

## Совмещенная однофотонная эмиссионная и рентгеновская компьютерная томография сердца: методические аспекты

**К.В. Завадовский**<sup>1,2</sup>, д. м. н., вед. науч. сотр.;

**М.О. Гуля**<sup>1,2</sup>, к. м. н., врач-рентгенолог;

**В.В. Саушкин**<sup>1</sup>, к. м. н., мл. науч. сотр.;

**Ю.В. Саушкина**<sup>1</sup>, к. м. н., врач-радиолог;

**Ю.Б. Лишманов**<sup>1,2</sup>, д. м. н., профессор, чл.-корр. РАН, руководитель научного направления НИИ кардиологии

<sup>1</sup>ФГБНУ «Томский национальный исследовательский медицинский центр РАН

«Научно-исследовательский институт кардиологии»,

ул. Киевская, 111А, Томск, 634012, Российская Федерация;

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,  
пр-т Ленина, 30, Томск, 634050, Российская Федерация

## Superimposed single-photon emission computed tomography and X-ray computed tomography of the heart: Methodical aspects

**K.V. Zavadovsky**<sup>1,2</sup>, MD, PhD, DSc, Leading Research Associate;

**M.O. Gulya**<sup>1,2</sup>, MD, PhD, Radiologist;

**V.V. Saushkin**<sup>1</sup>, MD, PhD, Junior Research Associate;

**Yu.V. Saushkina**<sup>1</sup>, MD, PhD, Radiologist;

**Yu.B. Lishmanov**<sup>1,2</sup>, MD, PhD, DSc, Professor, Corresponding Member  
of Russian Academy of Sciences, Head of the Scientific Direction

<sup>1</sup>Cardiology Research Institute,

ul. Kievskaya, 111A, Tomsk, 634012, Russian Federation;

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University,

prospekt Lenina, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation

За последнее время в области мировой радиологии и ядерной медицины наметился явный тренд к выполнению гибридных (комбинированных, совмещенных) исследований. К сожалению, в отечественной литературе практически отсутствуют работы как методического, так и исследовательского характера по данной тематике. В основу данной статьи легли рекомендации Североамериканского общества ядерной медицины и молекулярных изображений, Североамериканского общества ядерной кардиологии, Общества сердечно-сосудистой компьютерной томографии, а также принципы, изложенные в совместной позиции Европейского общества ядерной медицины, Европейского радиологического общества, Европейского совета по ядерной медицине. Целью статьи является знакомство читателей с некоторыми методическими аспектами выполнения совмещенной однофотонной эмиссионной и рентгеновской компьютерной томографии сердца (ОФЭКТ/КТ). В данной публикации обсуждаются основные показания и противопоказания к выполнению гибридных кардиологических исследований, а также приводятся другие сведения, полезные при отборе пациентов на исследование. Рассказывается о подготовке пациента и мерах предосторожности. Дана информация об основных радиофармпрепаратах и оборудовании для совмещенных исследований. Приведены параметры записи изображений, сведения о коррекции поглощения гамма-квантов по данным КТ. Затронута тема интерпретации результатов определения кальциноза коронарных артерий, КТ-коронарографии и перфузионной сцинтиграфии миокарда. Приведены методические аспекты совмещения радионуклидного и КТ-изображений, возможные источники ошибок при

Global radiology and nuclear medicine have recently shown a clear trend towards hybrid (combined, superimposed) studies. Unfortunately, the Russian literature virtually lacks both methodological and research works on this topic. The basis for this paper was the guidelines of the North American Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, the North American Society of Nuclear Cardiology, and the Society of Cardiovascular Computed Tomography and the principles as jointly set out by the European Society of Nuclear Medicine, the European Society of Radiology, and the European Association of Nuclear Medicine.

The purpose of the paper is to familiarize readers with some methodical aspects of performing superimposed single-photon emission computed tomography (SPECT) and X-ray computed tomography (CT) of the heart. This publication discusses the main indications for and contraindications to hybrid cardiological studies and gives other data that are useful to select patients for examination. A patient's preparation and prevention measures are described. There is information on major radiotracers and equipment for superimposed studies. There are imaging parameters and information on the correction of gamma-ray quantum absorption according to CT data. The paper concerns the interpretation of the results of identifying coronary artery calcification and those of CT coronarography and myocardial perfusion scintigraphy. It presents the methodical aspects of superimposition of radionuclide and CT images, the possible sources of errors during superimposed SPECT/CT, and recommendations for making a diagnostic conclusion. The issues of radiation load and radiation safety are discussed.

