

# Современные методики оценки физиологической значимости стенозирующих поражений коронарных артерий

О.Ю. Миронова<sup>✉1</sup>, Г.О. Исаев<sup>1</sup>, М.В. Бердышева<sup>1</sup>, Р.М. Шахнович<sup>2</sup>, В.В. Фомин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия;

<sup>2</sup>ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии им. акад. Е.И. Чазова» Минздрава России, Москва, Россия

## Аннотация

В статье описаны основные методы определения степени значимости стенозирующего поражения коронарных артерий, их применимость в клинической практике и будущие перспективы. Обсуждены новые методы диагностики, которые на данный момент находятся в стадии научной разработки и представляют клинический интерес при дальнейшем использовании.

**Ключевые слова:** атеросклероз, ишемия, стеноз коронарных артерий, ишемическая болезнь сердца, фракционный резерв кровотока, стресс-эхокардиография, компьютерная томография, внутрисосудистое ультразвуковое исследование, внутрисосудистый градиент ослабления контрастирования, коронарография

**Для цитирования:** Миронова О.Ю., Исаев Г.О., Бердышева М.В., Шахнович Р.М., Фомин В.В. Современные методики оценки физиологической значимости стенозирующих поражений коронарных артерий. Терапевтический архив. 2023;95(4):341–346. DOI: 10.26442/00403660.2023.04.202169

© ООО «КОНСИЛИУМ МЕДИКУМ», 2023 г.

REVIEW

## Modern methods of assessment of physiological significance of coronary lesions: A review

Olga Iu. Mironova<sup>✉1</sup>, Georgy O. Isaev<sup>1</sup>, Maria V. Berdysheva<sup>1</sup>, Roman M. Shakhnovich<sup>2</sup>, Victor V. Fomin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia;

<sup>2</sup>Chazov National Medical Research Center of Cardiology, Moscow, Russia

## Abstract

The article describes the main methods of assessment of physiological significance of coronary artery stenoses, their use in clinical practice and future perspectives. New diagnostic methods that are currently under research are discussed.

**Keywords:** atherosclerosis, ischemia, coronary artery stenosis, coronary artery disease, functional flow reserve, stress-echocardiography, intravascular ultrasound, transluminal attenuation gradient, coronary angiography

**For citation:** Mironova OIu, Isaev GO, Berdysheva MV, Shakhnovich RM, Fomin VV. Modern methods of assessment of physiological significance of coronary lesions: A review. *Terapevticheskii Arkhiv (Ter. Arkh.)*. 2023;95(4):341–346. DOI: 10.26442/00403660.2023.04.202169

Оценка гемодинамической значимости степени сужения коронарных артерий вследствие атеросклероза является основой для определения тактики лечения больных с ишемической болезнью сердца (ИБС). Не всегда получен-

ные сведения о коронарной анатомии позволяют достоверно судить о физиологической значимости стенозов, в особенности в случае так называемых «пограничных» стенозов.

## Информация об авторах / Information about the authors

✉ **Миронова Ольга Юрьевна** – д-р мед. наук, проф. каф. факультетской терапии №1 Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет).

E-mail: mironova\_o\_yu@staff.sechenov.ru.

ORCID: 0000-0002-5820-1759

**Исаев Георгий Олегович** – клин. ординатор каф. факультетской терапии №1 Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет). ORCID: 0000-0002-4871-8797

**Бердышева Мария Валерьевна** – студентка ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет). ORCID: 0000-0002-3393-6863

**Шахнович Роман Михайлович** – д-р мед. наук, вед. науч. сотр. отд. неотложной кардиологии, проф. отд. высшего и дополнительного профессионального образования ФГБУ «НМИЦ кардиологии им. акад. Е.И. Чазова». ORCID: 0000-0003-3248-0224

**Фомин Виктор Викторович** – чл.-кор. РАН, д-р мед. наук, проф., проректор по клинической работе и дополнительному профессиональному образованию, зав. каф. факультетской терапии №1 Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет). ORCID: 0000-0002-2682-4417

✉ **Olga Iu. Mironova**. E-mail: mironova\_o\_yu@staff.sechenov.ru. ORCID: 0000-0002-5820-1759

**Georgy O. Isaev**. ORCID: 0000-0002-4871-8797

**Maria V. Berdysheva**. ORCID: 0000-0002-3393-6863

**Roman M. Shakhnovich**. ORCID: 0000-0003-3248-0224

**Victor V. Fomin**. ORCID: 0000-0002-2682-4417

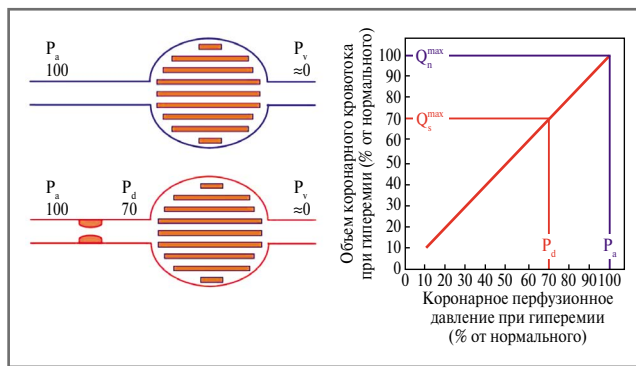


Рис. 1. Концепция измерения ФРК [4].

