



От приглашенного редактора | From section editor

ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)  
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-983>

## Новые области применения компьютерной томографии сердца в диагностике ишемии миокарда

© Лисицкая М.В.\* , Мершина Е.А., Ларина О.М., Плотникова М.Л., Шляпкина О.С.

Медицинский научно-образовательный центр ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; 119192 Москва, Ломоносовский проспект, 27, к. 10, Российская Федерация

КТ-коронарография показала высокую диагностическую точность в диагностике ишемической болезни сердца (ИБС) и стенозов венечных артерий. Тем не менее остаются вопросы функциональной оценки ишемии миокарда, так как степень стеноза артерий и клинические исходы не всегда коррелируют, а оценка гемодинамической значимости стенозов коронарных артерий остается сложной. Отмечено, что исключительное проведение функциональных неинвазивных тестов для оценки возможных стенозов может приводить к ложноотрицательным результатам и, как следствие, ухудшать долгосрочный прогноз вероятности кардиоваскулярных событий. Таким образом, сочетанное применение анатомической и функциональной оценки венечных артерий может улучшить прогноз пациентов с ИБС. В качестве единого («всё-в-одном») метода обследования может выступать КТ-коронарография и, дополненная стресс-перфузией и/или измерением фракционного резерва кровотока.

Данный обзор представляет собой описание новых методов диагностики ишемии миокарда при проведении КТ коронарных сосудов при стабильной ИБС и перспективы их применения.

**Ключевые слова:** компьютерная томография сердца, КТ-коронарная ангиография, ишемия миокарда, перфузия миокарда, стресс-перфузия миокарда, двухэнергетическая компьютерная томография сердца, фракционный резерв кровотока, коронарокальциноз, атеросклероз коронарных артерий

**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**

**Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ (номер ЦИТИС 121061800148-2)**

**Для цитирования:** Лисицкая М.В., Мершина Е.А., Ларина О.М., Плотникова М.Л., Шляпкина О.С. Новые области применения компьютерной томографии сердца в диагностике ишемии миокарда. *Медицинская визуализация*. 2022; 26 (1): 70–77. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-983>

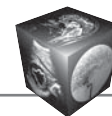
**Поступила в редакцию:** 31.01.2021. **Принята к печати:** 22.11.2021. **Опубликована online:** 01.02.2022.

## New applications of cardiac computed tomography for evaluation of myocardial ischemia

© Maria V. Lisitskaya\* , Elena A. Mershina, Olga M. Larina, Maria L. Plotnikova, Olga S. Shlyapkina

Medical Research and Education Center of Lomonosov Moscow State University; 27-10, Lomonosovsky prospect, 119192 Moscow, Russian Federation

MSCT is known for its extremely high diagnostic accuracy in coronary artery stenosis detection and quantification. However, there are still questions about physiological assessment of myocardial ischemia, since the degree of arterial stenosis and clinical outcomes do not always correlate. It is also noted that the exclusive use of functional non-invasive tests to assess the grade of stenosis can lead to false-negative results and worsen the long-term prognosis of cardiovascular events. Thus, the combined use of anatomical and functional tests can improve the prognosis in coronary heart disease patient. MSCT coronary angiography, combined with stress perfusion and/or CT derived fractional flow reserve, could be used as an all-in-one approach. This review describes new applications of cardiac MSCT.



**Keywords:** cardiac computed tomography, myocardial ischemia, myocardial perfusion, stress-myocardial perfusion, dual energy computed tomography, fractional flow reserve, atherosclerosis, coronary artery disease

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

**For citation:** Lisitskaya M.V., Merzhina E.A., Larina O.M., Plotnikova M.L., Shlyapkina O.S. New applications of cardiac computed tomography for evaluation of myocardial ischemia. *Medical Visualization*. 2022; 26 (1): 70–77. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-983>

**Received:** 31.01.2021.

**Accepted for publication:** 22.11.2021.

**Published online:** 01.02.2022.

## Введение

На протяжении последних десятилетий основное внимание исследователей в области кардиоваскулярной рентгенологии и радиологии было приковано к разработке неинвазивных методов диагностики ишемии миокарда. Первые попытки применить метод неинвазивной диагностики состояния коронарных артерий путем количественной оценки коронарного кальция были сделаны в начале 80-х годов прошлого столетия с начала повсеместного распространения компьютерной томографии (КТ) [1]. Начиная с двухтысячных годов, после широкого распространения 64-срезовых томографов, КТ-коронарная ангиография (КТ-КАГ) приблизилась по своей точности к инвазивной коронарной ангиографии [2]. С тех пор измерение коронарного кальция и оценка стенозов артерий методом КТ-КАГ входит в клинические рекомендации кардиологических сообществ по всему миру [3–5].

В клинических рекомендациях Европейской ассоциации кардиологов по ведению пациентов с хроническим коронарным синдромом от 2019 г. при подозрении на ишемическую болезнь сердца (ИБС) рекомендуется проводить КТ-КАГ для анатомической оценки просвета коронарных артерий [4, 6]. При этом подчеркивается, что бляшки, вызывающие стенозы коронарных артерий 50–70% [7, 8], а по данным ряда авторов, и до 90% [6, 9], могут не вызывать миокардиальную ишемию. В качестве иницирующих функциональных тестов для оценки проходимости венечных артерий рекомендуется проводить тредмил-тест, стресс-эхо, перфузионную сцинтиграфию, ПЭТ или МРТ с фармакологической нагрузкой, обращая внимание на то, что при низкой степени стенозов и высокой толерантности к нагрузке могут встречаться ложноотрицательные результаты, и, подводя к рекомендации, сочетать анатомические и функциональные методы оценки перед назначением лечения [4].