выполнении совмещенного ОФЭКТ/КТ-исследования, а также рекомендации по формированию диагностического заключения. Обсуждаются вопросы лучевой нагрузки и радиационной безопасности.

**Ключевые слова:** миокард; коронарные артерии; перфузия; однофотонная эмиссионная компьютерная томография/компьютерная томография; совмещение; коррекция поглощения.

**Для цитирования:** Завадовский К.В., Гуля М.О., Саушкин В.В., Саушкина Ю.В., Лешманов Ю.Б. Совмещенная однофотонная эмиссионная и рентгеновская компьютерная томография сердца: методические аспекты. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2016; 97 (4): 235–242. DOI: 10.20862/0042-4676-2016-97-4-235-242

**Для корреспонденции:** Завадовский Константин Валерьевич; E-mail: konstzav@gmail.com

**Index terms:** myocardium; coronary arteries; perfusion; single-photon emission computed tomography/computed tomography; superimposition; absorption correction.

**For citation:** Zavadovsky K.V., Gulya M.O., Saushkin V.V., Saushkina Yu.V., Lishmanov Yu.B. Superimposed single-photon emission computed tomography and X-ray computed tomography of the heart: Methodical aspects. *Vestnik Rentgenologii i Radiologii (Russian Journal of Radiology)*. 2016; 97 (4): 235–242 (in Russ.). DOI: 10.20862/0042-4676-2016-97-4-235-242

**For correspondence:** Konstantin V. Zavadovsky; E-mail: konstzav@gmail.com

**Information about authors:**

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

Gulya M.O., <http://orcid.org/0000-0001-5689-9754>

Saushkin V.V., <http://orcid.org/0000-0001-5564-3802>

Saushkina Yu.V., <http://orcid.org/0000-0002-0193-9453>

Lishmanov Yu.B., <http://orcid.org/0000-0001-7324-504X>

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study was supported by the Russian Science Foundation (grant № 14-15-00178).

Received 18 November 2015

Accepted 28 March 2016

## Введение

За последнее время в области мировой радиологии и ядерной медицины наметился явный тренд к выполнению гибридных (комбинированных, совмещенных) исследований. Обусловлено это, с одной стороны, увеличением выпуска гибридных томографов, с другой стороны, осознанием ценности исследования, несущего как анатомическую, так и функциональную информацию. Чаще всего под гибридным исследованием понимают совмещение рентгеновской компьютерной томографии (КТ) с позитронной эмиссионной (ПЭТ) или однофотонной эмиссионной (ОФЭКТ) компьютерной томографией. Выполнение совмещенных исследований в кардиологии определяется необходимостью, во-первых, сопоставления морфологических данных об атеросклеротическом поражении коронарных артерий, вызывающем нарушение магистрального кровотока и/или перфузии миокарда, и, во-вторых, выполнением коррекции поглощения гамма-квантов мягкими тканями при записи скинтиграфического изображения. К сожалению, в отечественной литературе практически отсутствуют работы как методического, так и исследовательского характера по данной

тематике [1]. Заполнить этот пробел призвана данная статья, в которой методические аспекты изолированного проведения перфузионной скинтиграфии миокарда (ПСМ) и рентгеновской компьютерной томографии будут изложены кратко, поскольку они уже освещены в литературе [2]. Основное же внимание будет уделено технике выполнения совмещенных кардиологических исследований. Кроме того, в настоящей статье не будут рассматриваться методические аспекты выполнения ПЭТ/КТ-исследований в кардиологии.

В основу данной работы легли рекомендации Североамериканского общества ядерной медицины и молекулярных изображений, Североамериканского общества ядерной кардиологии, Общества сердечно-сосудистой компьютерной томографии [3], а также принципы, изложенные в совместной позиции Европейского общества ядерной медицины, Европейского радиологического общества, Европейского совета по ядерной медицине [4].

## Показания к совмещенным кардиологическим исследованиям

Показаниями к проведению совмещенных кардиологических

исследований являются: 1) коррекция поглощения при радионуклидном исследовании перфузии миокарда; 2) совмещенная оценка миокардиальной перфузии и кальциноза коронарных артерий; 3) сопоставление локализации зон нарушенной миокардиальной перфузии и топографии коронарных артерий; 4) оценка функциональной (гемодинамической) значимости стенозов коронарных артерий; 5) визуализация жизнеспособности миокарда; 6) исследование воспалительных процессов.

