



Перспективы применения искусственного интеллекта в неинвазивной оценке параметров коронарной гемодинамики: обзор

Юрин А. В.^{1,2}, Чашин М. Г.¹, Горшков А. Ю.¹, Поддубская Е. А.¹, Стрелкова А. В.^{1,2}, Драпкина О. М.¹

Несмотря на то, что коронарография является общепризнанным "золотым стандартом" диагностики стенозирующих поражений коронарного русла, оценка их гемодинамической значимости в большинстве случаев остается оператор-зависимой. В настоящее время для объективизации измерений рекомендовано применение методов, позволяющих анализировать показатели внутрикоронарной физиологии. На фоне активного развития технологий искусственного интеллекта (ИИ) появляются новые решения для неинвазивной оценки параметров гемодинамики, ряд из которых уже был валидирован в рамках крупных исследований. Целью обзора является анализ и систематизация опубликованных данных о применяемых методах ИИ в неинвазивной оценке параметров гемодинамики коронарных артерий. При подготовке обзора использованы публикации, индексируемые в базах PubMed, Google Scholar, Web of Science, Cyberleninka и E-Library. Глубина поиска составила 10 лет, начиная с 2016г. В основу обзора включены обобщенные данные из наиболее актуальных клинических исследований и систематических обзоров. Проведенный анализ литературы позволил сделать заключение о том, что результаты применения технологий ИИ для оценки параметров гемодинамики коронарных артерий сопоставимы с результатами классических инвазивных методик. Тем не менее дальнейшие разработка и совершенствование данного направления остаются актуальной исследовательской задачей.

Ключевые слова: коронароангиография, фракционный резерв кровотока, мгновенный резерв кровотока, технологии искусственного интеллекта, неинвазивная оценка гемодинамики, гемодинамическая значимость.

Отношения и деятельность: нет.

¹ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины Минздрава России, Москва, Россия; ²ГБУЗ МО Одинцовская областная больница, Одинцово, Россия.

Юрин А. В.* — лаборант-исследователь лаборатории цифровой медицины и искусственного интеллекта; врач по рентгенэндоваскулярной диагностике и лечению, ORCID: 0009-0009-9158-6724, Чашин М. Г. — к.м.н., руководитель лабо-

ратории цифровой медицины и искусственного интеллекта, зав. отделением, Липидная клиника, ORCID: 0000-0001-6292-3837, Горшков А. Ю. — к.м.н., зам. директора по научной и амбулаторно-поликлинической работе, ORCID: 0000-0002-1423-214X, Поддубская Е. А. — к.м.н., руководитель Центра координации и мониторинга научно-исследовательской деятельности, ORCID: 0000-0002-9155-9189, Стрелкова А. В. — м.н.с. лаборатории цифровой медицины и искусственного интеллекта; врач по рентгенэндоваскулярной диагностике и лечению, ORCID: 0000-0003-4789-1640, Драпкина О. М. — д.м.н., профессор, академик РАН, директор, ORCID: 0000-0002-4453-8430.

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):

alexayurin@yandex.ru

АД — артериальное давление, ДИ — доверительный интервал, ИБС — ишемическая болезнь сердца, ИИ — искусственный интеллект, КА — коронарная артерия, КАГ — коронароангиография, ЧКВ — чрескожное коронарное вмешательство, ЧСС — частота сердечных сокращений, ЭКГ — электрокардиография, AI-iFR — AI-Based iFR Technology, DFR — Diastolic Hyperemia-Free Ratio, FFR — Fractional Flow Reserve, iFR — Instantaneous Wave-Free Ratio, QFR — Quantitative Flow Ratio, RFR — Resting Full-cycle Ratio, vFFR — Vessel Fractional Flow Reserve.

Рукопись получена 14.03.2026

Рецензия получена 20.03.2026

Принята к публикации 24.03.2026



Для цитирования: Юрин А. В., Чашин М. Г., Горшков А. Ю., Поддубская Е. А., Стрелкова А. В., Драпкина О. М. Перспективы применения искусственного интеллекта в неинвазивной оценке параметров коронарной гемодинамики: обзор. *Российский кардиологический журнал*. 2026;31(2S):6911. doi: 10.15829/1560-4071-2026-6911. EDN: QZPUDK

Potential of artificial intelligence in non-invasive assessment of coronary hemodynamic parameters: a review

Yurin A. V.^{1,2}, Chashchin M. G.¹, Gorshkov A. Yu.¹, Poddubskaya E. A.¹, Strelkova A. V.^{1,2}, Drapkina O. M.¹

Despite the fact that coronary angiography is the gold standard for diagnosing coronary stenosis, assessment of their hemodynamic significance in most cases remains operator-dependent. Currently, methods that analyze intracoronary physiology parameters are recommended for the objectification of measurements. With the rapid development of artificial intelligence (AI) technologies, new solutions for non-invasive assessment of hemodynamic parameters are emerging, some of which have already been validated in large studies. The aim of this review is to analyze and systematize published data on the use of AI methods in the non-invasive assessment of coronary artery hemodynamic parameters. This review utilized publications indexed in PubMed, Google Scholar, Web of Science, Cyberleninka, and E-Library. The search covered a 10-year period, beginning in 2016. The review is based on summarized data from the most relevant clinical studies and systematic reviews. A literature review concluded that the results of using AI technologies to assess coronary artery hemodynamic parameters are comparable to those of classical invasive techniques. However, further development and improvement of this approach remain a pressing research challenge.

Keywords: coronary angiography, fractional flow reserve, instantaneous wave-free ratio, artificial intelligence technologies, noninvasive hemodynamic assessment, hemodynamic significance.

Relationships and Activities: none.

¹National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow, Russia; ²Odintsovo Regional Hospital, Odintsovo, Russia.

Yurin A. V.* ORCID: 0009-0009-9158-6724, Chashchin M. G. ORCID: 0000-0001-6292-3837, Gorshkov A. Yu. ORCID: 0000-0002-1423-214X, Poddubskaya E. A. ORCID: 0000-0002-9155-9189, Strelkova A. V. ORCID: 0000-0003-4789-1640, Drapkina O. M. ORCID: 0000-0002-4453-8430.

*Corresponding author: alexayurin@yandex.ru

Received: 14.03.2026 **Revision Received:** 20.03.2026 **Accepted:** 24.03.2026

For citation: Yurin A. V., Chashchin M. G., Gorshkov A. Yu., Poddubskaya E. A., Strelkova A. V., Drapkina O. M. Potential of artificial intelligence in non-invasive assessment of coronary hemodynamic parameters: a review. *Russian Journal of Cardiology*. 2026;31(2S):6911. doi: 10.15829/1560-4071-2026-6911. EDN: QZPUDK

Ключевые моменты

- Современные методы неинвазивной оценки функциональной значимости атеросклеротических поражений коронарного русла на основе искусственного интеллекта активно внедряются в клиническую практику, официально валидированы и рекомендованы к применению наряду с классическими инвазивными методиками.
- Совершенствование неинвазивных технологий оценки гемодинамической значимости поражений позволяет сократить время процедуры и уменьшить экономические затраты без потери качества оказания как плановой, так и экстренной медицинской помощи пациентам кардиологического профиля.
- Систематизация данных литературы о применяемых методах неинвазивной оценки параметров внутрикоронарной гемодинамики на основании технологий искусственного интеллекта.

Key messages

- Modern non-invasive methods for assessing the functional significance of coronary atherosclerosis using artificial intelligence are being actively implemented in clinical practice and are officially validated and recommended for use alongside traditional invasive techniques.
- Improving non-invasive technologies for assessing the hemodynamic significance of lesions allows for shorter procedure times and lower costs without compromising the quality of both routine and emergency care for cardiac patients.
- Systematization of literature data on non-invasive assessment of intracoronary hemodynamic parameters using artificial intelligence technologies is needed.

Коронарный атеросклероз остается одной из ведущих причин сердечно-сосудистой заболеваемости и смертности во всем мире. По данным Global Burden of Disease за 2021г смертность от ишемической болезни сердца (ИБС) среди взрослого населения составила 8,99 млн человек¹. Прогнозируемые глобальные распространенность и смертность от ИБС к 2050г могут составить 510 млн и 16 млн человек, соответственно [1]. "Золотым стандартом" диагностики атеросклероза коронарных артерий (КА) по-прежнему остается коронароангиография (КАГ), однако данный метод позволяет оценивать характер и значимость стенозирующего поражения коронарного русла, основываясь только на анатомо-морфологических характеристиках. Более того, оценка поражения по данным КАГ является субъективной и не позволяет изолированно оценить его функциональную значимость. Результаты такой оценки напрямую зависят от опыта рентген-эндovasкулярного хирурга и его квалификации.