В российских клинических рекомендациях по ведению стабильной ИБС 2020 г. КТ-КАГ рекомендуется в качестве первого неинвазивного визуализирующего теста для диагностики ИБС и как альтернатива неинвазивным стресс-тестам [5].

В качестве основания для включения в российские рекомендации было указано исследование PROMISE, в котором проводилось сравнение МСКТ и стресс-тестов – тредмил-теста, стресс-перфузии методом сцинтиграфии и стресс-эхо – в качестве начальных методов диагностики ИБС для долгосрочного исхода и было показано преимущество КТ-КАГ [3, 10].

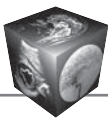
В многоцентровом исследовании сочетанного применения КТ-КАГ с перфузионной сцинтиграфией миокарда CORE320 у пациентов без предшествующего инфаркта миокарда в анамнезе ( $n = 278$ ) AUC (площадь под кривой ошибок) составила 0,90 (95% CI 0,87–0,94), а у пациентов без указания в анамнезе заболеваний венечных артерий ( $n = 236$ ) – 0,93 (95% CI 0,89–0,97) [11].

Таким образом, при подозрении на наличие стенозов коронарных артерий у пациентов без предшествующей ИБС сочетанное применение анатомических и функциональных тестов позволяет увеличить точность диагностики [12, 13]. В то же время увеличение количества необходимых тестов может увеличивать сроки постановки диагноза и быть связанным с дополнительными неудобствами для пациентов. КТ-КАГ, дополненная способом определения гемодинамической значимости стенозов, может быть методом выбора для комплексной диагностики ИБС [13].

Благодаря совершенствованию технических характеристик томографов появилась возможность не только измерять стенозы артерий, но и проводить анализ кровотока в миокарде методом КТ. Относительно новыми и не до конца изученными методами оценки физиологического кровотока в миокарде являются КТ-перфузия миокарда и оценка фракционного резерва кровотока (ФРК) миокарда по данным КТ-КАГ (ФРК-КТ).

## КТ-перфузия миокарда

Существует несколько способов оценить кровоток в миокарде при КТ: статическая КТ-перфузия, динамическая (многофазная) стресс-перфузия миокарда и двухэнергетическая КТ-перфузия со спектральным анализом в покое и при нагрузке фармакологическими препаратами (вазодилататорами).



### *Статическая КТ-перфузия*

Одновременно с внедрением методики КТ-КАГ проводились попытки по определению перфузии миокарда на основе изучения первого прохождения контрастного препарата по коронарным артериям [14]. Данный вид перфузии получил название статической КТ-перфузии покоя. Метод по сути представляет собой визуальную, или полуколичественную, оценку миокардиального кровотока: нарастание концентрации контрастного препарата в миокарде происходит пропорционально увеличению концентрации йода в кровотоке. Таким образом, участки с нарушенной перфузией остаются гиподенсными по сравнению с нормальным миокардом. Основным преимуществом метода является то, что он не требует дополнительных вмешательств и не связан с дополнительной лучевой нагрузкой на пациента [8]. На данный момент в программное обеспечение всех производителей томографов включены программы для анализа карт распределения йода в миокарде, в том числе представленных в виде системы координат типа “бычий глаз”. Данный вид анализа позволяет измерить участки гипоперфузии и сопоставить их с бассейнами кровоснабжения и стенозами в соответствующих артериях.

В 2016 г. М.Н. Sørgaard и соавт. провели метаанализ 19 оригинальных публикаций на основе 1188 пациентов, у которых проводилось сравнение статической перфузии при выполнении КТ-КАГ с результатами ОФЭКТ [15]. По сравнению с ОФЭКТ общие чувствительность, специфичность и АUC (площадь под кривой ошибок) для анализа перфузии методом КТ составили 0,85, 0,81 и 0,90 соответственно. Применение статической перфузии миокарда как вспомогательного метода для оценки значимости стенозов при КТ-КАГ по сравнению с традиционной инвазивной ангиографией повысило специфичность КТ-КАГ с 0,62 до 0,84 [16]. В более позднем исследовании PERFECTION G. Pontone и соавт. (n = 147) установили увеличение чувствительности метода КТ-КАГ в определении гемодинамической значимости стенозов с 76 до 95% при дополнении исследования анализом статической КТ-перфузии; при этом прогностическая ценность положительного результата возросла с 61 до 87% [17].

Таким образом, было показано, что оценка статической перфузии при выполнении КТ-КАГ может быть использована для повышения точности метода в оценке гемодинамической значимости стенозов. Еще одним преимуществом является то, что нет необходимости в дополнительном сканировании – построение йодных карт для определения статической перфузии покоя может произво-

диться по данными КТ-КАГ при условии одновременного введения вазодилатора.