Примечание.  $P_a$  – аортальное давление,  $P_d$  – давление после исследуемого стеноза,  $P_v$  – венозное давление,  $Q_n^{\max}$  – максимальный кровоток в норме,  $Q_s^{\max}$  – максимальный кровоток при наличии стеноза.

Fig. 1. Concept of fractional flow reserve measurement [4].

В настоящее время повышенное внимание уделяется стоимости проведения тех или иных исследований и вмешательств, поэтому экономически и клинически эффективная оценка значимости стенозов коронарных артерий у пациентов с ИБС играет важную роль.

В соответствии с современными рекомендациями для уточнения функциональной значимости выявленных сужений коронарных артерий чаще всего прибегают к проведению неинвазивных функциональных тестов (таких как одnofотонная эмиссионная компьютерная томография – КТ, стресс-эхокардиография – стресс-ЭхоКГ и др.) для определения показаний к проведению инвазивной коронарной ангиографии (КАГ) и последующей реваскуляризации [1, 2]. Следствием неточностей в неинвазивной диагностике ИБС является большое число случаев проведения КАГ пациентам без сужений коронарных артерий вовсе либо со стенозами, не являющимися причиной ишемии [3].

В нашей статье мы постарались описать основные существующие на сегодня методы диагностики поражения коронарных артерий.

### Инвазивные методы оценки значимости стенотических поражений коронарного русла

Определение фракционного резерва кровотока (ФРК) – инвазивный метод определения гемодинамической значимости стеноза коронарной артерии, который при определенной степени выраженности может говорить о наличии ишемии миокарда.

ФРК является «золотым стандартом» в определении гемодинамической значимости «пограничных» стенозов [4].

В условиях катетеризационной лаборатории обычно трудно измерить кровоток и отношения тока крови непосредственно. Использование проводника с датчиком давления на конце на высоте максимальной гиперемии позволяет рассчитать соотношение объема кровотока на максимуме гиперемии и в покое. Основные принципы измерения ФРК представлены на рис. 1.

Во время максимальной гиперемии перфузионное давление миокарда прямо пропорционально миокардиальному кровотоку, отношение максимального стенотического и максимального нормального кровотока может быть выражено как отношение дистального коронарного давления и нормального давления на пике гиперемии. Значение ФРК меньше 0,75–0,8 указывает на ишемию миокарда [5].

Использование ФРК для оценки стенозов при остром коронарном синдроме является вопросом дискуссии. В одних исследованиях показано, что результаты вмешательств, которые опирались на ФРК, оказались достоверно лучше вмешательств, показания к которым сформулированы исключительно по результатам КАГ [6–10]. В других исследованиях [11–13] обнаружено, что применение чрескожного коронарного вмешательства с ФРК во время острого коронарного синдрома ухудшает прогноз пациентов в сравнении с реваскуляризацией в плановом порядке. Вопрос необходимости чрескожного коронарного вмешательства с ФРК неинфаркт-связанных артерий является предметом споров и требует дальнейшего изучения.

### Неинвазивные методы оценки ишемии

При проведении количественной оценки стенотических поражений коронарных артерий рекомендации Общества сердечно-сосудистой компьютерной томографии [14] говорят ориентироваться на процент максимального диаметра стеноза. Предложены следующие степени выраженности стенотических поражений:

- нормальная артерия, отсутствие бляшки;
- минимальный стеноз (<25%);
- незначительный стеноз (25–49%);
- умеренный стеноз (50–69%);
- тяжелый стеноз (70–99%);
- окклюзия.

Указанные рамки предложены на основании результатов исследований, сравнивающих данные компьютерной томографической ангиографии (КТА) и инвазивной КАГ, которые продемонстрировали, что различия в степени стеноза по оценкам двух методов могут составлять  $\pm 25\%$  в лучшем случае [15, 16].

Основные современные методики представлены на рис. 2.

