Giorgetti A., Genovesi D., Filidei E., Marzullo P. Evaluation of ischaemia in obese patients: Feasibility and accuracy of a low-dose protocol with a cadmium-zinc telluride camera. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2012;39(8):1254-1261. <https://doi.org/10.1007/s00259-012-2161-5>
11. Gimelli A., Bottai M., Genovesi D., Giorgetti A., Di Martino F., Marzullo P. High diagnostic accuracy of low-dose gated-SPECT with solid-state ultrafast detectors: Preliminary clinical results. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2012;39(1):83-90. <https://doi.org/10.1007/s00259-011-1918-6>
12. Goto K., Takebayashi H., Kihara Y., Yamane H., Hagikura A., Morimoto Y., Kikuta Y., Sato K., Taniguchi M., Hiramatsu S., Haruta S. Impact of combined supine and prone myocardial perfusion imaging using an ultrafast cardiac gamma camera for detection of inferolateral coronary artery disease. *Int J Cardiol*. 2014;174(2):313-317. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2014.04.069>
13. Duvall W.L., Sweeny J.M., Croft L.B., Ginsberg E., Guma K.A., Henzlava M.J. Reduced stress dose with rapid acquisition CZT SPECT MPI in a non-obese clinical population: Comparison to coronary angiography. 2012;19(1):19-27. <https://doi.org/10.1007/s12350-011-9480-y>
14. Einstein A.J., Johnson L.L., DeLuca A.J., Kontak A.C., Groves D.W., Stant J., Pozniakoff T., Cheng B., Rabbani L.E., Bokhari S. Radiation dose and prognosis of ultra-low-dose stress-first myocardial perfusion SPECT in patients with chest pain using a high-efficiency camera. *J Nucl Med*. 2015;56(4):545-551. <https://doi.org/10.2967/jnumed.114.150664>
15. Perrin M., Djaballah W., Moulin F., Claudin M., Veran N., Imbert L., Poussier S., Morel O., Besseau C., Verger A., Boutley H., Karcher G., Marie P.Y. Stress-first protocol for myocardial perfusion SPECT imaging with semiconductor cameras: High diagnostic performances with significant reduction in patient radiation doses. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2015;42(7):1004-1011. <https://doi.org/10.1007/s00259-015-3016-7>
16. Sharir T., Pinskiy M., Pardes A., Rochman A., Prokhorov V., Kovalski G., Merzon K., Bojko A., Brodtkin B. Comparison of the diagnostic accuracies of very low stress-dose with standard-dose myocardial perfusion imaging: Automated quantification of one-day, stress-first SPECT using a CZT camera. *J Nucl Cardiol*. 2016;23(1):11-20. <https://doi.org/10.1007/s12350-015-0130-7>
17. Nakazato R., Slomka P.J., Fish M., Schwartz R.G., Hayes S.W., Thomson L.E., Friedman J.D., Lemley M. Jr., Mackin M.L., Peterson B., Schwartz A.M., Doran J.A.,