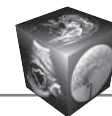
### *Динамическая КТ-перфузия миокарда*

Одно из первых задокументированных исследований изучения кровотока во время фармакологической нагрузки при МСКТ, подобно перфузионной сцинтиграфии, провели А. Kurata и соавт. в 2005 г. Авторы показали точность метода по сравнению с ОФЭКТ в 83% [18].

Долгое время проведение МСКТ-стресс-перфузии было ограничено сравнительно небольшим полем охвата – при количестве 64 детекторов и толщине среза 0,5–0,625 мм ширина зоны охвата составляла 3,2–4 см. По мере совершенствования томографов за счет добавления второй трубки и/или расширения рядов детекторов до 256–320 стало возможным увеличить зону сканирования и укоротить время сканирования и, таким образом, в значительной степени снизить лучевую нагрузку на пациента и повысить точность оценки [19].

Стресс-перфузия миокарда в настоящее время проводится как продолжение исследования после КТ-КАГ. При этом сначала производится измерение стенозов в коронарных артериях, затем визуальная качественная оценка перфузии покоя и далее оценка кровотока после введения вазодилаторов (аденозин, АТФ, дипиридамол). В результате такого исследования можно получить информацию о таких гемодинамических показателях, как миокардиальный кровоток, его объем, время достижения максимальной концентрации контрастного вещества в крови и время его прохождения через ткань, а также провести сравнение перфузии в покое и при нагрузке. Благодаря современному программному обеспечению результаты исследования могут быть обработаны и представлены в сравнительно небольшое время [20]. При динамической оценке перфузии возможен количественный (мл/с) анализ ее параметров.

По данным метаанализа М. Lu и соавт. (2018), включившим в себя 13 исследований с участием 482 пациентов, проведенных в период с 2010 по 2017 г., общая чувствительность и специфичность перфузионной КТ по сравнению с МРТ-, ОФЭКТ- и ПЭТ-перфузией составила 0,93 и 0,82 соответственно, а площадь под кривой составила 0,949. При этом было выявлено, что КТ не только обладает высокой конкордантностью по сравнению с ОФЭКТ, но и сама по себе обладает наивысшей специфичностью, а результаты применения – самостоятельно или в сочетании с КТ-КАГ – обладают сопоставимой чувствительностью с традиционными методами оценки перфузии миокарда [21].



Важным преимуществом является то, что у пациента одновременно проводится измерение стенозов и определение их гемодинамической значимости путем измерения перфузии в покое и при нагрузке и, таким образом, производится ее комплексная оценка.

Обладая высокой специфичностью и точностью, метод имеет ряд противопоказаний и требует выполнения особых условий для проведения: исследование проводится с достаточно длительной задержкой дыхания и с введением фармакологических препаратов, повышающих частоту сердечных сокращений, поэтому оно должно проводиться под наблюдением кардиолога.

#### *Двухэнергетическая перфузия и спектральный анализ*

Относительно новым методом проведения КТ-оценки перфузии миокарда является изучение йодных карт при двухэнергетическом сканировании. Суть двухэнергетической КТ была объяснена еще изобретателем компьютерного томографа Джефри Хаунсфилдом в 1973 г. [22], который отметил, что сканирование одного и того же материала с различной энергией позволяет различать вещества, основываясь на разнице их атомных чисел. При двухэнергетической КТ стало возможным дифференцировать вещества с примерно одинаковой высокой плотностью по данным денситометрии (числа Хаунсфилда), но с разными атомными числами (например, кальций и йод) и выполнять дифференцировку тканей. Благодаря такому подходу можно анализировать распределение йодсодержащего контрастного вещества в миокарде в качестве маркера перфузии и объема крови [23].

Фактически двухэнергетическая КТ является инструментом, улучшающим анализ перфузии миокарда с помощью статической или динамической КТ. Для выполнения таких исследований необходим компьютерный томограф с функцией двухэнергетического сканирования: с двумя рентгеновскими трубками, или с возможностью быстрого переключения напряжения на одной трубке, или же с наличием двух рядов детекторов [23]. Методика двухэнергетического протокола включает в себя сканирование с двумя различными энергиями – обычно это 80 и 140 кВ. При этом возможно провести оценку перфузии покоя после проведения стандартной КТ-КАГ или же выполнить исследование с фармакологической нагрузкой для изучения стресс-перфузии [24–26].

В исследовании R. Wang и соавт. (2011), в котором проводилось сравнение двухэнергетической перфузии миокарда (ДЭПМ) и количественной

коронарной ангиографии в качестве референсного метода, чувствительность сочетанного применения КТ-КАГ и ДЭПМ составила 90%, специфичность – 86% при точности метода 88% для стенозов более 50% по диаметру [25].

S.M. Ко и соавт. (2012) показали, что выполнение ДЭПМ после КТ-КАГ повышает ее чувствительность и специфичность с 91,8 и 67,7% до 93,2 и 85,5% соответственно [26]. Так же, как и в случае обычной КТ-перфузии, было показано преимущество стресс-ДЭПМ перед ДЭПМ покоя в выявлении гемодинамически значимых стенозов [26].

Дополнение стандартной КТ-КАГ ДЭПМ позволяет с высокой степенью точности выявлять зоны ишемии и рубцы в миокарде, при этом при проведении ДЭПМ количество ложноположительных результатов ниже за счет снижения артефактов жесткости рентгеновского пучка [27].