## Отбор пациентов на исследование

Решение о целесообразности проведения исследования принимает лечащий врач (кардиолог или терапевт) или совместно врач-радиолог (рентгенолог) и лечащий врач. Противопоказания для ОФЭКТ сердца и КТ-коронарографии (КТКГ) следующие [5–7]: беременность (независимо от срока); нестабильное состояние (острый инфаркт миокарда, декомпенсация сердечной недостаточности, выраженная гипотония); недопустимые для сканера размеры тела пациента; невозможность обеспечения венозного доступа; фибрилляция предсердий; частая желудочковая или

предсердная экстрасистолия; невозможность задержки дыхания; выраженная аллергия или анафилаксия на йодсодержащие контрастные вещества в анамнезе; почечная недостаточность; противопоказания к использованию бета-блокаторов (бронхоспастические заболевания в стадии обострения, выраженный стеноз аортального клапана).

### **Подготовка пациента и меры предосторожности**

Подготовка к радионуклидному исследованию или КТ-исследованию как части гибридного исследования проводится так же, как к изолированному исследованию:

1. Процедура выполняется натощак (исключить прием пищи минимум за 4 ч до исследования).

2. Должны отсутствовать противопоказания к нагрузочному тестированию или фармакологическим стресс-тестам, а также к бета-блокаторам и нитроглицерину.

3. Кофеинсодержащие продукты (кофе, чай, кофеинсодержащие медикаменты, энергетические напитки и др.) должны быть исключены как минимум за 12 ч до ПСМ и КТКГ.

4. При выполнении КТКГ у пациентов с легкой аллергией в анамнезе необходима премедикация: преднизолон 50 мг перорально за 13, 7 и 1 ч до контрастирования в комбинации с дифенгидрамом 50 мг перорально за 1 ч до контрастирования [8]. Пациентам с выраженной аллергией или анафилаксией в анамнезе исследование противопоказано.

5. Для выполнения КТКГ необходимо использовать внутривенный периферический катетер (размер 20 G, в идеале 18 G), для ПСМ достаточно тонкой внутривенной линии.

6. При проведении КТКГ пациент должен сотрудничать с врачом в плане задержки дыхания.

7. При проведении гибридного исследования очень важно учитывать взаимодействие между

различными фармакологическими средствами. Нежелательно использовать бета-блокаторы перед выполнением ПСМ. Противопоказана комбинация препаратов на основе фосфодиэстеразы (силденафил и варденафил в течение 24 ч, а тадалафил в течение 48 ч) с нитроглицерином [9]. Дипиридамоксодержащие препараты не следует использовать как минимум за 48 ч до фармакологического тестирования с применением аденозина или дипиридамола. Использование кофеинсодержащих медикаментов может лимитировать вазодилатационный эффект фармакологических агентов и снижать таким образом чувствительность ПСМ в отношении идентификации ишемии. Метформин должен быть отменен за 48 ч до КТКГ и вновь назначен после оценки функции почек.

8. При проведении нагрузочных тестов пациенты должны быть подготовлены к записи ЭКГ.

9. Помещения, где выполняются совмещенные ОФЭКТ/КТ-исследования, должны быть оснащены всем необходимым оборудованием и медикаментами для оказания реанимационных мероприятий.

### **Радиофармацевтические препараты**

Наиболее часто используемыми для ПСМ радиофармацевтическими препаратами (РФП) являются  $^{99m}\text{Tc}$ -метоксиизобутилизонитрил (зарегистрирован в РФ под названием Технетрил) и  $^{99m}\text{Tc}$ -тетрафосмин (зарегистрирован в РФ под названием Myoview). Препараты на основе  $^{99m}\text{Tc}$  обеспечивают высокое качество изображения (в связи с низким рассеянием излучения) и низкую лучевую нагрузку на пациента.

### **Оборудование**

Для ОФЭКТ/КТ используют классические гамма-камеры с кристаллами на основе йодида натрия или новые ОФЭКТ-сканеры

с твердотельными детекторами: кадмий-цинк-теллуриды или активированными таллием йодид-цезиевыми. Для выполнения КТКГ необходимы КТ-сканеры, оснащенные 64 и более рядами детекторов. При этом рекомендованное пространственное разрешение 0,4–0,6 мм, а временное разрешение – 500 мс или менее (предпочтительное  $\leq 350$  мс) [7, 8].