Согласно действующим клиническим рекомендациям по диагностике и лечению ИБС, стенозирующее поражение КА может считаться гемодинамически значимым при сужении просвета сосуда на 50% и более от исходного диаметра [2]. Однако достоверное определение функциональной значимости таких поражений, основываясь лишь на ангиографических данных, невозможно, что было подтверждено рядом крупных исследований с применением инвазивных

методов функциональной оценки коронарной гемодинамики [3-8].

В настоящее время существует несколько методов для оценки показателей внутрикоронарной физиологии, которые обладают достаточной чувствительностью и специфичностью, и уже доказали свою клиническую эффективность в реальной клинической практике. Среди них: фракционный резерв кровотока (FFR, Fractional Flow Reserve) и мгновенный резерв кровотока (iFR, Instantaneous Wave-Free Ratio).

Согласно рекомендациям Европейского общества кардиологов, инвазивные методы оценки гемодинамической значимости стенозов КА (FFR/iFR) рекомендованы для применения (класс I, уровень доказательности A) в случаях, когда неинвазивные стресс-тесты неинформативны или не проводились, а оценка гемодинамической значимости стенозов только на основании данных КАГ затруднена (промежуточные стенозы: 40-90% или многососудистое поражение коронарного русла). В качестве альтернативных методов могут применяться (класс IIb, уровень доказательности C) диастолический резерв кровотока (DFR, Diastolic Hyperemia-Free Ratio) и резерв кровотока покоя (RFR, Resting Full-cycle Ratio) [9].

Однако применение методов инвазивной оценки параметров коронарного кровотока связано с дополнительными рисками, затратами и необходимостью использования провокационных фармакологических тестов (к примеру, при FFR), что накладывает определенные ограничения на их повсеместное использование.

В последние годы активно развиваются неинвазивные методы оценки коронарной гемодинамики на основе данных КАГ с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения,

¹ Global Burden of Disease 2021. Ischaemic heart disease — Level 3 cause. URL: <https://www.healthdata.org/research-analysis/diseases-injuries-risks/factsheets/2021-ischemic-heart-disease-level-3-disease>.

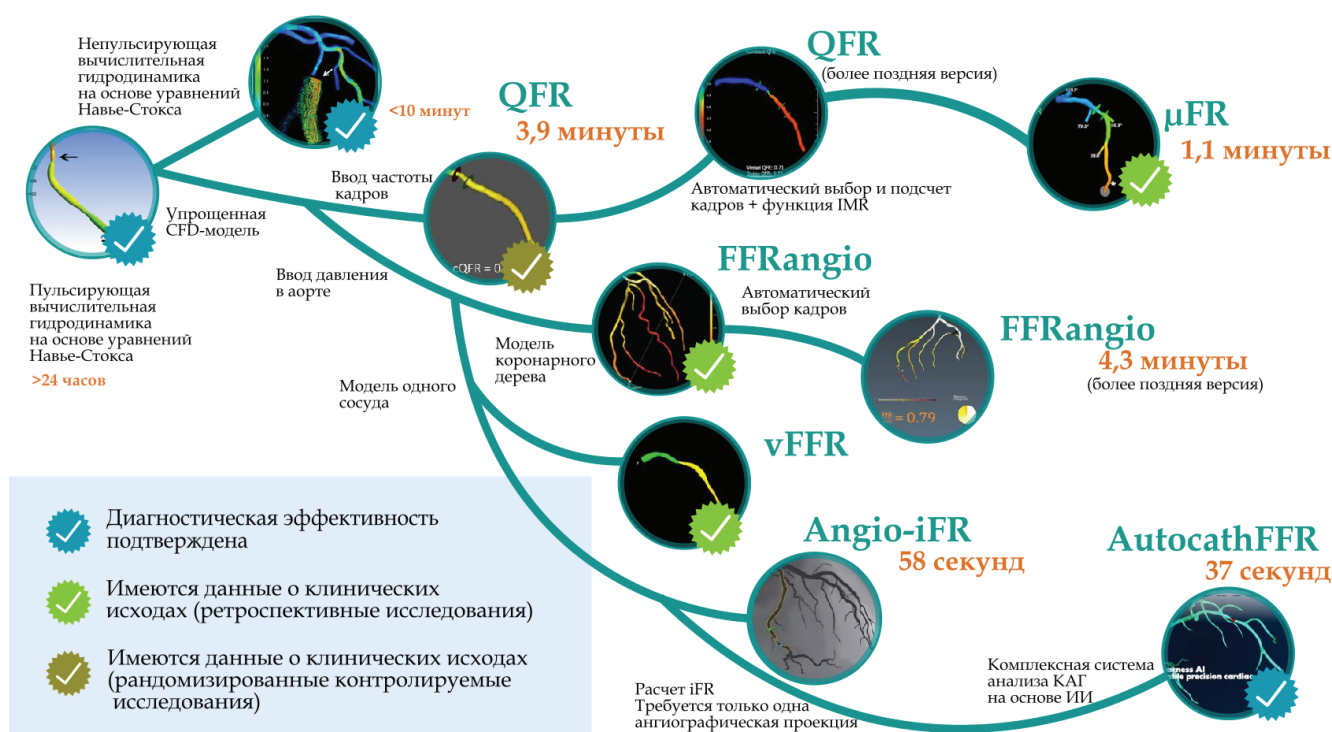


Рис. 1. Основные программно-аппаратные решения для неинвазивного расчета внутрикоронарной гемодинамики.

Примечание: источник — Asano T, Tanigaki T, Ikeda K, et al. Consensus document on the clinical application of invasive functional coronary angiography from the Japanese Association of Cardiovascular Intervention and Therapeutics. Cardiovascular Intervention and Therapeutics. 2024;39(2):109-25.

Сокращения: ИИ — искусственный интеллект, КАГ — коронароангиография, FFR — Fractional Flow Reserve, iFR — Instantaneous Wave-Free Ratio, QFR — Quantitative Flow Ratio, vFFR — Vessel Fractional Flow Reserve.

позволяющих с высокой точностью прогнозировать функциональную значимость стенозов, избегая дополнительных инвазивных вмешательств. Новая тенденция к переходу к наименее инвазивным методам оценки внутрисосудистой гемодинамики при помощи ИИ нашла отражение в Европейских клинических рекомендациях: так, количественный коэффициент кровотока (QFR, Quantitative Flow Ratio) или сосудистый FFR (vFFR, Vessel Fractional Flow Reserve), еще находящиеся на различных стадиях клинических испытаний, тем не менее рекомендованы к применению (класс I, уровень доказательности A) [9]. В российских клинических рекомендациях по ведению пациентов со стабильной ИБС вопрос применения данного типа технологий не освещен, что может быть обусловлено отсутствием отечественных крупных исследований по данной тематике, а также отсутствием программного обеспечения, зарегистрированного в установленном порядке в качестве медицинского изделия. В настоящее время в литературе представлены результаты разработок программных решений по разметке коронарного русла на основании данных эхокардиографии [10] и КАГ [11], а также неинвазивной оценке степени поражения КА по данным электрокардиографии (ЭКГ) [12]. Гогниева Д. Г. и др. (2020) представили результаты неинвазивного расчета FFR на основании данных МСКТ КА. Чувствительность

$$FFR = \frac{P_d}{P_a}$$

Рис. 2. Формула расчета FFR.

Сокращения: FFR — Fractional Flow Reserve, P_d — давление после стеноза, P_a — давление до стеноза (значение давления в аорте).

методики неинвазивного расчета внутрикоронарной гемодинамики составила — 90,91% (95% доверительный интервал (ДИ): 62,26-99,53) [13, 14].

Таким образом, внедрение технологий неинвазивной оценки параметров внутрисосудистой гемодинамики открывает новые перспективы для персонализированного подхода в лечении ИБС.