#### **Неинвазивный метод измерения ФРК при КТ-КАГ**

Определение ФРК у пациентов с коронарным атеросклерозом за последние несколько лет стало “золотым стандартом” в определении гемодинамической значимости пограничных стенозов благодаря его высокой точности. Эффективность измерения ФРК перед процедурой реваскуляризации для оценки долгосрочного прогноза у пациентов с ИБС была показана в исследовании FAME [9, 28]. Однако данный метод является инвазивным и может применяться только во время ангиографии. Были предприняты попытки неинвазивного измерения ФРК с помощью данных КТ-КАГ (КТ-ФРК). Благодаря методу вычислительной гидродинамики появилась возможность смоделировать давление и поток крови в коронарных артериях на всем протяжении сосудистого русла на основании расчетных параметров (сердечный выброс, давление в аорте и микроциркуляторное сопротивление) и измеряемых при проведении КТ-КАГ данных [29]. В данной технике на первом этапе производится получение анатомической модели кровеносного русла методом КТ-КАГ [30], на втором – применяются математические модели для расчета коронарного кровотока по законам гидро- и гемодинамики, на третьем – производится моделирование потока и давления [31], что в итоге позволяет проводить 3-мерную (3D) оценку ФРК в каждом пикселе коронарного дерева [30].

В опубликованных многоцентровых исследованиях DISCOVER-FLOW и DeFACTO было показано превосходство измерения КТ-ФРК при коронарной КТ-КАГ по сравнению с измерением вероятности ишемии на основе оценки степени стеноза [30, 32–34]. В исследовании DISCOVER-FLOW бы-





ло произведено сравнение инвазивного измерения ФРК и неинвазивной модели расчета при КТ-ФРК. Было показано, что точность, чувствительность, специфичность, прогностическая ценность положительного и отрицательного результатов составили 84,3, 87,9, 82,2, 73,9 и 92,2% соответственно для ФРК-КТ (при анализе по каждой из трех коронарных артерий) [32].

Более позднее многоцентровое исследование DeFACTO включило в себя результаты 252 пациентов, у которых были изучены в общей сложности 407 коронарных сосудов и производилось изучение точности КТ-КАГ как в отдельности, так и при дополнении моделированием КТ-ФРК в сравнении с инвазивным измерением ФРК при КАГ. При этом было показано превосходство комбинации КТ-КАГ и КТ-ФРК по сравнению с простым измерением степени стеноза: точность возросла с 64 до 73%, чувствительность – с 84 до 90%, а специфичность – с 42 до 54% [30, 33, 34].

Таким образом, рассчитанные параметры КТ-ФРК обладают хорошей сопоставимостью с результатами прямого измерения ФРК и могут повышать точность КТ-КАГ в определении гемодинамической значимости пограничных коронарных стенозов.

В качестве недостатка метода указывается зависимость точности анализа и построения КТ-ФРК моделей от качества изображений. Так, неидеальное сопоставление срезов из-за артефактов от движений (степ-артефактов), эффекта “свечения” при значительном кальцинозе могут приводить к значительному снижению точности метода [35]. Вторым недостатком является тот факт, что пока для обработки не берутся данные КТ больных с выраженным кальцинозом, стентами или после аортокоронарного шунтирования [30], что существенно ограничивает широту его применения. И, в третьих, эта технология пока принадлежит единственной кампании (HeartFlow), которая продает ее для пользователей за достаточно высокую цену. По этой причине метод КТ-ФРК больше применяется в научных исследованиях, чем на практике.

## Обсуждение

Анализ опубликованных работ показывает, что применение перфузионной КТ в сочетании с КТ-КАГ повышает диагностическую точность метода и позволяет не выполнять дополнительные исследования, такие как тредмил-тест, МРТ и ОФЭКТ, без потери важной диагностической информации. КТ-КАГ, дополненная одним из видов изучения перфузии или ФРК-КТ, могут быть использованы в качестве основного метода исследования для определения гемодинамической

значимости пограничных стенозов и для сокращения время обследования пациента. В исследовании PERFECTION было показано, что площадь под ROC-кривой у комбинации разных методов была идентичной и составила для КТ-КАГ+перфузионной КТ 0,92, а для комбинации КТ-КАГ с КТ-ФРК – 0,93, против 0,89 для КТ-КАГ [17].

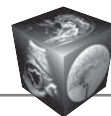
Какой метод предпочесть: один из видов КТ-перфузии или КТ-ФРК, зависит как от целей исследования, так и от доступности метода. КТ-перфузия имеет преимущество, так как она не является коммерческим продуктом и отражает индивидуальные особенности изменений миокардиального кровотока, а не расчетный кровоток по крупным коронарным сосудам.

Перфузионная КТ с фармакологической нагрузкой показала ряд преимуществ в сложных для КТ-КАГ случаях, например, при выраженном коронарном кальцинозе и у пациентов со стентами, то есть в случаях, когда может происходить переоценка истинной степени стеноза из-за артефактов [36]. Двухэнергетическая перфузионная КТ позволяет более четко определять участки с нарушенной перфузией, чем обычная КТ [26]. Проведение расчета КТ-ФРК показало преимущество у пациентов с компенсированной ишемией, многососудистым поражением и несколькими стенозами, следующими друг за другом, а также позволяет определить наличие необходимости в стентировании [37].