### **Параметры записи изображений**

При проведении ПСМ с комплексами технеция наиболее часто используют двухдневный протокол, предполагающий выполнение двух инъекций РФП с одинаковой дозой (952–1110 МБк/25–30 мКи), или однодневный протокол (низкодозовое исследование в покое и высокодозовое на нагрузке) [5]. Исследование только на нагрузке может сократить сроки диагностики, лучевую нагрузку и стоимость исследования. В ряде работ показано, что нормальный результат нагрузочной ПСМ эквивалентен нормальному результату ПСМ в формате «нагрузка-покой» в плане стратификации риска у пациентов с низкой вероятностью ИБС [10, 11].

Типичный протокол записи представлен в таблице 1 [5].

### **Коррекция поглощения гамма-квантов по данным КТ**

Для КТ-коррекции поглощения трансмиссионное исследование выполняют без внутривенного контрастирования, задержки дыхания и ЭКГ-синхронизации, срезами толщиной ~5 мм [12]. Если ПСМ проводится по двухдневному протоколу, то на второй день повторять трансмиссионный скан для коррекции поглощения не рекомендуется из соображений снижения лучевой нагрузки. Коррекцию поглощения гамма-квантов мягкими тканями грудной клетки обычно осуществляют на гибридных сканерах, но можно пользоваться и КТ-сканом, полученным на

Примерный протокол проведения перфузионной сцинтиграфии миокарда

Параметр исследования	Покой	Нагрузка
Доза	29–444 МБк*	810–1330 МБк*
Время между инъекцией РФП и исследованием	30–60 мин	15–60 мин
Энергетическое окно	15–20%, симметричное	15–20%, симметричное
Коллиматор	Низкоэнергетический, высокого разрешения	Низкоэнергетический, высокого разрешения
Орбита вращения детекторов	180° (от 45° RAO до 45° LPO)	180° (от 45° RAO до 45° LPO)
Матрица сбора данных**	64 × 64 128 × 128	64 × 64 128 × 128
Число проекций	60–64	60–64
Время на проекцию, с	Не менее 25	Не менее 20
ЭКГ-синхронизация	Рекомендована	Необходима
Число кадров на сердечный цикл	8 (предпочтительнее 16)	
Коррекция поглощения	Сбор данных для коррекции поглощения гамма-квантов выполняют до или после сканирования	

\* При использовании новых ОФЭКТ-сканеров на основе твердотельных детекторов и новых программных алгоритмов реконструкции изображений могут быть применены меньшие дозы РФП.

\*\* При использовании новых ОФЭКТ-сканеров на основе твердотельных детекторов могут быть использованы иные матрицы сбора данных.

Примечание. RAO – правая переднекосая проекция; LPO – левая заднекосая проекция.

отдельном компьютерном томографе, и выполнять совмещение программными средствами [13]. Однако корректность последнего подхода изучена недостаточно, а сам подход используется редко.

### КТ-коронарография

В аспекте гибридного исследования рекомендуется сначала выполнять ПСМ, а затем КТКГ. Выбирая фармакологический агент для стресс-тестирования, необходимо отдавать предпочтение вазодилататорам, а не добутамину, так как он оказывает более выраженное хронотропное действие.

На гибридных томографах КТКГ проводится по стандартным протоколам [7, 8]. Основные параметры сканирования могут варьировать в зависимости от телосложения пациента, его сердечного выброса, частоты сердечных сокращений, ритма, типа сканера и т. д. Первым этапом КТ-исследования является выполнение топограммы (в передней и боковой проекциях) для позиционирования сердца и определения начала и конца скани-

рования. Для контрастирования коронарного русла рекомендуется использовать йодсодержащие контрастные вещества с концентрацией йода 350 мг/мл или более. Сначала внутривенно при помощи автоматического инжектора вводят 50–120 мл контрастного вещества со скоростью 4–7 мл/с, затем 40 мл физиологического раствора. Введение физиологического раствора используют для сохранения компактности болюса, а также с целью «вымывания» контрастного вещества из правых отделов сердца, что уменьшает линейные артефакты на правой коронарной артерии. Сканирование при КТКГ происходит от точки, находящейся на 2,5–5 см выше корня аорты, до точки на 2,5–5 см ниже основания сердца. Для снижения ЧСС до значений 65 уд/мин или менее рекомендуется использовать пероральные или инъекционные бета-блокаторы. Кроме того, непосредственно перед выполнением КТКГ рекомендуется однократное использование нитроглицерина 0,4 мг (таблетки или спрей), что улучшает визуа-

лизацию мелких ветвей коронарных артерий.