Методы оценки показателей коронарного кровотока

Инвазивная оценка коронарного кровотока с помощью внутрикоронарного датчика давления позволяет решить вопрос определения функциональных и физиологических аспектов поражения миокарда на уровне микроциркуляторного русла. Применение таких основных методов, как FFR, iFR, DFR и RFR, позволяет оценить функциональную значимость стенозирующего поражения и определить стратегию реваскуляризации в каждом конкретном случае. Тем не менее каждый из методов имеет ряд преимуществ и недостатков, а также технические особенности вы-

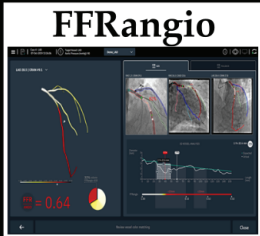
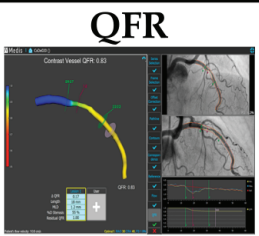
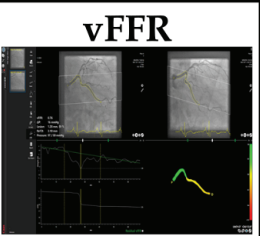
	FFRangio	QFR	vFFR	caFFR
Ангиография				
Процесс анализа	≥ 2 проекции с разницей углов ≥30°	2 проекции с разницей углов 25°	2 проекции с разницей углов 30°	2 проекции с разницей углов 30°
Метод анализа	Анализ сопротивления кровотоку Многососудистый анализ	Интегрированный математический подход Анализ одного сосуда	Интегрированный математический подход Анализ одного сосуда	Инвазивное измерение давления в реальном времени Анализ одного сосуда
Пороговое значение	0,8	0,8	0,8	0,8
Время анализа (мин)	3,41	3,9-5	Н/Д	4,5
Коррекция контура (%)	Н/Д	Н/Д	Н/Д	9,3

Рис. 3. Программно-аппаратные решения для неинвазивного расчета показателя FFR.

Примечание: источник — Scoccia A, Tomaniak M, Neleman T, et al. Angiography-Based Fractional Flow Reserve: State of the Art. Current cardiology reports. 2022;24(6):667-78. doi:10.1007/s11886-022-01687-4.

Сокращения: FFR — Fractional Flow Reserve, QFR — Quantitative Flow Ratio, vFFR — Vessel Fractional Flow Reserve.

полнения измерений показателей коронарного кровотока.

На сегодняшний день существуют 2 основных направления развития программно-аппаратных решений различных модификаций для неинвазивного расчета показателей внутрикоронарного кровотока на основании данных КАГ: неинвазивный расчет показателя FFR и неинвазивный расчет показателя iFR (рис. 1).

FFR

FFR в настоящее время признан "золотым стандартом" в тактике инвазивных методов диагностики и лечения многососудистого поражения коронарного русла. Впервые данная методика была предложена в 1993г Pijls NH, et al. (1993). Авторы доказали возможность применения метода FFR во время чрескожной коронарной ангиопластики, а также для оценки изменений функциональной тяжести стенозов КА [15].

FFR основан на измерении градиента давления до и после стенозирующего поражения на высоте лекарственно индуцированной гиперемии миокарда (максимальной вазодилатации). Формула расчета показателя FFR представлена на рисунке 2.

Установленным критерием порога ишемии при оценке стенозов КА является показатель $FFR \leq 0,80$ [2, 9, 16].

Методика оценки показателей внутрикоронарной физиологии посредством FFR обладает целым рядом преимуществ: Pijls NH, et al. (1996) установили, что чувствительность и специфичность метода FFR в определении значимой ишемии миокарда составляет 88% и 100%, соответственно, при общей диагностической точности 93% [17]. Исследования DEFER, FAME и FAME 2 подтвердили превосходство чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ) под контро-

лем FFR над ЧКВ, выполненным только под контролем КАГ [3-6]. Установлено, что проведение ЧКВ под контролем FFR достоверно снижает количество крупных сердечно-сосудистых событий (MACE) [18]. Применение методики FFR обеспечивает оптимизацию подхода к стратегии реваскуляризации при стенозирующем поражении коронарного русла, что позволяет исключить фактор субъективности при оценке ангиографической картины поражения.

К ключевым недостаткам и потенциальным рискам при применении методики FFR для оценки показателей внутрисосудистой гемодинамики относятся: необходимость введения АТФ, аденозина или других лекарственных средств с целью индукции гиперемии, что, в свою очередь, может быть сопряжено с такими нежелательными эффектами, как брадикардия и снижение артериального давления (АД); точность полученных показателей напрямую зависит от исходных гемодинамических показателей пациента — частоты сердечных сокращений (ЧСС) и АД. Учитывая необходимость катетеризации и использования внутрикоронарного проводника для измерения давления, существуют риски возникновения диссекции/перфорации или спазма КА.

Неинвазивный расчет показателя FFR

Наиболее актуальными работами и готовыми продуктами, посвященными вопросу неинвазивного расчета показателя FFR, являются: QFR, FFRangio, FlashAngio caFFR, vFFR (рис. 3).

QFR

Технология QFR представляет собой систему неинвазивного расчета FFR при помощи ИИ на основании 3-мерной реконструкции коронарного русла по данным КАГ (рис. 4-6).

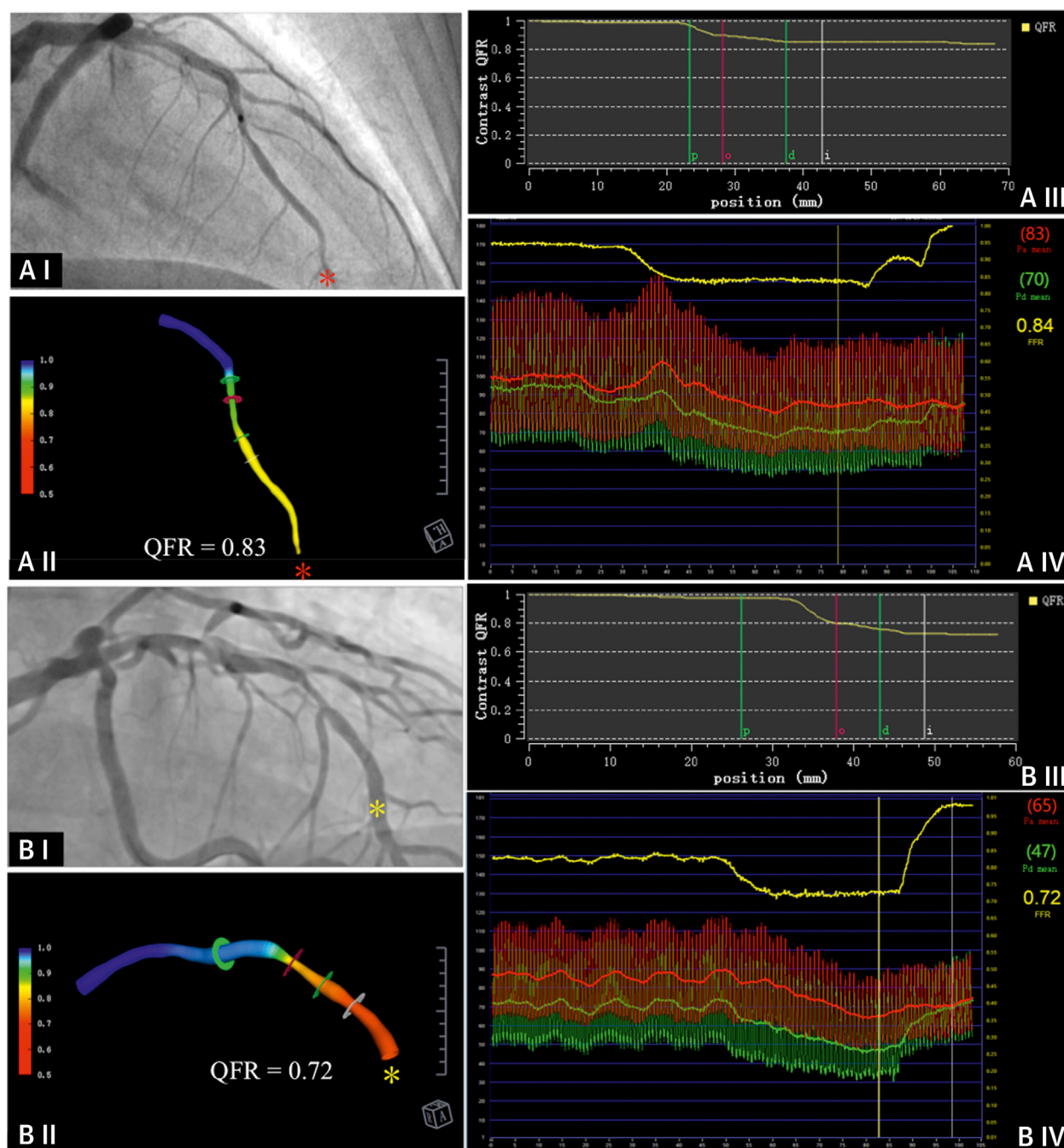


Рис. 4. Клинический пример неинвазивного расчета показателя QFR.

Примечание: источник — Xu B, Tu S, Qiao S, et al. Diagnostic accuracy of angiography-based quantitative flow ratio measurements for online assessment of coronary stenosis. Journal of the American College of Cardiology. 2017;70(25):3077-87. doi:10.1016/j.jacc.2017.10.035.