- Germano G., Berman D.S. Quantitative high-efficiency cadmium-zinc-telluride SPECT with dedicated parallel-hole collimation system in obese patients: results of a multicenter study. *J Nucl Cardiol.* 2015;22(2):266-275. <https://doi.org/10.1007/s12350-014-9984-3>
18. Duvall W.L., Slomka P.J., Gerlach J.R., Sweeny J.M., Baber U., Croft L.B., Guma K.A., George T., Henzlova M.J. High-efficiency SPECT MPI: comparison of automated quantification, visual interpretation, and coronary angiography. *J Nucl Cardiol.* 2013;20(5):763-773. <https://doi.org/10.1007/s12350-013-9735-x>
  19. Nishiyama Y., Miyagawa M., Kawaguchi N., Nakamura M., Kido T., Kurata A., Kido T., Ogimoto A., Higaki J., Mochizuki T. Combined supine and prone myocardial perfusion single-photon emission computed tomography with a cadmium zinc telluride camera for detection of coronary artery disease. *Circ J.* 2014;78(5):1169-1175. <https://doi.org/10.1253/circj.cj-13-1316>
  20. Berman D.S., Kang X., Tamarappoo B., Wolak A., Hayes S.W., Nakazato R., Thomson L.E., Kite F., Cohen I., Slomka P.J., Einstein A.J., Friedman J.D. Stress thallium-201/rest technetium-99m sequential dual isotope high-speed myocardial perfusion imaging. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2009;2(3):273-282. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2008.12.012>
  21. Kacperski K., Erlandsson K., Ben-Haim S., Hutton B.F. Iterative deconvolution of simultaneous 99mTc and 201Tl projection data measured on a CdZnTe based cardiac SPECT scanner. *Phys Med Biol.* 2011;56(5):1397-1414. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/56/5/012>
  22. Barone-Rochette G., Leclere M., Calizzano A., Vautrin E., Céline G.C., Broisat A., Ghezzi C., Baguet J.P., Machecourt J., Vanzetto G., Fagret D. Stress thallium-201/rest technetium-99m sequential dual-isotope high-speed myocardial perfusion imaging validation versus invasive coronary angiography. *J Nucl Cardiol.* 2015;22(3):513-522. <https://doi.org/10.1007/s12350-014-0016-0>
  23. Bellevre D., Manrique A., Legallois D., Bross S., Baavour R., Roth N., Blaire T., Desmonts C., Bailliez A., Agostini D. First determination of the heart-to-mediastinum ratio using cardiac dual isotope (I-MIBG/Tc-tetrofosmin) CZT imaging in patients with heart failure: The ADRECARD study. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2015;42(12):1912-1919. <https://doi.org/10.1007/s00259-015-3141-3>
  24. Kovalski G., Keidar Z., Frenkel A., Sachs J., Attia S., Azhari H. Dual "motion-frozen heart" combining respiration and contraction compensation in clinical myocardial perfusion SPECT imaging. *J Nucl Cardiol.* 2009;16(3):396-404. <https://doi.org/10.1007/s12350-008-9034-0>
  25. Завадовский К.В., Мишкина А.И., Мочула А.В., Лишманов Ю.Б. Методика устранения артефактов движения сердца при выполнении перфузионной сцинтиграфии миокарда. *REJR.* 2017;7(2):56-64. [Zavadovsky K.V., Mishkina A.I., Mochula A.V., Lishmanov Yu.B. The method for correction of motion artefacts to improve myocardial perfusion imaging. *REJR.* 2017;7(2):56-64. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2017-7-2-56-64>
  26. Kajander S.A., Joutsiniemi E., Saraste M., Pietilä M., Ukkonen H., Saraste A., Sipilä H.T., Teräs M., Mäki M., Airaksinen J., Hartiala J., Knuuti J. Clinical value of absolute quantification of myocardial perfusion with (15)O-water in coronary artery disease. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2011;4(6):678-684. <https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.110.960732>