### Методические аспекты совмещения радионуклидного и КТ-исследований

В настоящее время совмещение радионуклидных и КТ-изображений может быть выполнено с использованием данных, полученных как на гибридных (ОФЭКТ/КТ), так и на отдельных сканерах. Совмещенные изображения представляют собой слияние трансмиссионного скана, полученного для коррекции поглощения, с радионуклидным изображением сердца или результаты КТКГ и радионуклидного исследования перфузии миокарда. Рентгеновские компьютерные томограммы обычно анализируют в серошкальном отображении, а радионуклидные – в цветной гамме. Современное программное обеспечение дает возможность совмещать КТ и эмиссионные изображения в автоматическом режиме [14]. Такое программное обеспечение позволяет при необходимости

выполнить ручную коррекцию совмещаемых изображений. Точное совмещение изображений по трем осям важно для корректного построения карты коррекции поглощения.

### **КТ-коронарография и перфузионная сцинтиграфия миокарда**

Перфузионная сцинтиграфия миокарда и КТКГ могут быть проведены последовательно на гибридном томографе или же на отдельных КТ- и ОФЭКТ-системах [13]. Для совмещения данных ПСМ специализированное программное обеспечение сегментирует изображение коронарных артерий и накладывает его на трехмерную модель перфузии миокарда левого желудочка [15], что позволяет оценить отношение топографии коронарных артерий к расположению зон гипоперфузии [13, 16].

### **Возможные источники ошибок при выполнении совмещенного ОФЭКТ/КТ-исследования**

Наиболее частыми источниками ошибок в гибридных исследованиях являются артефакты от некорректного совмещения трансмиссионных и эмиссионных изображений, артефакты движения при проведении КТ-коррекции поглощения и КТКГ. Повторное совмещение изобра-

жения с использованием специализированных программных пакетов может быть проведено для коррекции данного вида ошибок в том случае, если трансмиссионный и эмиссионный сканы не содержат артефактов движения и имеют хорошее качество. Однако если трансмиссионный и/или эмиссионный сканы содержат артефакты движения, исправить эти ошибки с использованием программных средств невозможно, и исследование необходимо выполнить повторно. В связи с этим пациент не должен двигаться в течение всего времени его проведения. Медицинский персонал должен инструктировать пациента и внимательно наблюдать за ним во время исследования, и в случае произвольных движений (кашель, чихание) пациента необходимо, не снимая его со стола, убедиться в наличии или отсутствии артефактов на изображениях. Движения пациентов во время КТ-исследования могут приводить к появлению линейных артефактов. Артефакты от движения коронарных артерий возможно минимизировать, используя бета-блокаторы за счет снижения ЧСС. При этом следует иметь в виду, что площадь и выраженность нарушений перфузии по данным ПСМ может снижаться у пациентов, получающих бета-блокаторы [17].

### **Формирование диагностического заключения**

При описании гибридного исследования методы, находки и интерпретацию следует излагать совместно (табл. 2). Методическая часть заключения должна содержать информацию о параметрах нагрузочного тестирования при выполнении ПСМ, параметры записи КТ сердца [18–20]. Полученные данные описывают с использованием стандартной терминологии [21]. Результаты анализа перфузионных сцинтиграмм и КТКГ должны быть отражены в различных разделах заключения. При выполнении КТ-исследования области сердца достаточно часто определяются случайные экстракардиальные находки [22]. Клинически незначимые находки можно отразить лишь в описании, не включая их в заключение, в то время как значимую патологию (примерно в 5% случаев) следует вынести в заключение. Заключение должно содержать основные результаты ПСМ и КТКГ с интерпретацией и возможными рекомендациями.

### **Вопросы лучевой нагрузки и радиационной безопасности**

В соответствии с принципом ALARA (As Low As Reasonably Achievable) лучевая нагрузка на

**Рекомендации по формированию диагностического заключения по результатам совмещенного ОФЭКТ/КТ-исследования**

Таблица 2

Параграф диагностического заключения	Комментарий
Анамнез	Анамнез коронарной патологии или вмешательств на коронарных артериях (баллонная ангиопластика и стентирование, коронарное шунтирование)
Медикаментозная терапия	Перечисление всех фармакологических препаратов, которые на сегодняшний день использует пациент
Перфузионная сцинтиграфия миокарда	Тип и доза РФП, тип диагностического прибора, вид нагрузочного теста, изменения гемодинамики и ЭКГ при проведении нагрузочного теста
Рентгеновская компьютерная томография	Техника выполнения коррекции поглощения гамма-квантов, КТ-коронарографии. Дозы бета-блокаторов, нитроглицерина (если использовались)
Описание	Результаты ПСМ / КТ-коронарографии
Заключение	Общая характеристика сцинтиграфического исследования/КТ-исследования. Локализация дефекта перфузии по отношению к коронарным артериям. Пояснения, рекомендации

пациента должна быть минимальной для получения качественного диагностического изображения. В рамках совмещенного исследования снижение лучевой нагрузки включает в себя изменение параметров записи сцинтиграфической и КТ-диагностических процедур. Лучевая нагрузка при этом определяется несколькими факторами, что делает ее точное количественное определение довольно сложным.