Для проведения стресс-перфузии необходимы современные томографы с соответствующим программным обеспечением и в идеале с широкой детекторов, позволяющих захватить все сердце, или же с двумя рентгеновскими трубками. Важен опыт врачей и среднего медицинского персонала, проводящих исследование, а также наличие вазодилататоров (в РФ для этих целей доступен только АТФ, при этом проведение исследований перфузии с его помощью не входит в зарегистрированные показания к применению). Двухэнергетические исследования перфузии превосходят по своей точности моноэнергетические, но для их проведения также требуется специальный томограф с соответствующими техническими характеристиками.

КТ-ФРК не требует дополнительного сканирования или оборудования и может быть проанализирован на основании данных стандартной КТ-КАГ хорошего качества, но эта методика требует передачи данных на сервер компании-производителя для обработки, и плата за такой анализ достаточно высока.

Спорным вопросом остается воздействие ионизирующего излучения на пациента. В совре-



менных томографах благодаря ЭКГ-управляемой модуляции дозы, снижению напряжения на рентгеновской трубке в зависимости от индекса массы тела и новым алгоритмам реконструкции удалось значительно снизить суммарную дозу облучения, а в случае моноэнергетического сканирования на двухтрубчатых системах – в 4–5 раз [38–40]. Тем не менее проведение стресс-перфузии и двухэнергетического сканирование подразумевают повторные сканирования, а значит, повышение лучевой нагрузки. Рутинные функциональные исследования, такие как тредмил-тест и МРТ, вовсе не обладают лучевой нагрузкой. В случае, если на основании комплексной оценки будет рекомендовано динамическое наблюдение или консервативное лечение, небольшое повышение лучевой нагрузки в счет сокращения общего количества исследований будет иметь явное преимущество. Если же по результатам МСКТ будут рекомендованы КАГ и стентирование, подход не всегда может быть оправданным. На данный момент не существует универсальных рекомендаций на этот счет, но часть исследователей склоняются к тому, что комплексная оценка по данным МСКТ может быть эффективна в качестве начального метода диагностики при выявлении стабильной ИБС [4, 6, 41]. Для полноценного внедрения в рутинную клиническую практику и определения более четких рекомендаций по применению отдельных видов оценки кровотока в миокарде методом МСКТ необходимо проведение дополнительных исследований с большим количеством пациентов.

### Заключение

По данным литературы, дополнительные методики КТ сердца, такие как определение ФРК и изучение перфузии миокарда, повышают точность метода в оценке степени стеноза коронарных артерий и их гемодинамической значимости и выявлении дефектов перфузии миокарда. КТ-КАГ в сочетании с перфузионной КТ представляется перспективным в качестве единого (“всё-в-одном”) метода для выявления ИБС. Такой комплексный подход позволяет существенно сократить время обследования пациента, повысить точность диагностики и выбрать оптимальный путь лечения. Актуальная задача – практическое внедрение КТ-КАГ в алгоритмы обследования пациентов с предполагаемой или имеющейся ИБС, обучение специалистов, обновление существующих клинических рекомендаций и стандартов.

### Участие авторов

Лисицкая М.В. – написание текста.  
 Мершина Е.А. – подготовка и редактирование текста.  
 Ларина О.М. – подготовка и редактирование текста.

Плотникова М.Л. – ответственность за целостность всех частей статьи.

Шляпкина О.С. – подготовка, создание опубликованной работы.

### Authors' participation

Lisitskaya M.V. – writing text.

Mershina E.A. – text preparation and editing.

Larina O.M. – text preparation and editing.

Plotnikova M.L. – responsibility for the integrity of all parts of the article.

Shlyapkina O.S. – preparation and creation of the published work.

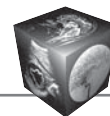
### Список литературы [References]