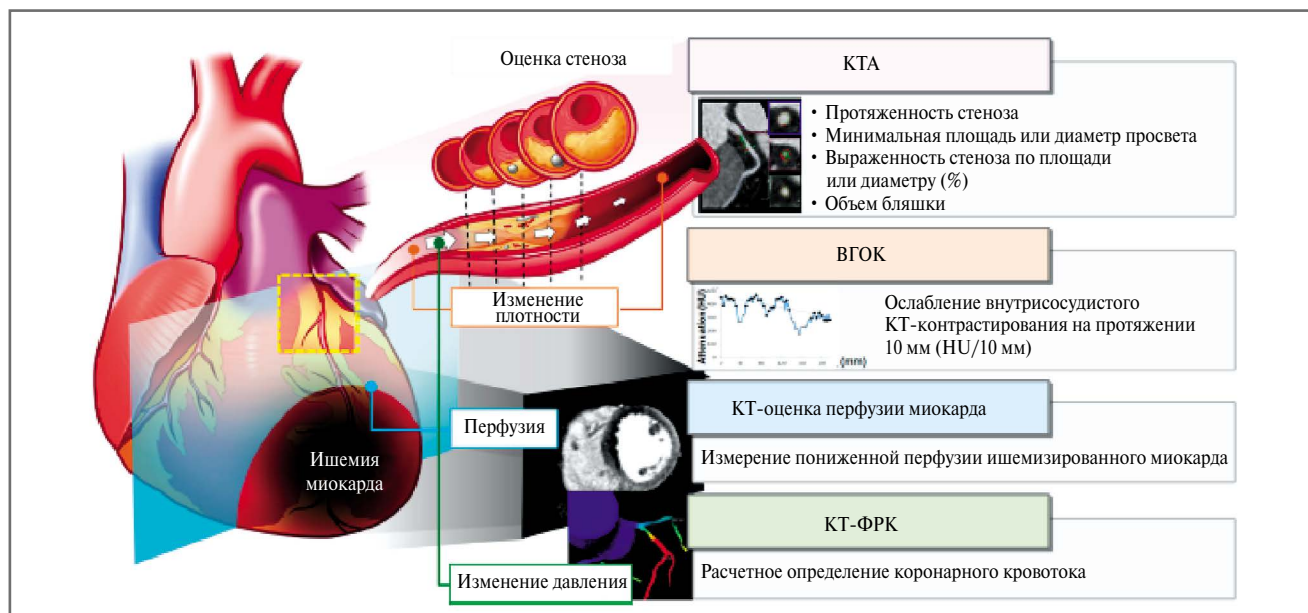
### Исследование перфузии миокарда с использованием КТ

Оценка перфузии миокарда с помощью КТ позволяет определить показания к проведению реваскуляризации коронарных артерий у больных со стабильной ИБС, с помощью чего можно объективно оценить участки ишемии миокарда, оптимизировать тактику лечения и улучшить прогноз [18]. Снижение перфузии ишемизированного миокарда выглядит как участок с пониженной концентрацией контрастного препарата в миокарде [19]. Для получения лучшего качества результатов, как и при проведении других исследований для оценки перфузии миокарда, гиперемию вызывают с помощью введения вазодилаторов (аденозина, дипиридамола, регаденосона) [20].

В зависимости от продолжительности и количества записанных КТ-изображений во время одной инъекции контрастного препарата выделяют динамический и статический режимы сканирования для оценки перфузии миокарда [17].

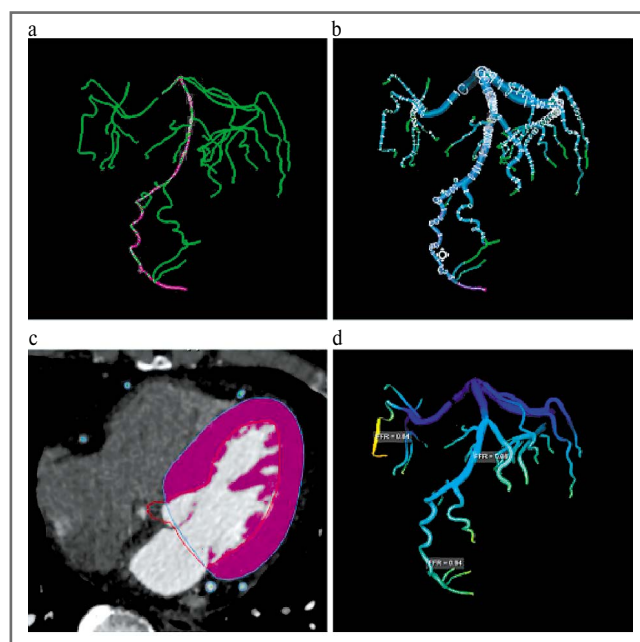
Динамическая оценка перфузии миокарда основывается на получении нескольких КТ-изображений в соответствии с кривой временного ослабления контрастирования, количество которых отличается у различных фирм-производителей [17, 21]. Статический режим подразумевает получение совокупности проекций, зарегистрированных на пике контрастирования миокарда одномоментно [22, 23].