Лучевая нагрузка при ПСМ и КТ-исследовании представле-

на в таблице 3 [23]. Некоторые подходы к снижению лучевой нагрузки при сцинтиграфическом, КТ- и гибридном исследовании отражены в таблице 4.

Если оборудование позволяет, лучевую нагрузку можно снизить, используя меньшие дозы РФП. Каждая диагностическая процедура уникальна, и методика снижения лучевой нагрузки с сохранением хорошего качества изображений также должна быть сугубо индивидуальной. Диапазоны доз, представленные в дан-

ной статье, следует рассматривать как рекомендательные. Из соображений лучевой нагрузки доза РФП в каждом случае может быть пересмотрена (см. табл. 1, 3, 4). Снижение вводимой дозы важно не только для пациентов, но и для персонала лечебного учреждения, для тех, кто контактирует с пациентами.

### Заключение

Достижения последних нескольких лет способствовали появлению возможности неинва-

Таблица 3

Лучевые нагрузки для взрослых пациентов

РФП и вид исследования	Вводимая активность		Лучевая нагрузка
	МБк	мКи	
$^{99m}\text{Tc}$ -МИБИ (покой)	296–444	8–12	**
$^{99m}\text{Tc}$ -МИБИ (нагрузка)	888–1332	24–36	***
$^{99m}\text{Tc}$ -тетрафосмин (покой)	296–444	8–12	**
$^{99m}\text{Tc}$ -тетрафосмин (нагрузка)	888–1332	24–36	**
$^{201}\text{Tl}$	111–185	3–5	***
КТ-топограмма	–	–	*
КТ-коррекция поглощения	–	–	*
КТ-определение кальциноза коронарных артерий	–	–	**
КТ-коронарография	–	–	**

\* Относительная лучевая нагрузка 0,1–1,0 мЗв; \*\* 1–10 мЗв; \*\*\* 10–30 мЗв.

Таблица 4

Пути снижения лучевой нагрузки при сцинтиграфическом, КТ- и комбинированном исследовании

Процедура	Подход	Комментарий
Перфузионная сцинтиграфия миокарда [24]	Расчет дозы РФП по весу пациента	У пациентов с малым весом можно уменьшить дозу РФП
	Использование низких доз РФП	Новые гамма-камеры с твердотельными детекторами позволяют сократить время записи и уменьшить дозу вводимого РФП [25]. Новые алгоритмы реконструкции [26] дают возможность сократить время записи более чем в 2 раза, что позволяет уменьшить дозы РФП при сохранении стандартного времени записи
	Выполнение ПСМ только на нагрузке	Исследование в покое можно не выполнять при нормальном результате стресс-исследования у пациентов с низким и средним риском ИБС
	Проспективная ЭКГ-синхронизация	Когда это возможно, необходимо использовать проспективную ЭКГ-синхронизацию [27]
Рентгеновская компьютерная томография [28]	ЭКГ-модуляция дозы	Уменьшение силы тока на трубке во время систолы позволяет снизить лучевую нагрузку на ~25–40% в зависимости от ЧСС
	Уменьшение напряжения на трубке	У пациентов с низкой массой тела возможно снижение напряжения со 120 до 100 кВ, что приводит к ~53%-му снижению дозы облучения [28, 29]
	Уменьшение тока на трубке и итеративная реконструкция	Использование низкого тока на трубке в сочетании с адаптивной статистической итеративной реконструкцией минимизирует шум на изображениях, при этом сохраняя качество исследования
ОФЭКТ/КТ	Персонализированный протокол	Например, использование проспективной ЭКГ-синхронизации и низкодозового сцинтиграфического исследования

живной диагностики поражения коронарных артерий при помощи совмещенных ОФЭКТ/КТ-томографов. Для успешного использования гибридных технологий от врачей-радиологов и рентгенологов требуется четкое понимание возможностей, ограничений, методологии выполнения обследования на всех этапах процесса – от показаний к тому или иному виду исследования до интерпретации изображений и подготовки заключения.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Финансирование

Данная работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 14-15-00178).