- Masuda Y., Naito S., Aoyagi Y. et al. Coronary artery calcification detected by CT: clinical significance and angiographic correlates. *Angiology*. 1990; 41 (12): 1037–1047. <http://doi.org/10.1177/000331979004101203>
- Budoff M.J., Dowe D., Jollis J.G. et al. Diagnostic performance of 64-multidetector row coronary computed tomographic angiography for evaluation of coronary artery stenosis in individuals without known coronary artery disease: results from the prospective multicenter ACCURACY (Assessment by Coronary Computed Tomographic Angiography of Individuals Undergoing Invasive Coronary Angiography) trial. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2008; 52 (21):1724–1732. <http://doi.org/10.1016/j.jacc.2008.07.031>.
- Ашихмин Я.И., Синицын В.Е., Плиева Н.В., Щекочихин Д.Ю., Копылов Д.Ю. Возможности компьютерной томографии сердца в стратификации риска и определении оптимальной стратегии первичной профилактики сердечнососудистых осложнений атеросклероза. *Кардиология*. 2019; 59 (6): 70–80. <http://doi.org/10.18087/cardio.2019.6.n685>.  
 Ashikhmin Ya.I., Sinitsyn V.E., Plieva N.V., Shchekochikhin D.Yu., Kopylov F.Yu. Possibilities of Computed Tomography of the Heart in Risk Stratification and Determination of Optimal Strategy of Primary Prevention of Cardiovascular Complications of Atherosclerosis. *Kardiologiya*. 2019; 59 (6):70–80. (In Russian)
- Knuuti J., Wijns W., Saraste A. et al.; ESC Scientific Document Group. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes. *Eur. Heart J.* 2020; 41 (3): 407–477. <http://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz425>
- Российское кардиологическое общество. Стабильная ишемическая болезнь сердца: Методические рекомендации. 2020, 114 с. [https://scardio.ru/content/Guidelines/2020/Clinic\\_rekom\\_IBS.pdf](https://scardio.ru/content/Guidelines/2020/Clinic_rekom_IBS.pdf)  
 Russian Society of Cardiology. Russian Society of Cardiology. Stable ischemic heart disease. Methodological recommendations. 2020, 114 p. [https://scardio.ru/content/Guidelines/2020/Clinic\\_rekom\\_IBS.pdf](https://scardio.ru/content/Guidelines/2020/Clinic_rekom_IBS.pdf)
- Knuuti J., Ballo H., Juarez-Orozco L.E. et al. The performance of non-invasive tests to rule-in and rule-out significant coronary artery stenosis in patients with stable angina: a meta-analysis focused on post-test disease probability. *Eur. Heart J.* 2018; 39 (35): 3322–3330. <http://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy267>
- Mushtaq S., Conte E., Pontone G. et al. State-of-the-art myocardial perfusion stress testing: Static CT perfusion. *J. Cardiovasc. Comput. Tomogr.* 2020; 14 (4): 294–302. <http://doi.org/10.1016/j.jcct.2019.09.002>