Динамическое сканирование позволяет точнее определять участки ишемии миокарда, особенно в случае наличия «пограничных» стенозов и при многососудистом



**Рис. 2. Неинвазивные методы оценки ишемии миокарда: КТА, ВГОК, КТ-оценка перфузии миокарда, КТ-ФРК [17].**

**Fig. 2. Non-invasive methods for assessing myocardial ischemia: computed tomographic angiography, intravascular gradient of contrast-enhancement attenuation, CT assessment of myocardial perfusion, CT of fractional flow reserve [17].**



**Рис. 3. Определение ФРК с использованием МСКТ (КТ-ФРК):** *a* – первым этапом создается схема осевого хода коронарных артерий с использованием программного обеспечения рабочей станции; *b* – на втором этапе после реконструкции просвета коронарных артерий конфигурация сосудистого русла может несколько измениться; *c* – после получения информации о массе миокарда производится расчет и реконструкция КТ-ФРК (*d*).

**Fig. 3. Measurement of fractional flow reserve using multispiral CT (CT of fractional flow reserve):** *a* – the first step is to visualize a scheme of axial coronary arteries using the workstation software; *b* – at the second step, after the reconstruction of the coronary artery lumen, the configuration of the vascular bed may change somewhat; *c* – after the measurement of the myocardium mass, the CT fractional flow reserve is calculated and reconstructed (*d*).

поражении коронарных артерий, так как этот метод позволяет количественно оценить кровоток в миокарде [17]. Статический режим обладает другими преимуществами, в частности более низкой дозой облучения и сокращенным временем проведения исследования.

В нашей стране разработан уникальный метод оценки перфузии миокарда с пограничным стенозированием коронарного русла с использованием чреспищеводной электрокардиостимуляции в качестве нагрузочной пробы. В качестве контроля всем пациентам проведена инвазивная оценка ФРК. Исследование продемонстрировало высокую специфичность и положительную прогностическую ценность результата при ФРК-значимых стенозах, что делает возможным использование чреспищеводной электрокардиостимуляции в качестве стресс-теста при перфузионной КТ при оценке пограничных стенозов коронарных артерий [24].

**Оценка ФРК с использованием мультиспиральной КТ коронарных артерий (КТ-ФРК)**

ФРК широко применяется для оценки физиологической значимости стенотических поражений коронарных артерий при проведении инвазивной КАГ [25–27]. В настоящее время развиваются системы компьютерного моделирования гемодинамики, позволяющие описывать кровоток в коронарных артериях с помощью системы уравнений и алгоритмов машинного обучения. Компьютерная обработка позволяет с высокой точностью анализировать коронарный кровоток у пациентов [28].

Состояние гиперемии моделируется с учетом полученных данных мультиспиральной КТ (МСКТ) в покое и показателей микрососудистого сопротивления конкретного больного, основываясь на модели феномена вазодилатации [29].

Оценка ФРК с использованием МСКТ (КТ-ФРК) осуществляется после моделирования с помощью «внешнего» суперкомпьютера [29–31] (рис. 3). По данным одноцентрового ретроспективного анализа, расчет КТ-ФРК непосредственно в лаборатории, где проводится исследование, на

независимой рабочей станции имеет удовлетворительную диагностическую точность [30].

### **Оценка внутрисосудистого градиента ослабления контрастирования**

КТА нередко страдает от недостаточной специфичности и большого количества артефактов при проведении исследований (например, из-за отложений кальция в стенке сосудов) [32]. В связи с этим применяются различные методы, которые позволяют увеличить диагностическую ценность КТА, одним из них является оценка внутрисосудистого градиента ослабления контрастирования (ВГОК).

В основе ВГОК лежит гипотеза о том, что в присутствии функционально значимого стеноза контрастирование сосуда линейно ослабевает от проксимального к дистальному сегменту [31]. Показатель определяется как коэффициент регрессии и отражает степень ослабления контрастирования сосуда в единицах Хаунсфилда (HU), как правило, на протяжении участка в 10 мм. Чем сильнее степень ослабления контрастирования, тем более выражено сужение сосуда.

Методика сопряжена с рядом технических трудностей. Обнаружено, что значения ВГОК зависят от ряда показателей, таких как сердечный выброс и время проведения КТ после введения контрастного вещества [33, 34]. Без учета этих вводных интерпретация данных может быть затрунена и получен ложный результат.

Группой ученых из Швеции проводилось сравнение КТА с оценкой ВГОК и инвазивной ФРК, по результатам исследования сделан вывод, что оценка ВГОК не увеличивает диагностической ценности КТА для оценки степени тяжести стенозов [30].

Данные об эффективности ВГОК в диагностике противоречивы. Метод обладает меньшей предсказательной значимостью, чем КТ-ФРК [35, 36], но в то же время имеет перспективы сравниться в диагностической ценности с указанными способами диагностики, такими как инвазивная ФРК [37]. Возможно, необнадеживающие и противоречивые результаты исследований связаны с тем, что на настоящее время не разработаны протоколы и стандарты проведения оценки ВГОК, что могло бы увеличить ее диагностическую ценность.