(A I) При коронарографии выявлена левая передняя межжелудочковая артерия (ПМЖВ) с промежуточным стенозом. (A II) Значение QFR, отмеченное красной звездочкой, составило 0,83. (A III) Снижение QFR (p: маркер проксимального поражения; o: ядро поражения; d: маркер дистального поражения; соответствует дискам на рисунке B II). (A IV) Значение QFR, измеренное с помощью датчика давления у красной звездочки, составило 0,84. (B I) Коронарография выявила у пациента промежуточный стеноз ПМЖВ, который является гемодинамически значимым, о чем свидетельствуют показатели QFR и FFR. (B II) Значение QFR составило 0,72 (желтая звездочка). (B III) График снижения QFR. (B IV) Показатель FFR, отмеченный желтой звездочкой, составил 0,72.

Сокращения: FFR — Fractional Flow Reserve, QFR — Quantitative Flow Ratio.

Расчет QFR начинается с извлечения сосудистых контуров из ангиограмм при помощи реконструкции 3-мерной модели из двух проекций с разницей углов между ними >25 градусов, с сопутствующим расче-

том распределения давления в сосуде и ЧСС, в соответствии с морфологией КА и скоростью кровотока. Далее при помощи алгоритмов ИИ происходит моделирование гемодинамического процесса.

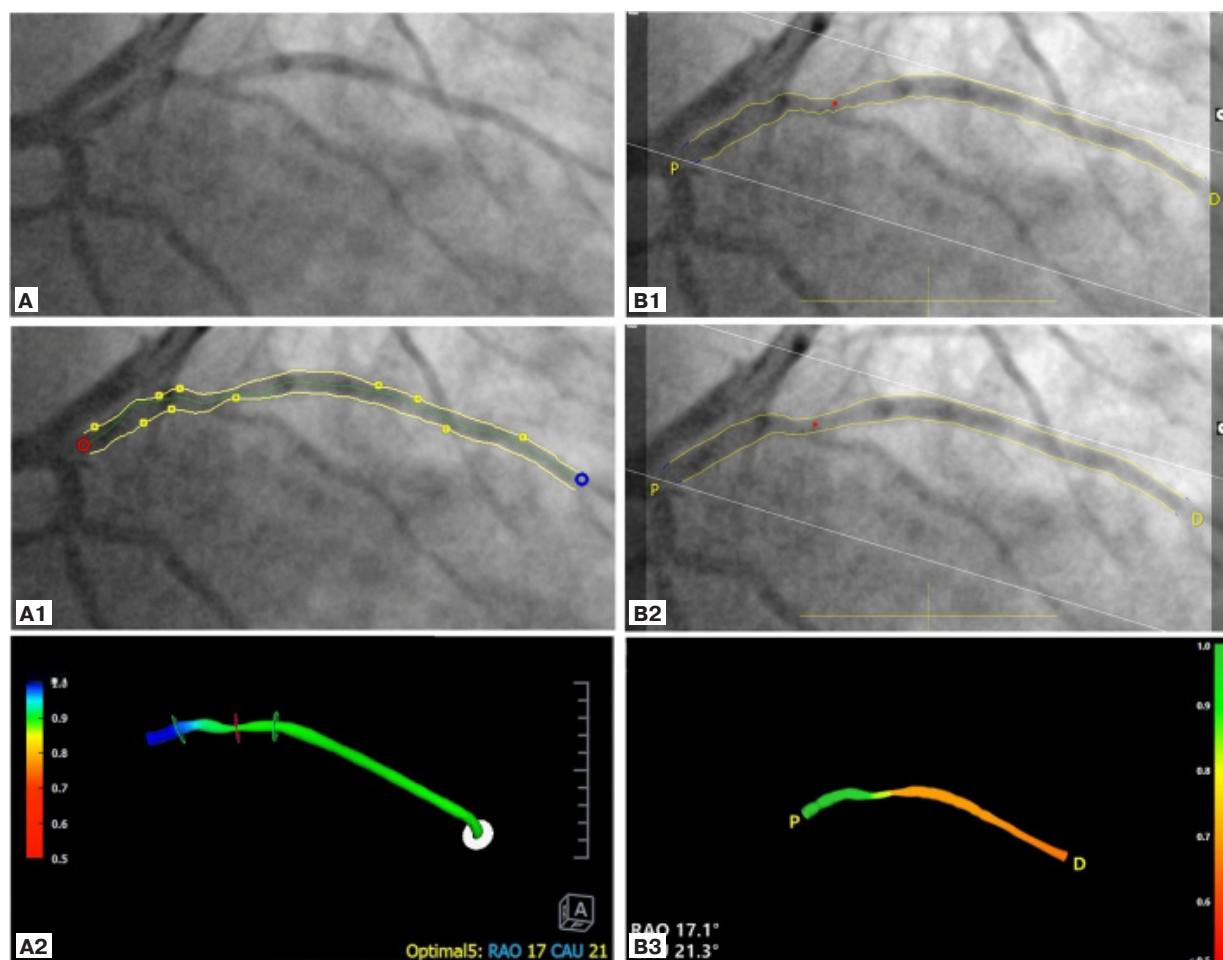


Рис. 5. Клинический пример расчета показателя QFR и vFFR.

Примечание: источник — Jin C, Ramasamy A, Safi H, et al. Diagnostic accuracy of quantitative flow ratio (QFR) and vessel fractional flow reserve (vFFR) estimated retrospectively by conventional radiation saving X-ray angiography. The International Journal of Cardiovascular Imaging. 2021;37(5):1491-501. doi:10.1007/s10554-020-02133-8.

В отчете Antoniadis M, et al. (2022), включавшем анализ 102 пограничных поражений КА, была продемонстрирована значимая корреляция данных, рассчитанных при помощи QFR, со стандартными инвазивными индексами (iFR и FFR) ($r=0,753$, $p<0,05$). При этом применение технологии QFR позволило снизить лучевую нагрузку с 598,8 кГр/см² до 306,75 кГр/см² ($p<0,001$) [19]. Salihu A, et al. (2025), ретроспективно проанализировав 270 ангиографических изображений, также не обнаружили статистически значимой разницы медианных показателей QFR и FFR ($p=0,620$), а использование неинвазивного подхода способствовало более быстрой оценке гемодинамической значимости поражения КА и выбору дальнейшей тактики ведения пациента [20]. Стоит отметить, что диагностическая точность определения QFR доказана не только для основных стволов КА, но и для их боковых ветвей диаметром $\geq 2,0$ мм [21].

Таким образом, преимуществами метода QFR являются его неинвазивность, более быстрый расчет FFR, снижение уровня лучевой нагрузки как на медицин-

ский персонал, так и на пациента, а также минимизация "человеческого фактора" в оценке гемодинамической значимости стеноза КА.

Однако значительный вклад в корректность оценки гемодинамической значимости поражения вносит качество исходного анализируемого ангиографического изображения. Так, Tu S, et al. (2021) при анализе 303 ангиограмм отметили, что использование данных с дефектами достоверно снижает точность определяемого ИИ QFR (AUC 0,97 vs 0,92, $p<0,001$) [22]. При этом безопасное проведение КАГ сопряжено с определенным ограничением количества записываемых проекций для минимизации рентгеновского облучения, в связи с чем использование ограниченного числа проекций для расчета QFR может приводить к неточностям.

FFRangio (Cathworks)

В качестве аналога технологии QFR была разработана методика FFRangio, также основанная на создании 3-мерной модели КА по данным КАГ, с последующей оценкой в зоне стенозирующего поражения

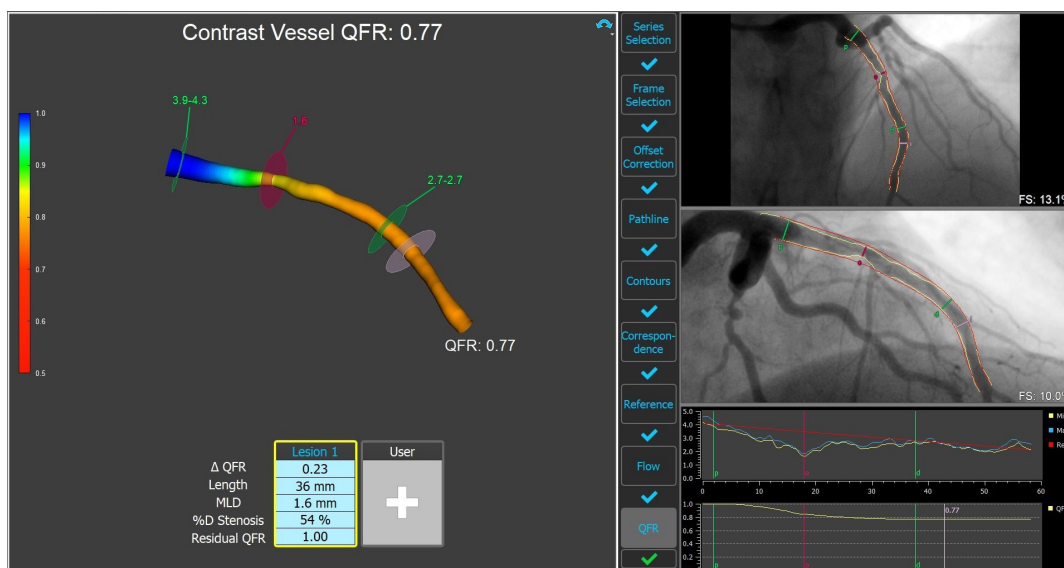


Рис. 6. Интерфейс программно-аппаратного решения для неинвазивного расчета показателя QFR.