  27. Ben-Haim S., Murthy V.L., Breault C., Allie R., Sitek A., Roth N., Fantony J., Moore S.C., Park M.A., Kijewski M., Haroon A., Slomka P., Erlandsson K., Baavour R., Zilberstien Y., Bomanji J., Di Carli M.F. Quantification of myocardial perfusion reserve using dynamic SPECT imaging in humans: a feasibility study. *J Nucl Med.* 2013;54(6):873-879. <https://doi.org/10.2967/jnumed.112.109652>
  28. Мочула А.В., Завадовский К.В., Лишманов Ю.Б. Методика определения резерва миокардиального кровотока с использованием нагрузочной динамической однофотонной эмиссионной компьютерной томографии. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины.* 2015;160(12):845-848. [Mochula A.V., Zavadovsky K.V., Lishmanov Y.B. Method for studying the myocardial blood flow reserve by load dynamic single-photon emission computed tomography. *Bulletin of experimental biology and medicine.* 2015;160(12):845-848. (In Russ.)]
  29. Wells R.G., Timmins R., Klein R., Lockwood J., Marvin B., deKemp R.A., Wei L., Ruddy T.D. Dynamic SPECT measurement of absolute myocardial blood flow in a porcine model. *J Nucl Med.* 2014;55(10):1685-1691. <https://doi.org/10.2967/jnumed.114.139782>
  30. Khouri E.M., Gregg D.E., Lowensohn H.S. Flow in the major branches of the left coronary artery during experimental coronary insufficiency in the unanesthetized dog. *Circ Res.* 1968;23(1):99-109. <https://doi.org/10.1161/01.res.23.1.99>
  31. Ben Bouallègue F., Roubille F., Lattuca B., Cung T.T., Macia J.C., Gervasoni R., Leclercq F., Mariano-Goulart D. SPECT myocardial perfusion reserve in patients with multivessel coronary disease: correlation with angiographic findings and invasive fractional flow reserve measurements. *J Nucl Med.* 2015;56(11):1712-1717. <https://doi.org/10.2967/jnumed.114.143164>
  32. Miyagawa M., Nishiyama Y., Uetani T., Ogimoto A., Ikeda S., Ishimura H., Watanabe E., Tashiro R., Tanabe Y., Kido T., Kurata A., Mochizuki T. Estimation of myocardial flow reserve utilizing an ultrafast cardiac SPECT: Comparison with coronary angiography, fractional flow reserve, and the SYNTAX score. *Coronary anatomy. Int J Cardiol.* 2017;244:347-353. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2017.06.012>
  33. Zavadovsky K.V., Mochula A.V., Boshchenko A.A., Vrublevsky A.V., Baev A.E., Krylov A.L., Gulya M.O., Nesterov E.A., Liga R., Gimelli A. Absolute myocardial blood flows derived by dynamic CZT scan vs invasive fractional flow reserve: Correlation and accuracy. *J Nucl Cardiol.* 2019. <https://doi.org/10.1007/s12350-019-01678-z>
  34. Мочула А.В., Завадовский К.В., Андреев С.Л., Лишманов Ю.Б. Динамическая однофотонная эмиссионная компьютерная томография миокарда как метод идентификации многососудистого поражения коронарного русла. *Вестник рентгенологии и радиологии.* 2016;97(5):289-295. [Mochula A.V., Zavadovsky K.V., Andreev S.L., Lishmanov Y.B. Dynamic single-photon emission computed tomography as a method of identification of multivessel coronary artery disease. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine.* 2016;97(5):289-295. (In Russ.)] <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2016-97-5-289-295>
  35. Завадовский К.В., Мочула А.В., Врублевский А.В., Баев А.Е., Мальцева А.Н., Бощенко А.А. Роль нагрузочной динамической однофотонной эмиссионной компьютерной томографии с определением резерва миокардиального кровотока в оценке значимости стенозов коронарных артерий. *Российский кардиологический журнал.* 2019;24(12):40-46. Zavadovsky K.V., Mochula A.V., Vrublevsky A.V., Baev A.E., Maltseva A.N., Boshchenko A.A. Role of stress in dynamic single-photon emission computed tomography with myocardial perfusion reserve determination in assessing the severity of coronary artery stenosis. *Russian Journal of*