### **Перфузионная сцинтиграфия миокарда**

Метод является наиболее доступным для применения в клинической практике врача для оценки кровоснабжения ткани миокарда при пограничных стенозах на уровне микроциркуляторного русла и клеточной перфузии, что невозможно сделать с помощью других методов диагностики, в том числе ФРК [38, 39]. Во время исследования внутривенно вводят радиофармпрепарат (хлорид таллия-201, технеций-99m), который распределяется по тканям миокарда с учетом коронарного кровотока и микроциркуляторного русла. Оценка перфузии только в состоянии покоя обладает низкой диагностической ценностью [40, 41], поэтому исследование проводят также после нагрузочных проб. К сожалению, в Российской Федерации методы радиоизотопной диагностики ишемии не находят широкого применения в связи как с дороговизной проведения исследования, так и необходимостью специальных генераторов изотопов и их доставки к местам проведения исследований [42].

### **Стресс-ЭхоКГ**

Наиболее распространенным и доступным методом диагностики в клинической практике является стресс-ЭхоКГ [42].

Для индуцирования стрессовой реакции миокарда наиболее часто применяются: физическая нагрузка (трек-мил-тест, велоэргометрия); фармакологические тесты с добутамином, аденозином, дипиридамолом; электрическая стимуляция миокарда [43–46]. Наиболее удобным является метод с применением фармакологических проб, так как в данном случае возможен постоянный эхомониторинг функции миокарда без ограничений, возникающих при пробах с физическими нагрузками [44].

Отдельно следует выделить стресс-ЭхоКГ с миокардиальной перфузией. Метод позволяет обнаружить участки ишемизированного миокарда до появления нарушений его сократимости [47]. Стресс-ЭхоКГ с миокардиальной перфузией обладает особой ценностью при наличии уже существующих нарушений сократимости миокарда (например, при блокаде левой ножки пучка Гиса) [48]. Во время исследования вводится эхоконтрастное вещество в покое и на высоте нагрузки, которое распределяется по миокарду, по равномерности распределения контрастного вещества судят о наличии зон гипоперфузии миокарда, т.е. об ишемизированных участках миокарда.

### **Заключение**

Отсутствие «золотого стандарта» неинвазивной диагностики значимого поражения коронарного русла приводит к большому количеству необоснованных инвазивных вмешательств, проведение которых может сопровождаться потенциальными осложнениями. Перечисленные выше методы обладают различными преимуществами и недостатками, но не могут полностью закрыть потребности в диагностике.

Для оценки поражения коронарных артерий «золотым стандартом» по-прежнему остается коронарография с оценкой ФРК [1]. Разработка универсального неинвазивного метода диагностики стала бы существенной вехой в развитии методов диагностики и определении тактики лечения больных с ИБС.

**Раскрытие интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Disclosure of interest.** The authors declare that they have no competing interests.

**Вклад авторов.** Авторы декларируют соответствие своего авторства международным критериям ICMJE. Все авторы в равной степени участвовали в подготовке публикации: разработка концепции статьи, получение и анализ фактических данных, написание и редактирование текста статьи, проверка и утверждение текста статьи.

**Authors' contribution.** The authors declare the compliance of their authorship according to the international ICMJE criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

**Источник финансирования.** Авторы декларируют отсутствие внешнего финансирования для проведения исследования и публикации статьи.

**Funding source.** The authors declare that there is no external funding for the exploration and analysis work.

## Список сокращений

ВГОК – внутрисосудистый градиент ослабления контрастирования  
 ИБС – ишемическая болезнь сердца  
 КАГ – коронарная ангиография  
 КТ – компьютерная томография

КТА – компьютерная томографическая ангиография  
 МСКТ – мультиспиральная компьютерная томография  
 Стресс-ЭхоКГ – стресс-эхокардиография  
 ФПК – фракционный резерв кровотока