8. Pelgrim G.J., Dorrius M., Xie X. et al. The dream of a one-stop-shop: Meta-analysis on myocardial perfusion CT. *Eur. J. Radiol.* 2015; 84 (12): 2411–2420. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2014.12.032>.
9. Tonino P.A., Fearon W.F., De Bruyne B. et al. Angiographic versus functional severity of coronary artery stenoses in the FAME study fractional flow reserve versus angiography in multivessel evaluation. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2010; 55 (25): 2816–2821. <http://doi.org/10.1016/j.jacc.2009.11.096>
10. Hoffmann U., Ferencik M., Udelson J.E. et al.; PROMISE Investigators. Prognostic Value of Noninvasive Cardiovascular Testing in Patients With Stable Chest Pain: Insights From the PROMISE Trial (Prospective Multicenter Imaging Study for Evaluation of Chest Pain). *Circulation.* 2017; 135 (24): 2320–2332. <http://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.116.024360>
11. Rochitte C.E., George R.T., Chen M.Y. et al. Computed tomography angiography and perfusion to assess coronary artery stenosis causing perfusion defects by single photon emission computed tomography: the CORE320 study. *Eur. Heart J.* 2014; 35 (17): 1120–1130. <http://doi.org/10.1093/eurheartj/ehu488>
12. Douglas P.S., Hoffmann U., Patel M.R. et al. Outcomes of Anatomical versus Functional Testing for Coronary Artery Disease. *N. Engl. J. Med.* 2015; 372: 1291–1300. <http://doi.org/10.1056/nejmoa1415516>
13. Assen M.V., Vonder M., Pelgrim G.J. et al. Computed tomography for myocardial characterization in ischemic heart disease: a state-of-the-art review. *Eur. Radiol. Exp.* 2020; 4 (1): 36. <http://doi.org/10.1186/s41747-020-00158-1>
14. Bucher A.M., De Cecco C.N., Schoepf U.J. et al. Cardiac CT for myocardial ischaemia detection and characterization--comparative analysis. *Br. J. Radiol.* 2014; 87 (1043): 20140159. <http://doi.org/10.1259/bjr.20140159>
15. Sørgaard M.H., Kofoed K.F., Linde J.J. et al. Diagnostic accuracy of static CT perfusion for the detection of myocardial ischemia. A systematic review and meta-analysis. *J. Cardiovasc. Comput. Tomogr.* 2016; 10 (6): 450–457. <http://doi.org/10.1016/j.jcct.2016.09.003>
16. Davies J.E., Cook C.M. Is FFRCT Ready to Assume the Crown Jewels of Invasive FFR? *J. Am. Coll. Cardiol. Img.* 2017; 10 (4): 434–436. <http://doi.org/10.1016/j.jcmg.2016.06.016>
17. Pontone G., Baggiano A., Andreini D. et al. Stress Computed Tomography Perfusion Versus Fractional Flow Reserve CT Derived in Suspected Coronary Artery Disease: The PERFECTION Study. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2019; 12 (8, Pt 1): 1487–1497. <http://doi.org/10.1016/j.jcmg.2018.08.023>
18. Kurata A., Mochizuki T., Koyama Y. et al. Myocardial perfusion imaging using adenosine triphosphate stress multi-slice spiral computed tomography: alternative to stress myocardial perfusion scintigraphy. *Circ. J.* 2005; 69 (5): 550–557. <http://doi.org/10.1253/circj.69.550>
19. Maffei E., Martini C., Rossi A. et al. Diagnostic accuracy of second-generation dual-source computed tomography coronary angiography with iterative reconstructions: a real-world experience. *Radiol. Med.* 2012; 117 (5): 725–738. <http://doi.org/10.1007/s11547-011-0754-x>
20. Cademartiri F., Seitun S., Clemente A. et al. Myocardial blood flow quantification for evaluation of coronary artery disease by computed tomography. *Cardiovasc. Diagn. Ther.* 2017; 7 (2): 129–150. <http://doi.org/10.21037/cdt.2017.03.22>
21. Lu M., Wang S., Sirajuddin A. et al. Dynamic stress computed tomography myocardial perfusion for detecting myocardial ischemia: A systematic review and meta-analysis. *Int. J. Cardiol.* 2018; 258: 325–331. <http://doi.org/10.1016/j.ijcard.2018.01.095>.
22. Hounsfield G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system. *Br. J. Radiol.* 1973; 46 (552):1016–1022. <http://doi.org/10.1259/0007-1285-46-552-1016>
23. Danad I., Fayad Z.A., Willemink M.J., Min J.K. New Applications of Cardiac Computed Tomography: Dual-Energy, Spectral, and Molecular CT Imaging. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2015; 8 (6): 710–723. <http://doi.org/10.1016/j.jcmg.2015.03.005>
24. Jin K.N., De Cecco C.N., Caruso D. et al. Myocardial perfusion imaging with dual energy CT. *Eur. J. Radiol.* 2016; 85 (10): 1914–1921. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2016.06.023>
25. Wang R., Yu W., Wang Y. et al. Incremental value of dual-energy CT to coronary CT angiography for the detection of significant coronary stenosis: comparison with quantitative coronary angiography and single photon emission computed tomography. *Int. J. Cardiovasc. Imaging.* 2011; 27 (5): 647–656. <http://doi.org/10.1007/s10554-011-9881-7>
26. Ko S.M., Choi J.W., Hwang H.K. et al. Diagnostic performance of combined noninvasive anatomic and functional assessment with dual-source CT and adenosine-induced stress dual-energy CT for detection of significant coronary stenosis. *Am. J. Roentgenol.* 2012; 198 (3): 512–520. <http://doi.org/10.2214/AJR.11.7029>
27. Yamada M., Jinzaki M., Kuribayashi S. et al. Beam-hardening correction for virtual monochromatic imaging of myocardial perfusion via fast-switching dual-kVp 64-slice computed tomography: a pilot study using a human heart specimen. *Circ. J.* 2012; 76 (7): 1799–1801. <http://doi.org/10.1253/circj.CJ-12-0463>
28. Bundhun P.K., Yanamala C.M., Huang F. Comparing the adverse clinical outcomes associated with fraction flow reserve-guided versus angiography-guided percutaneous coronary intervention: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *BMC Cardiovasc. Disord.* 2016; 16 (1): 249. <http://doi.org/10.1186/s12872-016-0427-8>
29. Ko B.S., Cameron J.D., Munnur R.K. et al. Noninvasive CT-Derived FFR Based on Structural and Fluid Analysis: A Comparison With Invasive FFR for Detection of Functionally Significant Stenosis. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2017; 10 (6): 663–673. <http://doi.org/10.1016/j.jcmg.2016.07.005>
30. Taylor C.A., Fonte T.A., Min J.K. Computational fluid dynamics applied to cardiac computed tomography for noninvasive quantification of fractional flow reserve: scientific basis. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2013; 61 (22): 2233–2241. <http://doi.org/10.1016/j.jacc.2012.11.083>
31. Tonino P.A., De Bruyne B., Pijls N.H. et al.; FAME Study Investigators. Fractional flow reserve versus angiography for guiding percutaneous coronary intervention. *N. Engl. J. Med.* 2009; 360 (3): 213–224. [http://doi.org/10.1016/s0145-4145\(09\)79763-1](http://doi.org/10.1016/s0145-4145(09)79763-1)
32. Ko B.S., Linde J.J., Ildayhid A.R. et al. Non-invasive CT-derived fractional flow reserve and static rest and stress CT myocardial perfusion imaging for detection of haemodynamically significant coronary stenosis. *Int. J. Cardiovasc. Imaging.* 2019; 35 (11): 2103–2112. <http://doi.org/10.1007/s10554-019-01658-x>