Примечание: источник — <https://www.eukon.it/products/qfr/#images-0-fancyG>.

Сокращение: QFR — Quantitative Flow Ratio.

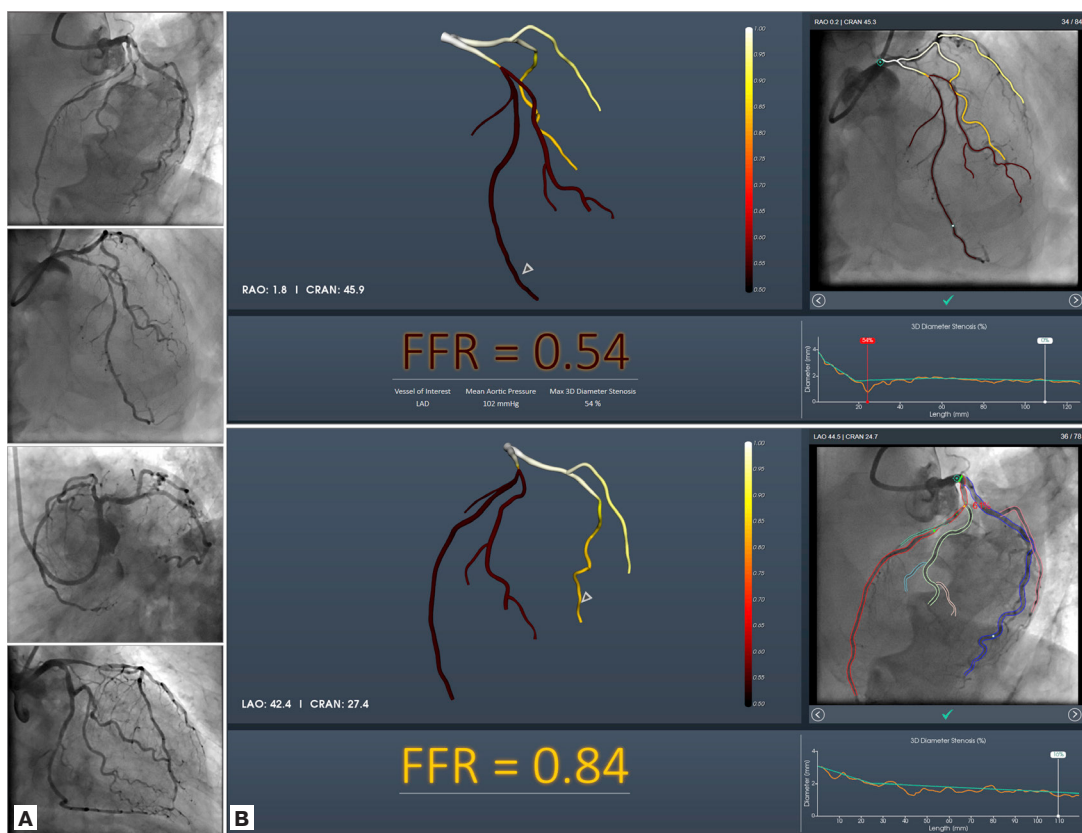


Рис. 7. Клинический пример использования программно-аппаратного комплекса для расчета неинвазивного показателя FFRAngio.

Примечание: источник — Witberg G, De Bruyne B, Fearon WF, et al. Diagnostic performance of angiogram-derived fractional flow reserve: a pooled analysis of 5 prospective cohort studies. Cardiovascular Interventions. 2020;13(4):488-97. doi:10.1016/j.jcin.2019.10.045.

(А) Четыре ангиографические проекции левой коронарной артерии у пациента с поражением 2 сосудов (пр/3 передней межжелудочковой артерии (ПМЖВ) и ср/3 огибающей артерии (ОВ)). (В) Эти проекции были использованы для создания трехмерной модели коронарной системы, которая была окрашена в соответствии со значениями FFRAngio в каждом сегменте коронарных артерий; отображены значения FFRAngio для пораженных сегментов коронарных артерий (0,54 для LAD и 0,84 для LCx). Соответствующие результаты инвазивного FFR, полученные во время ангиографии при поражениях ПМЖВ и ОВ составили 0,49 и 0,86, соответственно.

Сокращение: FFR — Fractional Flow Reserve.

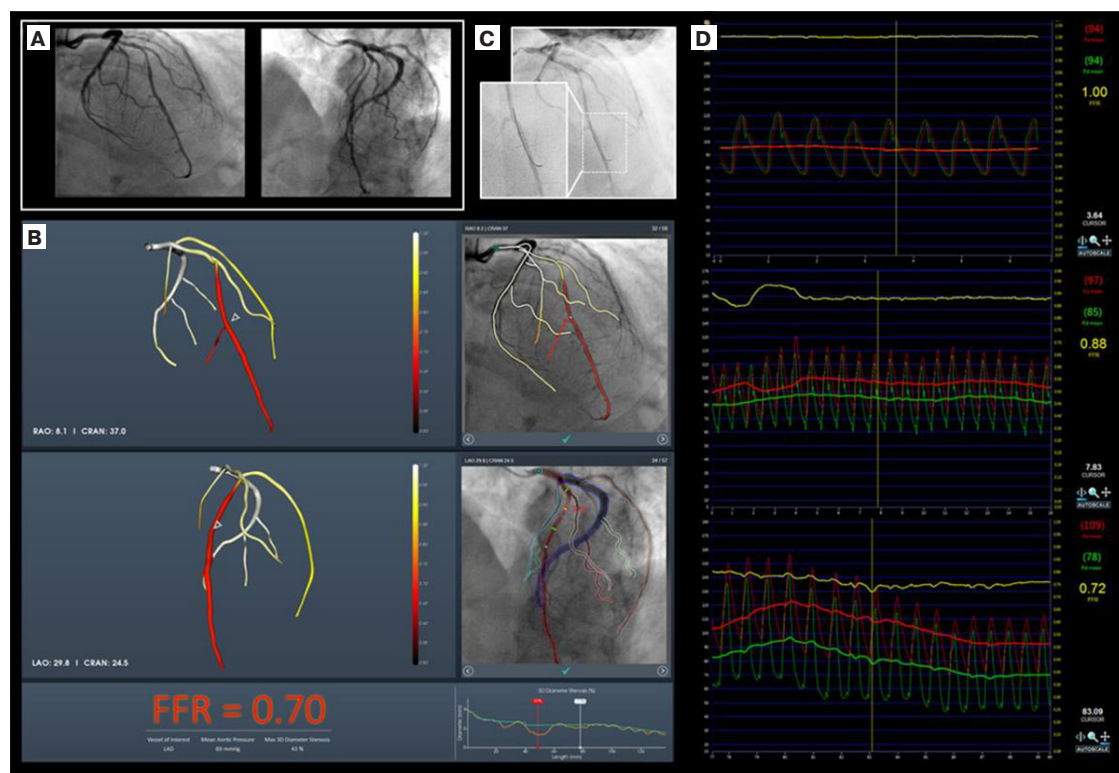


Рис. 8. Интерфейс программно-аппаратного решения для неинвазивного расчета показателя FFRAngio.

Примечание: источник — Fearon WF, Achenbach S, Engstrom T, et al. Accuracy of Fractional Flow Reserve Derived From Coronary Angiography. *Circulation*. 2019;139(4):477-84. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.118.037350.

Сокращение: FFR — Fractional Flow Reserve.

сосудистого сопротивления, в зависимости от морфологических характеристик сосуда (его длины и диаметра) и скорости потока (рис. 7, 8).