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Knuuti J, Wijns W, Saraste A, et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes: The Task Force for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur Heart J*. 2020;41(3):407-7. DOI:10.1093/eurheartj/ehz425
- Neumann FJ, Sousa-Uva M, Ahlsson A, et al. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization. *Eur Heart J*. 2019;40(2):87-165. DOI:10.1093/eurheartj/ehy394
- Groepenhoff F, Klaassen RGM, Valstar GB, et al. Evaluation of non-invasive imaging parameters in coronary microvascular disease: a systematic review. *BMC Med Imaging*. 2021;21(5). DOI:10.1186/s12880-020-00535-7
- Hwang D, Yang S, Zhang J, Koo BK. Physiologic Assessment after Coronary Stent Implantation. *Korean Circ J*. 2021;51(3):189-201. DOI:10.4070/kcj.2020.0548
- Миронов В.М., Меркулов Е.В., Самко А.Н. Оценка фракционного резерва кровотока. *Кардиология*. 2012;8(52):66-71 [Mironov VM, Merkulov EV, Samko AN. Assessment of Fractional Coronary Blood Flow Reserve. *Kardiologiya*. 2012;8(52):66-71 (in Russian)].
- Kim YH, Ahn JM, Park DW, et al. Impact of ischemia-guided revascularization with myocardial perfusion imaging for patients with multivessel coronary disease. *J Am Coll Cardiol*. 2012;60(3):181-90. DOI:10.1016/j.jacc.2012.02.061
- Toma M, Buller CE, Westerhout CM, et al. Non-culprit coronary artery percutaneous coronary intervention during acute ST-segment elevation myocardial infarction: insights from the APEX-AMI trial. *Eur Heart J*. 2010;31:1701-7. DOI:10.1093/eurheartj/ehq129
- Hassanin A, Brener SJ, Lansky AJ, et al. Prognostic impact of multivessel versus culprit vessel only percutaneous intervention for patients with multivessel coronary artery disease presenting with acute coronary syndrome. *EuroIntervention*. 2015;11:293-300. DOI:10.4244/EIJY14M08\_05
- Smits PC, Abdel-Wahab M, Neumann FJ, et al. Fractional flow reserve-guided multivessel angioplasty in myocardial infarction. *N Engl J Med*. 2017;376:1234-44. DOI:10.1056/NEJMoal701067
- Engstrom T, Kelbaek H, Helqvist S, et al. Complete revascularisation versus treatment of the culprit lesion only in patients with ST-segment elevation myocardial infarction and multivessel disease (DANAMI-3-PRIMULTI): an open-label, randomised controlled trial. *Lancet*. 2015;386:665-71. DOI:10.1016/s0140-6736(15)60648-1
- Escaned J, Ryan N, Mejia-Renteria H, et al. Safety of the deferral of coronary revascularization on the basis of instantaneous wave-free ratio and fractional flow reserve measurements in stable coronary artery disease and acute coronary syndromes. *J Am Coll Cardiol Interv*. 2018;11:1437-49. DOI:10.1016/j.jcin.2018.05.029
- Hakeem A, Edupuganti MM, Almomani A, et al. Long-term prognosis of deferred acute coronary syndrome lesions based on nonischemic fractional flow reserve. *J Am Coll Cardiol*. 2016;68:1181-91. DOI:10.1016/j.jacc.2016.06.035
- Cerrato E, Mejia-Renteria H, Dehbi HM, et al. Revascularization deferral of nonculprit stenoses on the basis of fractional flow reserve: 1-year outcomes of 8,579 patients. *J Am Coll Cardiol Interv*. 2020;13:1894-903. DOI:10.1016/j.jcin.2020.05.024
- Leipsic J, Abbara S, Achenbach S, et al. SCCT guidelines for the interpretation and reporting of coronary CT angiography: a report of the Society of Cardiovascular Computed Tomography Guidelines Committee. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2014;8(5):342-58. DOI:10.1016/j.jcct.2014.07.003
- Wu Z, He Y, Li W, Cheng S. Computed tomography coronary angiography vs. standard diagnostic procedure for the diagnosis of angina due to coronary heart disease: A cross-sectional study. *Exp Ther Med*. 2019;17(4):2485-94. DOI:10.3892/etm.2019.7229