33. Zhuang B., Wang S., Zhao S. et al. GW29-e1123 Computed Tomography Angiography-Derived Fractional Flow Reserve (CT-FFR) for the Detection of Myocardial Ischemia-with Invasive Fractional Flow Reserve as Reference: Systematic Review and Meta-Analysis. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2018; 72 (16\_Suppl.) C200–C201. <http://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.08.874>
34. Zhuang B., Wang S., Zhao S., Lu M. Computed tomography angiography-derived fractional flow reserve (CT-FFR) for the detection of myocardial ischemia with invasive fractional flow reserve as reference: systematic review and meta-analysis. *Eur. Radiol.* 2020; 30 (2): 712–725. <http://doi.org/10.1007/s00330-019-06470-8>.
35. Abbara S., Blanke P., Maroules C.D. et al. SCCT guidelines for the performance and acquisition of coronary computed tomographic angiography: A report of the society of Cardiovascular Computed Tomography Guidelines Committee: Endorsed by the North American Society for Cardiovascular Imaging (NASCI). *J. Cardiovasc. Comput. Tomogr.* 2016; 10 (6): 435–449. <http://doi.org/10.1016/j.jcct.2009.03.004>
36. Sharma R.K., Arbab-Zadeh A., Kishi S. et al. Incremental diagnostic accuracy of computed tomography myocardial perfusion imaging over coronary angiography stratified by pre-test probability of coronary artery disease and severity of coronary artery calcification: The CORE320 study. *Int. J. Cardiol.* 2015; 201: 570–577. <http://doi.org/10.1016/j.ijcard.2015.05.110>
37. Koo B.K., Erglis A., Doh J.H. et al. Diagnosis of ischemia-causing coronary stenoses by noninvasive fractional flow reserve computed from coronary computed tomographic angiograms. Results from the prospective multicenter DISCOVER-FLOW (Diagnosis of Ischemia-Causing Stenoses Obtained Via Noninvasive Fractional Flow Reserve) study. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2011 Nov 1;58(19): 1989–1997. <http://doi.org/10.1016/j.jacc.2011.06.066>.
38. Синицын В.Е., Глазкова М.А., Мершина Е.А., Архипова И.М. Возможности снижения лучевой нагрузки при проведении мСКТ коронарографии: использование адаптивной статистической итеративной реконструкции. *Ангиология и сосудистая хирургия.* 2012; 18 (3): 44–49.  
Sinitsyn V.E., Glazkova M.A., Meršina E.A., Arhipova I.M.. Possibilities of decreasing radiation load during MSRT coronary angiography: using adaptive statistic iterative reconstruction. *Angiology and Vascular Surgery.* 2012; 18 (3): 44–49. (In Russian)
39. Маткевич Е.И., Синицын В.Е., Зеликман М.И., Кручинин С.А., Иванов И.В. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии. *REJR.* 2018; 8 (3), 60–73. <http://doi.org/10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73>  
Matkevich E.I., Sinitsyn V.E., Zelikman M.I., Kruchinin S.A., Ivanov I.V. Main directions of reducing patient irradiation doses in computed tomography. *REJR.* 2018; 8 (3), 60–73. <http://doi.org/10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73> (In Russian)
40. Kerl J.M., Bauer R.W., Maurer T.B. et al. Dose levels at coronary CT angiography - a comparison of Dual Energy-, Dual Source- and 16-slice CT. *Eur. Radiol.* 2011; 21 (3): 530–537. <http://doi.org/10.1007/s00330-010-1954-9>
41. Task Force on Myocardial Revascularization of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS); European Association for Percutaneous Cardiovascular Interventions (EAPCI), Wijns W., Kolh P., Danchin N. et al. Guidelines on myocardial revascularization. *Eur. Heart J.* 2010; 31 (20): 2501–2555. <http://doi.org/10.1093/eurheartj/ehq277>

**Для корреспонденции\*:** Лисицкая Мария Валерьевна – 119192 Москва, Ломоносовский проспект, 27, к. 10. МНОЦ МГУ имени М.В. Ломоносова. Тел.: +7-196-550-88-11. E-mail: lissenok@inbox.ru

**Лисицкая Мария Валерьевна** – канд. мед. наук, врач-рентгенолог отделения рентгенодиагностики с кабинетами КТ и МРТ МНОЦ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-8402-7643>; Scopus ID 57210604921

**Мершина Елена Александровна** – канд. мед. наук, заведующая отделением рентгенодиагностики с кабинетами КТ и МРТ МНОЦ МГУ имени М.В. Ломоносова; доцент кафедры лучевой диагностики факультета фундаментальной медицины МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-1266-4926>. Scopus ID 12787891900

**Ларина Ольга Михайловна** – канд. мед. наук, врач-рентгенолог, отделения рентгенодиагностики с кабинетами КТ и МРТ, МНОЦ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-2484-5249>

**Плотникова Мария Леонидовна** – врач-рентгенолог отделения рентгенодиагностики с кабинетами КТ и МРТ МНОЦ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-7533-9867>

**Шляпкина Ольга Сергеевна** – врач-рентгенолог отделения рентгенодиагностики с кабинетами КТ и МРТ МНОЦ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-1435-4729>

**Contact\*:** Maria V. Lisitskaya – 27-10, Lomonosovsky prospekt, 119192, Moscow, Russian Federation. Medical Research and Education Center of Lomonosov Moscow State University. Phone: +7-196-550-88-11. E-mail: lissenok@inbox.ru

**Maria V. Lisitskaya** – Cand. of Sci. (Med.), Radiologist at Radiology department with CT and MRI, Medical Research and Educational Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-8402-7643>. Scopus ID 57210604921

**Elena A. Meršina** – Cand. of Sci. (Med.), Head of Radiology department with CT and MRI, Medical Research and Educational Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-1266-4926>. Scopus ID 12787891900

**Olga M. Larina** – Cand. of Sci. (Med.), Radiologist at Radiology department with CT and MRI, Medical Research and Educational Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-2484-5249>

**Maria L. Plotnikova** – Radiologist at Radiology department with CT and MRI, Medical Research and Educational Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-7533-9867>

**Olga S. Shlyapkina** – Radiologist at Radiology department with CT and MRI, Medical Research and Educational Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-1435-4729>