#### Литература / References

1. Короткевич А.А., Коков А.Н. Гибридные технологии лучевой диагностики ишемической болезни сердца: современные возможности и перспективы. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2015; 1: 5–9. [Korotkevich A.A., Kokov A.N. Hybrid technologies of radiation diagnostics of ischemic heart disease: current possibilities and perspectives. *Kompleksnyye Problemy Serdechno-sosudistykh Zabolevaniy (Complex Problems of Cardiovascular Diseases, Russian journal)*. 2015; 1: 5–9 (in Russ.).]
2. Hesse B., Tägil K., Cuocolo A., Anagnostopoulos C., Bardiés M., Bax J. et al. EANM/ESC Group. EANM/ESC procedural guidelines for myocardial perfusion imaging in nuclear cardiology. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. 2005; 32 (7): 855–97.
3. Dorbala S., Di Carli M.F., Delbecke D., Abbara S., DePuey E.G., Dilsizian V. et al. SNMMI/ASNC/SCCT guideline for cardiac SPECT/CT and PET/CT 1.0. *J. Nucl. Med.* 2013; 54 (8): 1485–507.
4. Flotats A., Knuuti J., Gutberlet M., Marcassa C., Bengel F.M., Kaufmann P.A. et al. Hybrid cardiac imaging: SPECT/CT and PET/CT – a joint position statement by the European Association of Nuclear Medicine (EANM), the European Society of Cardiac Radiology (ESCR) and the European Council of Nuclear Cardiology (ECNC). *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. 2011; 38: 201–12.
5. Holly T.A., Abbott B.G., Al-Mallah M., Calnon D.A., Cohen M.C., Di Filippo F.P. et al. Single photon-emission computed tomography. American Society of Nuclear Cardiology (ASNC) Imaging Guidelines For Nuclear Cardiology Procedures. *J. Nucl. Cardiol.* 2010; 17 (5): 941–73.
6. Rodgers G.P., Ayanian J.Z., Balady G., Beasley J.W., Brown K.A., Gervino E.V. et al. American College of Cardiology/American Heart Association clinical competence statement on stress testing: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association/American College of Physicians-American Society of Internal Medicine Task Force on Clinical Competence. *Circulation*. 2000; 102: 1726–38.
7. Mark D.B., Berman D.S., Budoff M.J., Carr J.J., Gerber T.C., Hecht H.S. et al. ACCF/ACR/AHA/NASCI/SAIP/SCAI/SCCT 2010 expert consensus document on coronary computed tomographic angiography: a report of the American College of Cardiology Foundation Task Force on Expert Consensus Documents. *Circulation*. 2010; 121: 2509–43.
8. Abbara S., Arbab-Zadeh A., Callister T.Q., Desai M.Y., Mamuya W., Thomson L. et al. SCCT guidelines for performance of coronary computed tomographic angiography: a report of the Society of Cardiovascular Computed Tomography Guidelines Committee. *J. Cardiovasc. Comput. Tomogr.* 2009; 3: 190–204.
9. Kloner R.A. Pharmacology and drug interaction effects of the phosphodiesterase 5 inhibitors: focus on alpha-blocker interactions. *Am. J. Cardiol.* 2005; 96 (12B): 42M–46M.
10. Chang S.M., Nabi F., Xu J., Raza U., Mahmarian J.J. Normal stress-only versus standard stress/rest myocardial perfusion imaging: similar patient mortality with reduced radiation exposure. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2010; 55: 221–30.
11. Duvall W.L., Wijetunga M.N., Klein T.M., Godbold J., Croft L.B., Henzlova M.J. The prognosis of a normal stress-only Tc-99m myocardial perfusion imaging study. *J. Nucl. Cardiol.* 2010; 17: 370–7.
12. Dilsizian V., Bacharach S.L., Beanlands R.S., Bergmann S.R., Delbecke D., Gropler R.J. et al. PET myocardial perfusion and metabolism clinical imaging. *J. Nucl. Cardiol.* 2009; 16 (4): 651.
13. Gaemperli O., Schepis T., Valenta I., Husmann L., Scheffel H., Duerst V. et al. Cardiac image fusion from stand-alone SPECT and CT: clinical experience. *J. Nucl. Med.* 2007; 48: 696–703.
14. Dey D., Slomka P.J., Hahn L.J., Kloiber R. Automatic three-dimensional multimodality registration using radionuclide transmission CT attenuation maps: a phantom study. *J. Nucl. Med.* 1999; 40: 448–55.
15. Gaemperli O., Schepis T., Kalff V., Namdar M., Valenta I., Stefani L. et al. Validation of a new cardiac image fusion software for three-dimensional integration of myocardial perfusion SPECT and stand-alone 64-slice CT angiography. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. 2007; 34: 1097–106.
16. Javadi M.S., Lautamaki R., Merrill J., Voicu C., Epley W., McBride G. et al. Definition of vascular territories on myocardial perfusion images by integration with true coronary anatomy: a hybrid PET/CT analysis. *J. Nucl. Med.* 2010; 51: 198–203.
17. Reyes E., Stirrup J., Roughton M., D'Souza S., Underwood S.R., Anagnostopoulos C. Attenuation of adenosine-induced myocardial perfusion heterogeneity by atenolol and other cardioselective beta-adrenoceptor blockers: a crossover myocardial perfusion imaging study. *J. Nucl. Med.* 2010; 51: 1036–43.
18. Raff G.L., Abidov A., Achenbach S., Berman D.S., Boxt L.M., Budoff M.J. et al. SCCT guidelines for the interpretation and reporting of coronary computed tomographic angiography. *J. Cardiovasc. Comput. Tomogr.* 2009; 3: 122–36.
19. Douglas P.S., Hendel R.C., Cummings J.E., Dent J.M., Hodgson J.M., Hoffmann U. et al. ACCF/ACR/