- Eltabbakh AR, Dawoud MA, Langer M, et al. 'Triple-rule-out' CT angiography for clinical decision making and early triage of acute chest pain patients: use of 320-multislice CT angiography. *Egypt J Radiol Nucl Med*. 2019;50:3. DOI:10.1186/s43055-019-0003-1
- Koo HJ, Yang DH, Kim YH, et al. CT-based myocardial ischemia evaluation: quantitative angiography, transluminal attenuation gradient, myocardial perfusion, and CT-derived fractional flow reserve. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2016;32:1-19. DOI:10.1007/s10554-015-0825-5
- Takx RA, Blomberg BA, El Aidi H, et al. Diagnostic accuracy of stress myocardial perfusion imaging compared to invasive coronary angiography with fractional-flow reserve meta-analysis. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2015;8(1):e002666. DOI:10.1161/circimaging.114.002666
- Newhouse JH, Murphy RX Jr. Tissue distribution of soluble contrast: effect of dose variation and changes with time. *AJR Am J Roentgenol*. 1981;136(3):463-7. DOI:10.2214/ajr.136.3.463
- Yang DH, Kim YH. CT myocardial perfusion imaging: current status and future perspectives. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2017;33:1009-20. DOI:10.1007/s10554-017-1102-6
- Yun CH, Hung CL, Wen MS, et al. CT Assessment of Myocardial Perfusion and Fractional Flow Reserve in Coronary Artery Disease: A Review of Current Clinical Evidence and Recent Developments. *Korean J Radiol*. 2021;22(11):1749-63. DOI:10.3348/kjr.2020.1277
- Nørgaard BL, Leipsic J, Gaur S, et al. Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography in suspected coronary in suspected coronary artery disease: the NXT trial (Analysis of Coronary Blood Flow Using CT Angiography: Next steps). *J Am Coll Cardiol*. 2014;63(12):1145-55. DOI:10.1016/j.jacc.2013.11.043
- Bettencourt N, Chiribiri A, Schuster A, et al. Direct comparison of cardiac magnetic resonance and multidetector computed tomography stress-rest perfusion imaging for detection of coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol*. 2013;61(10):1099-107. DOI:10.1016/j.jacc.2012.12.020
- Омаров Ю.А., Веселова Т.Н., Шахнович Р.М., и др. Перфузионная компьютерная томография миокарда с чреспищеводной электрокардиостимуляцией в качестве стресс-теста у больных с пограничными стенозами в коронарных артериях: сравнение с измерениями фракционного резерва кровотока. *Кардиология*. 2021;61(1):4-11 [Omarov YuA, Veselova TN, Shakhnovich RM, et al. Computed Tomography Myocardial Perfusion Imaging With Transesophageal Atrial Pacing Stress Test in Patients With Borderline Stenoses in the Coronary Arteries: a Comparison With Fractional Flow Reserve. *Kardiologiya*. 2021;61(1):4-11 (in Russian)]. DOI:10.18087/cardio.2021.1.n1343
- Kim YH, Park SJ. Ischemia-guided percutaneous coronary intervention for patients with stable coronary artery disease. *Circ J*. 2013;77(8):1967-74. DOI:10.1253/circj.13-0376
- Coughlan JJ, MacDonnell C, Arnous S, Kiernan TJ. Fractional flow reserve in 2017: current data and everyday practice. *Exp Rev Cardiovasc Ther*. 2017;15(6):457-72. DOI:10.1080/14779072.2017.1327810
- De Bruyne B, Pijls NH, Kalesan B, et al. Fractional flow reserve-guided PCI versus medical therapy in stable coronary disease. *N Engl J Med*. 2012;367(11):991-1001. DOI:10.1056/nejmx120078
- Liu X, Mo X, Zhang H, et al. A 2-year investigation of the impact of the computed tomography-derived fractional flow reserve calculated using a deep learning algorithm on routine decision-making for coronary artery disease management. *Eur Radiol*. 2021;31:7039-46. DOI:10.1007/s00330-021-07771-7
- Leipsic J, Yang TH, Thompson A, et al. CT angiography (CTA) and diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve: results from the Determination of Fractional Flow Reserve by Anatomic CTA (DeFACTO) study. *AJR Am J Roentgenol*. 2014;202(5):989-94. DOI:10.2214/ajr.13.11441