- Cardiology*. 2019;24(12):40-46. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2019-12-40-46>
36. Giubbini R., Bertoli M., Durmo R., Bonacina M., Peli A., Faggiano I., Albano D., Milan E., Stern E., Paghera B., Rodella C., Cerudelli E., Gazzilli M., Dondi F., Bertagna F., Camoni L. Comparison between N13NH3-PET and 99mTc-Tetrofosmin-CZT SPECT in the evaluation of absolute myocardial blood flow and flow reserve. *J Nucl Cardiol*. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12350-019-01939-x>
  37. Nkoulou R., Fuchs T.A., Pazhenkottil A.P., Kuest S.M., Ghadri J.R., Stehli J., Fiechter M., Herzog B.A., Gaemperli O., Buechel R.R., Kaufmann P.A. Absolute myocardial blood flow and flow reserve assessed by gated SPECT with cadmium-zinc-telluride detectors using 99mTc-Tetrofosmin: head to head comparison with 13N-Ammonia PET. *J Nucl Med*. 2016;57(12):1887-1892. <https://doi.org/10.2967/jnumed.115.165498>
  38. Agostini D., Roule V., Nganoa C., Roth N., Baavour R., Parienti J.J., Beygui F., Manrique A. First validation of myocardial flow reserve assessed by dynamic 99mTc-sestamibi CZT-SPECT camera: head to head comparison with 15O-water PET and fractional flow reserve in patients with suspected coronary artery disease. The WATERDAY study. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2018;45(7):1079-1090. doi: <https://doi.org/10.1007/s00259-018-3958-7>
  39. Carrió I., Flotats A. Expanding indications for cardiac mIBG imaging of sympathetic activity. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2011;38(2):219-220. <https://doi.org/10.1007/s00259-010-1650-7>
  40. Verschure D.O., Veltman C.E., Manrique A., Somsen G.A., Koutelou M., Katsikis A., Agostini D., Gerson M.C., van Eck-Smit B.L., Scholte A.J., Jacobson A.F., Verberne H.J. For what endpoint does myocardial 123I-mIBG scintigraphy have the greatest prognostic value in patients with chronic heart failure? Results of a pooled individual patient data meta-analysis. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2014;15(9):996-1003. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeu044>
  41. Marshall A., Cheetham A., George R.S., Mason M., Kelion A.D. Cardiac iodine-123 metaiodobenzylguanidine imaging predicts ventricular arrhythmia in heart failure patients receiving an implantable cardioverter-defibrillator for primary prevention. *Heart*. 2012;98:1359-1365. <https://doi.org/10.1136/heartjnl-2012-302321>
  42. Arimoto T., Tada H., Igarashi M., Sekiguchi Y., Sato A., Koyama T., Yamasaki H., Machino T., Kuroki K., Kuga K., Aonuma K. High washout rate of iodine-123-metaiodobenzylguanidine imaging predicts the outcome of catheter ablation of atrial fibrillation. *J Cardiovasc Electrophysiol*. 2011;22:1297-1304. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8167.2011.02123.x>
  43. Gambhir S.S., Berman D.S., Ziffer J., Nagler M., Sandler M., Patton J., Hutton B., Sharir T., Haim S.B., Haim S.B. A novel high-sensitivity rapid-acquisition single-photon cardiac imaging camera. *J Nucl Med*. 2009;50(4):635-643. <https://doi.org/10.2967/jnumed.108.060020>
  44. Scherlag B.J., Nakagawa H., Jackman W.M., Yamanashi W.S., Patterson E., Po S., Lazzara R. Electrical stimulation to identify neural elements on the heart: their role in atrial fibrillation. *J Interv Card Electrophysiol*. 2005;13(Suppl 1):37-42. <https://doi.org/10.1007/s10840-005-2492-2>
  45. Katritsis D.G., Giazitzoglou E., Zografos T., Pokushalov E., Po S.S., Camm A.J. Rapid pulmonary vein isolation combined with autonomic ganglia modification: a randomized study. *Heart Rhythm*. 2011;8(5):672-678. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2010.12.047>
  46. Romanov A., Minin S., Breault C., Pokushalov E. Visualization and ablation of the autonomic nervous system corresponding to ganglionated plexi guided by D-SPECT 123I-mIBG imaging in patient with paroxysmal atrial fibrillation. *Clin Res Cardiol*. 2017;106(1):76-78. <https://doi.org/10.1007/s00392-016-1045-2>
  47. Stirrup J., Gregg S., Baavour R., Roth N., Breault C., Agostini D., Ernst S., Underwood S.R. Hybrid solid-state SPECT/CT left atrial innervation imaging for identification of left atrial ganglionated plexi: Technique and validation in patients with atrial fibrillation. *J Nucl Cardiol*. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12350-018-01535-5>
  48. Романов А.Б., Шабанов В.В., Лосик Д.В., Елесин Д.А., Стенин И.Г., Минин С.М., Никитин Н.А., Михеенко И.Л., Покушалов Е.А. Визуализация и радиочастотная абляция очагов симпатической иннервации левого предсердия у пациентов с пароксизмальной формой фибрилляции предсердий. *Кардиология*. 2019;59(4):33-38. [Romanov A.B., Shabanov V.V., Losik D.V., Elesin D.A., Stenin I.G., Minin S.M., Nikitin N.A., Mikheenko I.L., Pokushalov E.A. Visualisation and radiofrequency ablation of sympathetic innervation loci in the left atrium in patients with paroxysmal atrial fibrillation. *Kardiologiya*. 2019;59(4):33-38. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18087/cardio.2019.4.10249>
  49. Никитин Н.А., Минин С.М., Шабанов В.В., Лосик Д.В., Михеенко И.Л., Покушалов Е.А., Романов А.Б. Возможности гибридной ОФЭКТ/КТ с 123I-mIBG для визуализации очагов симпатической активности сердца у пациентов с фибрилляцией предсердий. VI Международный конгресс и школа для врачей «Кардиоторакальная радиология». Тезисы докладов. 21-23 марта 2019 г.; Санкт-Петербург, Россия. С. 132-133. Режим доступа: <http://congress-ph.ru/common/htdocs/upload/fm/cardiotorakal/19/tezis.pdf>
  50. Gimelli A., Liga R., Giorgetti A., Genovesi D., Marzullo P. Assessment of myocardial adrenergic innervation with a solid-state dedicated cardiac cadmium-zinc-telluride camera: first clinical experience. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2014;15(5):575-585. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jet258>
  51. Gimelli A., Liga R., Genovesi D., Giorgetti A., Kusch A., Marzullo P. Association between left ventricular regional sympathetic denervation and mechanical dyssynchrony in phase analysis: a cardiac CZT study. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2014;41(5):946-955. <https://doi.org/10.1007/s00259-013-2640-3>
  52. Gimelli A., Menichetti F., Soldati E., Liga R., Vannozi A., Marzullo P., Bongiorni M.G. Relationships between cardiac innervation/perfusion imbalance and ventricular arrhythmias: impact on invasive electrophysiological parameters and ablation procedures. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2016;43(13):2383-2391. <https://doi.org/10.1007/s00259-016-3461-y>
  53. Gimelli A., Menichetti F., Soldati E., Liga R., Scelza N., Zucchelli G., Di Cori A., Segreti L., Vannozi A., Bongiorni M.G., Marzullo P. Predictors of ventricular ablation's success: Viability, innervation, or mismatch? *J Nucl Cardiol*. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12350-018-01575-x>
  54. Ljungberg M., Pretorius H. SPECT/CT: an update on technological developments and clinical applications. *Br J Radiol*. 2018;91(1081):20160402. <https://doi.org/10.1259/bjr.20160402>