- AHA/ASE/ASNC/HRS/NASCI/RSNA/SAIP/SCAI/SCCT/SCMR 2008 health policy statement on structured reporting in cardiovascular imaging. Endorsed by the Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. *Circulation*. 2009; 119 (1): 187–200.
20. Hendel R.C., Budoff M.J., Cardella J.F., Chambers C.E., Dent J.M., Fitzgerald D.M. et al. ACC/AHA/ACR/ASE/ASNC/HRS/NASCI/RSNA/SAIP/SCAI/SCCT/SCMR/SIR 2008 key data elements and definitions for cardiac imaging: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Data Standards (Writing Committee to Develop Clinical Data Standards for Cardiac Imaging). *J. Am. Coll. Cardiol.* 2009; 53: 91–124.
21. Weigold W.G., Abbara S., Achenbach S., Arbab-Zadeh A., Berman D., Carr J.J. et al. Standardized medical terminology for cardiac computed tomography: a report of the Society of Cardiovascular Computed Tomography. *J. Cardiovasc. Comput. Tomogr.* 2011; 5: 136–44.
22. Husmann L., Tatsugami F., Aeppli U., Herzog B.A., Valenta I., Veit-Haibach P. et al. Prevalence of non-cardiac findings on low dose 64-slice computed tomography used for attenuation correction in myocardial perfusion imaging with SPECT. *Int. J. Cardiovasc. Imaging*. 2009; 25: 859–65.
23. International Commission on Radiological Protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals: Addendum 2 to ICRP publication 53. *Ann. ICRP*. 1998; 28 (3): 1–126.
24. Einstein A.J., Moser K.W., Thompson R.C., Cerqueira M.D., Henzlova M.J. Radiation dose to patients from cardiac diagnostic imaging. *Circulation*. 2007; 116 (11): 1290–305.
25. Sharir T., Slomka P.J., Hayes S.W., DiCarli M.F., Ziffer J.A., Martin W.H. et al. Multicenter trial of high-speed versus conventional single-photon emission computed tomography imaging: quantitative results of myocardial perfusion and left ventricular function. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2010; 55: 1965–74.
26. DePuey E.G., Bommireddipalli S., Clark J., Thompson L., Srouf Y. Wide beam reconstruction “quarter-time” gated myocardial perfusion SPECT functional imaging: a comparison to “full-time” ordered subset expectation maximum. *J. Nucl. Cardiol.* 2009; 16: 736–52.
27. Labounty T.M., Leipsic J., Min J.K., Heilbron B., Mancini G.B., Lin F.Y. et al. Effect of padding duration on radiation dose and image interpretation in prospectively ECG-triggered coronary CT angiography. *Am. J. Roentgenol.* 2010; 194: 933–7.
28. Hausleiter J., Meyer T., Hermann F., Hadamitzky M., Krebs M., Gerber T.C. et al. Estimated radiation dose associated with cardiac CT angiography. *JAMA*. 2009; 301 (5): 500–7.
29. Achenbach S., Marwan M., Ropers D., Schepis T., Pflederer T., Anders K. et al. Coronary computed tomography angiography with a consistent dose below 1 mSv using prospectively electrocardiogram-triggered high-pitch spiral acquisition. *Eur. Heart J.* 2010; 31 (3): 340–6.

Поступила 18.11.2015

Принята к печати 28.03.2016