Перед созданием модели оператору необходимо указать среднее давление в аорте, выбрать целевой сосуд для оценки и как минимум 2 или более проекции с минимальным расхождением в 30 градусов между ними (частота кадров на КАГ не менее 10 в секунду) [23]. Изначально происходит расчет нормального максимального кровотока в целевой КА, в зависимости от ее морфологических характеристик, следующим этапом выполняется непосредственный расчет показателя FFRAngio, представляющий собой отношение максимальной скорости кровотока в пораженной артерии к максимальной скорости кровотока при отсутствии стенозирующего поражения [23].

В исследовании Kornowski R, et al. (2016) были проанализированы показатели внутрикоронарной гемодинамики у 88 пациентов с признаками стенозирующего поражения КА, определяемые по данным КАГ. Чувствительность, специфичность и диагностическая точность методики определения FFRAngio составили 88%, 98% и 94%, соответственно [24]. Сопоставимые результаты были получены Pellicano M, et al. (2017), проанализировавших 203 стенозирующих поражения КА с использованием технологии FFRAngio, где

диагностическая точность составила 88%, специфичность — 95%, а чувствительность — 93% [25]. В проспективном многоцентровом исследовании FAST-FFR, включавшем данные 301 пациента и 319 изображений КА, было установлено что неинвазивный расчет FFR обладает диагностической точностью, чувствительностью и специфичностью >90%, по сравнению с его инвазивным измерением (92,2% (95% ДИ: 88,7-94,8); 93,5% (95% ДИ: 87,8-96,6) и 91,2% (95% ДИ: 86,0-94,6), соответственно) [23].

Главным достоинством данной технологии является полная одномоментная трехмерная реконструкция всего коронарного дерева с определением FFR в каждом сосуде. Это, в свою очередь, требует значительных аппаратных мощностей, что может ограничить применение данной технологии.

FlashAngio caFFR System

Еще одной модификацией неинвазивного измерения показателя FFR является технология caFFR (рис. 9, 10).

Расчет гемодинамического показателя, как и в описанных выше методиках, происходит на основании 2 и более ангиографических проекций с расхождением между ними в 30 градусов и более, с минимальной частотой кадров 15 в сек. Для корректного расчета обязательно необходимо отсутствие каких-либо пере-

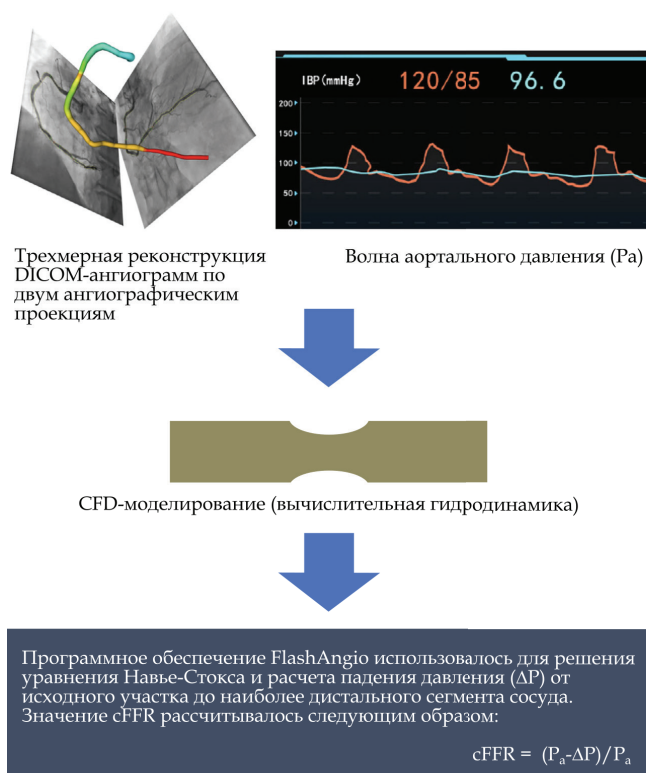


Рис. 9. Схематическое представление технологии расчета показателя cFFR.

Примечание: источник — Gong Y, Zheng B, Yi T, et al. Coronary angiography-derived contrast fractional flow reserve. Catheterization and Cardiovascular Interventions. 2022;99(3):763-71. doi:10.1002/ccd.29558.

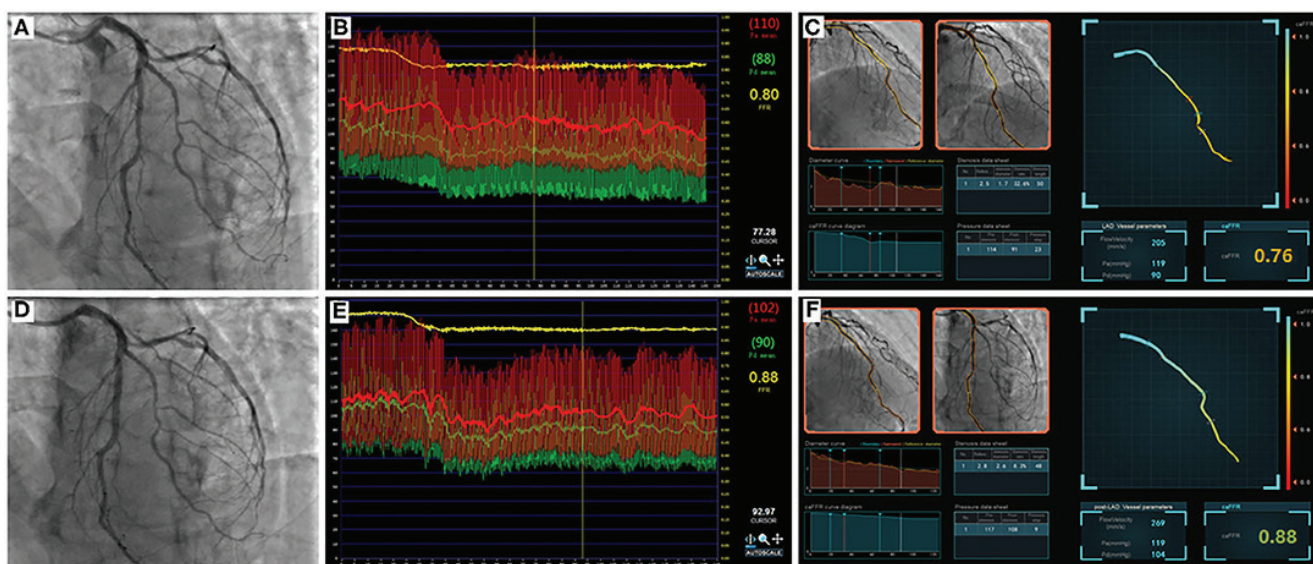


Рис. 10. Клинический пример неинвазивного расчета показателя cFFR.

Примечание: источник — Ai H, Zheng N, Li L, et al. Agreement of angiography-derived and wire-based fractional flow reserves in percutaneous coronary intervention. Frontiers in Cardiovascular Medicine. 2021;8:654392. doi:10.3389/fcvm.2021.654392.

крытий или взаимных наложений контуров КА друг на друга, а также движения ангиографического стола во время записи КАГ. Параллельно производится непрерывная регистрация внутриаортального давления для последующего расчета среднего аортального

давления в соответствующем DICOM-изображении. В дальнейшем системой выполняется 3-мерная реконструкция целевого сосуда с учетом зон стенозирования от устья до дистального сегмента и расчет скорости потока в покое на основании метода подсчета

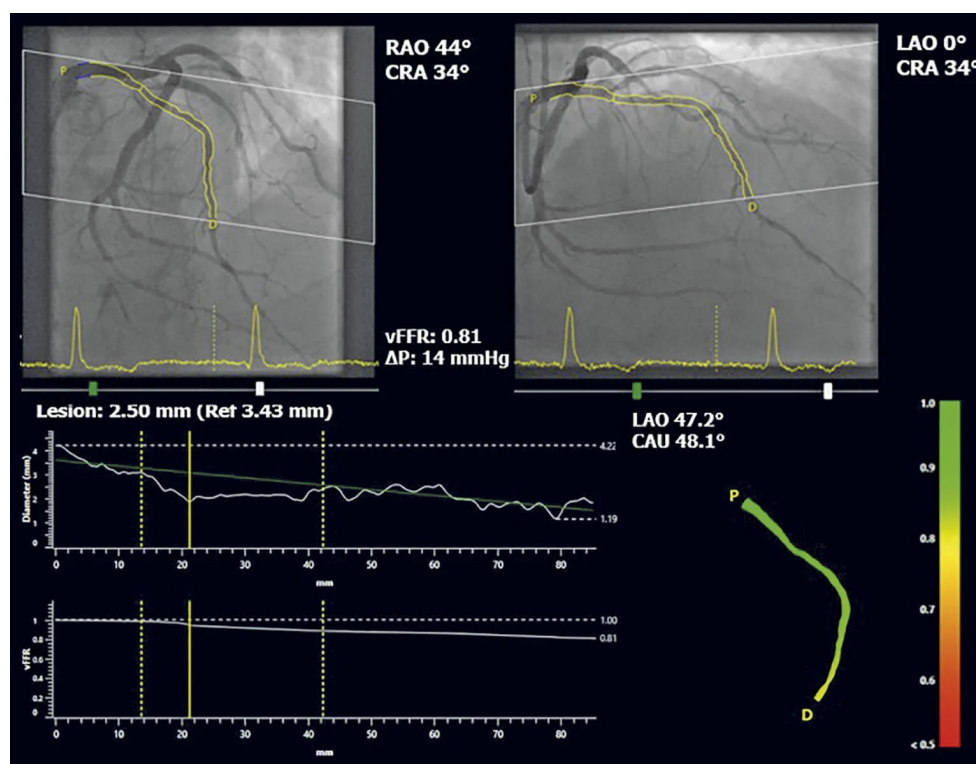


Рис. 11. Клинический пример неинвазивного расчета показателя vFFR.