## Modern possibilities of cardiovascular imaging using gamma cameras with cadmium–zinc–telluride-detectors

Stanislav M. Minin<sup>1</sup>, Konstantin V. Zavadovsky<sup>2</sup>, Nikita A. Nikitin<sup>1</sup>, Adrew V. Mochula<sup>2</sup>, Alexander B. Romanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Meshalkin National Medical Research Center, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

**Corresponding author.** Stanislav M. Minin, [s\\_minin@meshalkin.ru](mailto:s_minin@meshalkin.ru)

Myocardial perfusion imaging is considered one of the leading non-invasive diagnostic tools for the assessment of patients with known or suspected coronary artery disease and other cardiac pathologies. The technical improvement of the currently used gamma-tomographic devices has increased the diagnostic capability of this technique. In recent years, the use of dedicated cardiac SPECT cameras with solid-state cadmium–zinc–telluride (CZT) technology has increased in nuclear imaging. These new CZT technologies have several advantages over existing scanner models. The development of new CZT detectors and their collimator configuration has increased scanning sensitivity and spatial resolution values. Also, due to the significantly higher sensitivity of new CZT detectors and new methods of data processing, radiologists have already introduced new scanning protocols and methods for radionuclide assessment of myocardial blood flow, reserve and non-invasive visualisation of the functioning of the sympathetic nervous system into clinical practice. The purpose of this review is to provide data on the main technical characteristics of gamma cameras equipped CZT detectors as well as the current possibilities of using CZT cameras for examining patients with various cardiovascular diseases.

**Keywords:** arrhythmia; cadmium–zinc–telluride; coronary flow reserve; dynamic single-photon emission computed tomography; gamma camera; metaiodobenzylguanidine; myocardial blood flow; scintigraphy

Received 1 April 2020. Revised 22 April 2020. Accepted 30 April 2019.

**Funding:** The work is supported by a grant of the Russian Science Foundation No. 17-75-20118.

**Conflict of interest:** Authors declare no conflict of interest.

### Author contributions

Conception and study design: S.M. Minin, K.V. Zavadovsky, A.B. Romanov

Drafting the article: S.M. Minin, K.V. Zavadovsky, N.A. Nikitin, A.V. Mochula, A.B. Romanov

Critical revision of the article: S.M. Minin, K.V. Zavadovsky

Final approval of the version to be published: S.M. Minin, K.V. Zavadovsky, N.A. Nikitin, A.V. Mochula, A.B. Romanov

### ORCID ID

S.M. Minin, <https://orcid.org/0000-0001-6626-6408>

K.V. Zavadovsky, <https://orcid.org/0000-0002-1513-8614>

N.A. Nikitin, <https://orcid.org/0000-0001-5643-9109>

A.V. Mochula, <http://orcid.org/0000-0003-0883-466X>

A.B. Romanov, <https://orcid.org/0000-0002-6958-6690>

**Copyright:** © 2020 Minin et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

**How to cite:** Minin S.M., Zavadovsky K.V., Nikitin N.A., Mochula A.V., Romanov A.B. Modern possibilities of cardiovascular imaging using gamma cameras with cadmium–zinc–telluride-detectors. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokhirurgiya = Circulation Pathology and Cardiac Surgery*. 2020;24(3):11-22. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.21688/1681-3472-2020-3-11-22>