30. Coenen A, Lubbers MM, Kurata A, et al. Fractional flow reserve computed from noninvasive CT angiography data: diagnostic performance of an on-site clinician-operated computational fluid dynamics algorithm. *Radiology*. 2015;274(3):674-83. DOI:10.1148/radiol.14140992
31. Chinnaiyan KM, Akasaka T, Amano T, et al. Rationale, design and goals of the HeartFlow assessing diagnostic value of non-invasive FFRCT in Coronary Care (ADVANCE) registry. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2017;11:62-7. DOI:10.1016/j.jcct.2016.12.002
32. Henriksson L, Woisetschläger M, Alfredsson J, et al. The transluminal attenuation gradient does not add diagnostic accuracy to coronary computed tomography. *Acta Radiologica*. 2021;62(7):867-74. DOI:10.1177/0284185120943042
33. Choi JH, Min JK, Labounty TM, et al. Intracoronary transluminal attenuation gradient in coronary CT angiography for determining coronary artery stenosis. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2011;4(11):1149-57. DOI:10.1016/j.jcmg.2011.09.006
34. Funama Y, Utsunomiya D, Oda S, et al. Transluminal attenuation-gradient coronary CT angiography on a 320-MDCT volume scanner: Effect of scan timing, coronary artery stenosis, and cardiac output using a contrast medium flow phantom. *Phys Med*. 2016;32(11):1415-21. DOI:10.1016/j.ejmp.2016.10.011
35. Nakanishi R, Matsumoto S, Alani A, et al. Diagnostic performance of transluminal attenuation gradient and fractional flow reserve by coronary computed tomographic angiography (FFR(CT)) compared to invasive FFR: a sub-group analysis from the DISCOVER-FLOW and DeFACTO studies. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2015;31(6):1251-9. DOI:10.1007/s10554-015-0666-2
36. Bom MJ, Driessen RS, Stuijzand WJ, et al. Diagnostic value of transluminal attenuation gradient for the presence of ischemia as defined by fractional flow reserve and quantitative positron emission tomography. *JACC: Cardiovascular Imaging*. 2019;12(2):323-33. DOI:10.1016/S0735-1097(18)32102-8
37. Wong DT, Ko BS, Cameron JD, et al. Transluminal attenuation gradient in coronary computed tomography angiography is a novel noninvasive approach to the identification of functionally significant coronary artery stenosis: a comparison with fractional flow reserve. *J Am Coll Cardiol*. 2013;61(12):1271-9. DOI:10.1016/j.jacc.2012.12.029
38. Аншелес А.А., Сергиенко В.Б. Перфузия миокарда: что понимается под этим термином при визуализации различными методами лучевой диагностики? *Кардиология*. 2017;57(7):5-12 [Ansheles AA, Sergienko VB. Myocardial Perfusion Imaging Modalities: What do we Really see? *Kardiologiya*. 2017;57(7):5-12 (in Russian)]. DOI:10.18087/cardio.2017.7.10000
39. Johnson NP, Gould KL. Fractional Flow Reserve Returns to Its Origins: Quantitative Cardiac Positron Emission Tomography. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2016;9(9). DOI:10.1161/CIRCIMAGING.116.005435
40. Сергиенко В.Б., Аншелес А.А., Шульгин Д.Н., и др. Методические рекомендации перфузионная сцинтиграфия и ОЭКТ миокарда. *Кардиологический вестник*. 2015;10(2):6-21 [Sergienko VB, Ansheles AA, Shulgin DN, et al. Methodical recommendations Perfusion scintigraphy and OECT of the myocardium. *Kardiologicheskiy vestnik*. 2015;10(2):6-21 (in Russian)].
41. Шипулин В.В., Саушкин В.В., Пряхин А.С., и др. Возможности перфузионной сцинтиграфии миокарда в обследовании пациентов с ишемической кардиомиопатией. *Российский электронный журнал лучевой диагностики*. 2019;9(3):155-75 [Shipulin VV, Saushkin VV, Pryakhin AS, et al. The value of myocardium perfusion imaging in assessment of patients with ischemic cardiomyopathy. *Russian Electronic Journal of Radiology*. 2019;9(3):155-75 (in Russian)]. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-3-155-175
42. Бедрицкий С.А., Гендлин Г.Е., Никитин И.Г. Современные неинвазивные методы диагностики ишемической болезни сердца и роль стресс-эхокардиографии в оценке патологии сердца. *Лечебное дело*. 2018;4:62-9 [Bedritsky SA, Gendlin GE, Nikitin IG. Modern non-invasive methods for the diagnosis of coronary artery disease and the role of stress echocardiography in the assessment of heart diseases. *Lechebnoe delo*. 2018;4:62-9 (in Russian)]. DOI:10.24411/2071-5315-2018-12067
43. Perrone-Filardi P, Coca A, Galderisi M, et al. Non-invasive cardiovascular imaging for evaluating subclinical target organ damage in hypertensive patients: a consensus paper from the European Association of Cardiovascular Imaging (EACVI), the European Society of Cardiology Council on Hypertension, and the European Society of Hypertension (ESH). *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2017;18(9):945-60. DOI:10.1093/ehjci/jex094
44. Kossaiy A, Bassil E, Kossaiy M. Stress Echocardiography: Concept and Criteria, Structure and Steps, Obstacles and Outcomes, Focused Update and Review. *Cardiol Research*. 2020;11(2):89-96. DOI:10.14740/cr851
45. Steeds RP, Wheeler R, Bhattacharyya S, et al. Stress echocardiography in coronary artery disease: a practical guideline from the British Society of Echocardiography. *Echo Research and Practice*. 2019;6(2):G17-33. DOI:10.1530/ERP-18-0068
46. Pellikka PA, Arruda-Olson A, Chaudhry FA, et al. Guidelines for performance, interpretation, and application of stress echocardiography in ischemic heart disease: From the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr*. 2020;33:1-41.e8. DOI:10.1016/j.echo.2019.07.001
47. Porter TR, Feinstein SB, Ten Cate FJ, van den Bosch AE. New Applications in Echocardiography for Ultrasound Contrast Agents in the 21st Century. *Ultrasound Med Biol*. 2020;46. DOI:10.1016/j.ultrasmedbio.2020.01.004
48. Alajaji W, Baydoun A, Morris N, et al. Myocardial Contrast Echocardiography has Favorable Sensitivity and Specificity for Coronary Artery Disease Diagnosis in Patients with LBBB: A Meta-Analysis. *J Cardiovasc Dis Diagn*. 2016;S1:003. DOI:10.4172/2329-9517.S1-003

Статья поступила в редакцию / The article received: 08.07.2022



OMNIDOCTOR.RU