Примечание: источник — Masdjedi K, Tanaka N, Van Belle E, et al. Vessel fractional flow reserve (vFFR) for the assessment of stenosis severity: the FAST II study. EuroIntervention. 2022;17(18):1498. doi:10.4244/EIJ-D-21-00471.

кадров (TIMI Frame Count) и его динамики по всей длине сосуда на основании уравнения Навье-Стокса.

Значимая корреляция получаемых данных при использовании технологии саFFR была продемонстрирована в проспективном многоцентровом исследовании Li J, et al. (2020), проводивших расчеты неинвазивного показателя на 328 КА. Диагностическая эффективность саFFR, по сравнению с инвазивным FFR, составила 95,7%, чувствительность — 90,4%, а специфичность — 98,6% [26].

Главным преимуществом данной методики по сравнению с аналогами является большая скорость расчета показателя — менее 5 мин, время непосредственных компьютерных вычислений при этом составляет менее 1 мин.

vFFR

vFFR — программно-аппаратная технология для неинвазивной оценки показателя FFR в различных сегментах КА, также основанная на создании 3-мерной реконструкции коронарного русла по данным 2 ангиографических проекций, интервал между которыми должен быть не менее 30 градусов. Временное выравнивание двух проекций выполняется автоматически при помощи синхронизации с данными ЭКГ. Далее системой осуществляется автоматическая сегментация КА: определение контуров сосудов от устья до дистального сегмента с расчетом исходного и минимального

диаметров КА, минимальной площади просвета, а также процентных значений степеней стенозов и протяженности пораженного участка (рис. 11-13).

Впервые диагностическая эффективность и точность методики vFFR была продемонстрирована в проспективном многоцентровом исследовании FAST II, включавшем данные 334 пациентов. Так, точность, чувствительность и специфичность метода составили 90%, 81% и 95%, соответственно [27]. В настоящее время в рамках исследования FAST III продолжается изучение перспектив применения vFFR и его влияния на стратегию реваскуляризации и исходы в течение 1 года после проведенного вмешательства [28].

Главным преимуществом данной программной методики является возможность изолированной оценки FFR как всего коронарного сосуда, так и целевого сегмента. "Прицельный" подход позволяет значительно сократить время расчета гемодинамических показателей и не требует больших вычислительных мощностей. Несмотря на то, что исследование данной методики все еще продолжается, технология vFFR уже рекомендована к применению в Европейских рекомендациях Европейского общества кардиологов 2024.

iFR

iFR является альтернативным по отношению к FFR методом оценки внутрикоронарного кровотока при стенозирующем поражении. Измерение резерва кро-

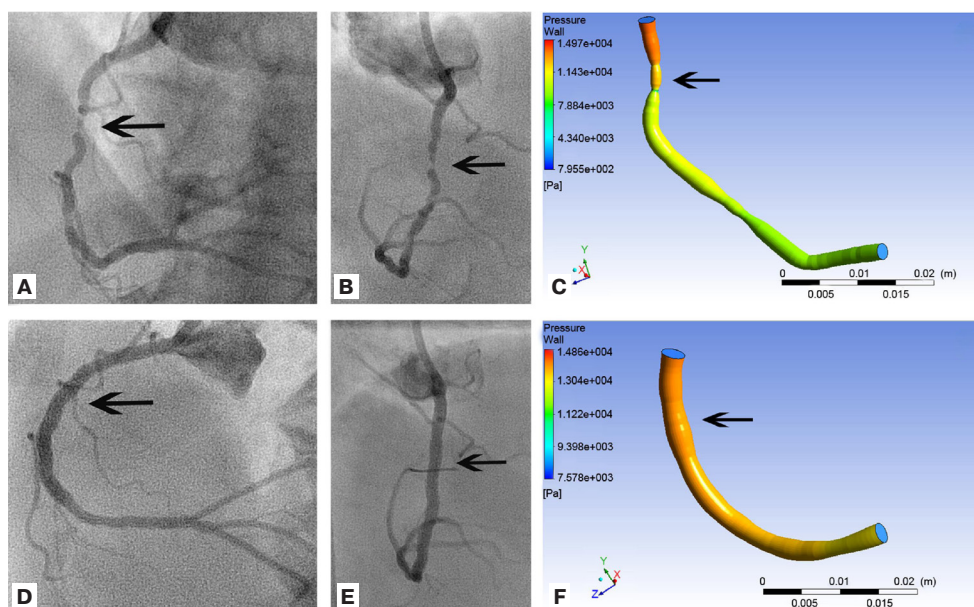


Рис. 12. Клинический пример неинвазивного расчета показателя vFFR на правой КА.

Примечание: источник — Morris PD, Ryan D, Morton AC, et al. Virtual fractional flow reserve from coronary angiography: modeling the significance of coronary lesions: results from the VIRTU-1 (VIRTUal Fractional Flow Reserve From Coronary Angiography) study. JACC: Cardiovascular Interventions. 2013;6(2):149-57. doi:10.1016/j.jcin.2012.08.024.

Снимки пациента № 10, 63-летней женщины с хронической ишемической болезнью сердца и стенозом правой коронарной артерии. Была выполнена коронарография в краниальной позиции. (А и В) Ангиограммы представлены в левой передней косой (А) и правой передней косой (В) проекциях. Стрелки указывают на стеноз. Исходный измеренный FFR (mFFR) составил 0,45. Ангиографические данные были обработаны для анатомической и физиологической реконструкции, которая показана на рисунке С. Цвета отображают давление (Па) в соответствии с показанной шкалой. Виртуальный FFR (vFFR) составил 0,56. Был имплантирован стент размером 3×38 мм. Была выполнена контрольная коронарография, и mFFR составил 1,0. Соответствующие изображения, полученные на основе коронарографии после имплантации стента и реконструкции, показаны на рисунках D, E и F. Коэффициент vFFR после имплантации составил 0,91.

вотока происходит в фазу диастолического покоя (wave-free period) и не требует лекарственно индуцированной гиперемии. Участки измерения давления аналогичны таковым при FFR. Формула для расчета показателя iFR представлена на рисунке 14.

Установленным критерием порога ишемии при оценке стенозов КА является показатель iFR $\leq 0,89$ [2, 9].

Методика оценки iFR является легко воспроизводимой, требует меньших временных затрат (средняя длительность процедуры составила 40,5 мин в группе iFR по сравнению с 45,0 мин в группе FFR, $p=0,001$) и не сопряжена с возможностью развития нежелательных реакций в виде брадикардии и снижения АД за счет отсутствия необходимости лекарственно индуцировать гиперемию, а также обладает сопоставимой диагностической точностью [7, 8].

В рамках исследования DEFINE-FLAIR также было установлено, что экономическая целесообразность и эффективность применения методики iFR несколько выше, по сравнению с FFR² [7].

В отчете Pisters R, et al. (2018), включавшем результаты измерений показателей iFR и FFR у 356 пациентов, была установлена положительная корреляция

данных показателей ($r=0,75$, $p<0,001$), при этом чувствительность iFR составила 87%, специфичность — 80% [29].

При сравнении рисков развития крупных сердечно-сосудистых событий в течение 1 года после реваскуляризации подход ЧКВ под контролем iFR не уступал реваскуляризации под контролем FFR [7, 8]. Тем не менее влияние применения методики iFR на отдаленные исходы все еще остается недостаточно изученным, по сравнению с FFR.

Недостатком применения iFR является его зависимость от показателей ЧСС, обусловленных синхронизацией процесса измерения с ЭКГ пациента — анализ происходит в wave-free интервал диастолы, что может приводить к некорректным результатам у пациентов с нарушениями сердечного ритма.

Неинвазивный расчет показателя iFR

Неинвазивная технология расчета показателя iFR на основании данных КАГ получила наименьшее распространение в клинической практике, по сравнению с QFR и его аналогами, из-за сложности его моделирования, обусловленных обязательным учетом показателей микроциркуляции и точным определением свободного волнового периода. Тем не менее существует несколько готовых программно-аппаратных решений для приме-

² Patel M. Cost-effectiveness of instantaneous wave-Free Ratio (iFR) compared with Fractional Flow Reserve (FFR) to guide coronary revascularization decision making. Late-breaking Clinical Trial presentation at ACC on March 10, 2018.

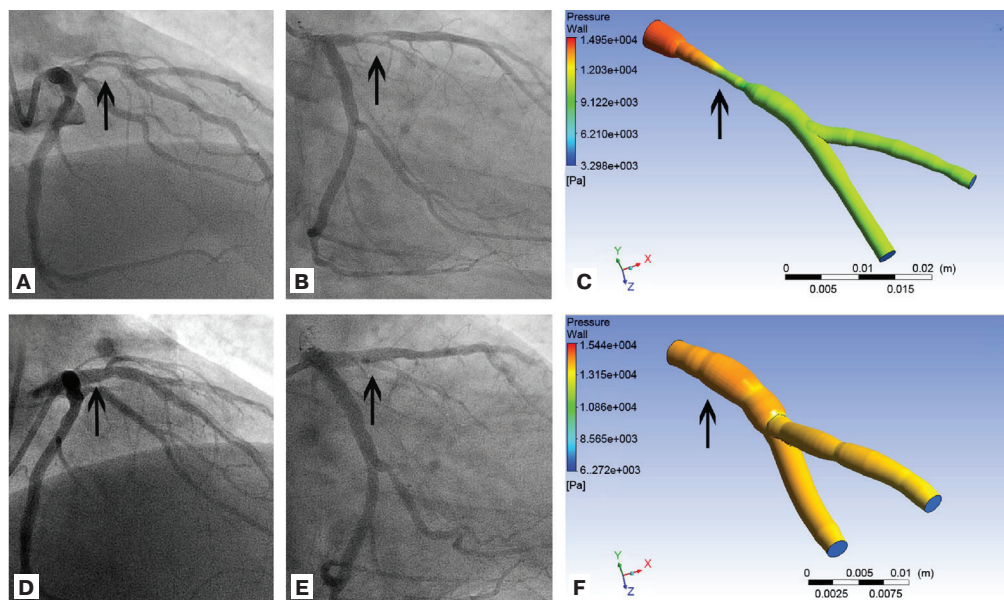


Рис. 13. Клинический пример неинвазивного расчета показателя vFFR на передней межжелудочковой артерии.

Примечание: источник — Morris PD, Ryan D, Morton AC, et al. Virtual fractional flow reserve from coronary angiography: modeling the significance of coronary lesions: results from the VIRTU-1 (VIRTUal Fractional Flow Reserve From Coronary Angiography) study. JACC: Cardiovascular Interventions. 2013;6(2):149-157. doi:10.1016/j.jcin.2012.08.024.

Снимки пациента № 11, 50-летнего мужчины с хронической ишемической болезнью сердца и стенозом проксимального отдела левой передней межжелудочковой артерии. Была выполнена коронарография и записаны две ангиограммы, одна с краниальным, а другая с каудальным наклоном. (А и В) Отдельные кадры, полученные при повороте черепа, в передне-задней (А) и правой передней косой (В) проекциях. Стрелками обозначен стеноз. Исходное значение mFFR составило 0,51. Ангиографические данные были обработаны для анатомической и физиологической реконструкции, которая представлена в графиках С. Цвета отображают давление (Па) в соответствии с приведенной шкалой. Значение vFFR составило 0,60. Был имплантирован стент размером 4×12 мм. Была выполнена контрольная коронарография, и mFFR составил 0,95. Соответствующие изображения, полученные на основе коронарографии после имплантации стента и реконструкции, показаны на рисунках D, E и F. Показатель vFFR после имплантации составил 0,96.

$$iFR = \frac{P_d}{P_w}$$

Рис. 14. Формула расчета iFR.

Сокращения: iFR — Instantaneous Wave-Free Ratio, P_d — давление после стеноза в фазе покоя (wave-free period), P_w — давление до стеноза (значение давления в аорте) в фазе покоя (wave-free period).

нения в клинической и экспериментальной практике: Angio-iFR, AI-Based iFR, CNN-Transformer model для оценки iFR.

Angio-iFR

Angio-iFR — программное обеспечение для неинвазивного расчета показателя iFR в режиме реального времени на основании данных КАГ (рис. 15).

Процесс измерения, по аналогии с программой по расчету FFR, основан на создании модели коронарного русла аналогичной электрической цепи, с последующим автоматизированным расчетом диаметра просвета и длины КА, а также делением ее на анатомические сегменты. Следующим этапом выполняется расчет закономерного уменьшения давления тока крови в каждом сегменте сосуда по закону Пуазейля с учетом эффектов сопротивления: переменной трения Дарси-Вейсбаха

и потери на расширение Борда-Карно, что позволяет учитывать влияние турбулентного потока, очагового поражения, наличие зон бифуркаций и потерю калибра КА на изменения внутрисосудистого давления. В результате учитывается перепад давления по всей длине исследуемой артерии за счет суммирования их перепадов в каждом отдельном сегменте. Обязательным требованием для корректной работы алгоритма является сопутствующее измерение внутриаортального давления [30, 31].

Согласно результатам проспективного многоцентрового клинического исследования ReVEAL iFR, включавшего данные 440 пациентов со стабильной ИБС, время для программного расчета показателя iFR на основе одной проекции с применением данной системы составляет всего несколько секунд (<60 сек), по сравнению со временем расчета с использованием систем QFR, saFFR, FFRangio (5 минут, 4,54 мин и 2,7 мин, соответственно) [32]. Тем не менее чувствительность и специфичность Angio-iFR составляют $\geq 80\%$ и $\geq 75\%$, соответственно [32], в связи чем требуется дальнейшее изучение целесообразности применения данного программного обеспечения в клинической практике.

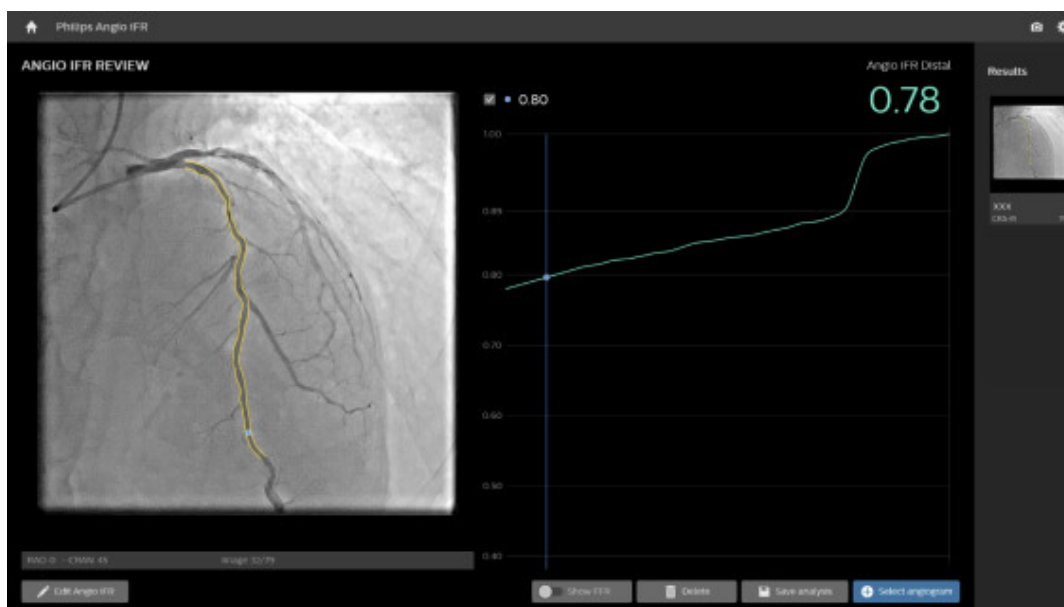


Рис. 15. Клинический пример неинвазивного расчета показателя Angio-iFR.

Примечание: источник — Ono M, Serruys PW, Patel MR, et al. A prospective multicenter validation study for a novel angiography-derived physiological assessment software: Rationale and design of the radiographic imaging validation and evaluation for Angio-iFR (ReVEAL iFR) study. *American Heart Journal*. 2021;239:19-26. doi:10.1016/j.ahj.2021.05.004.

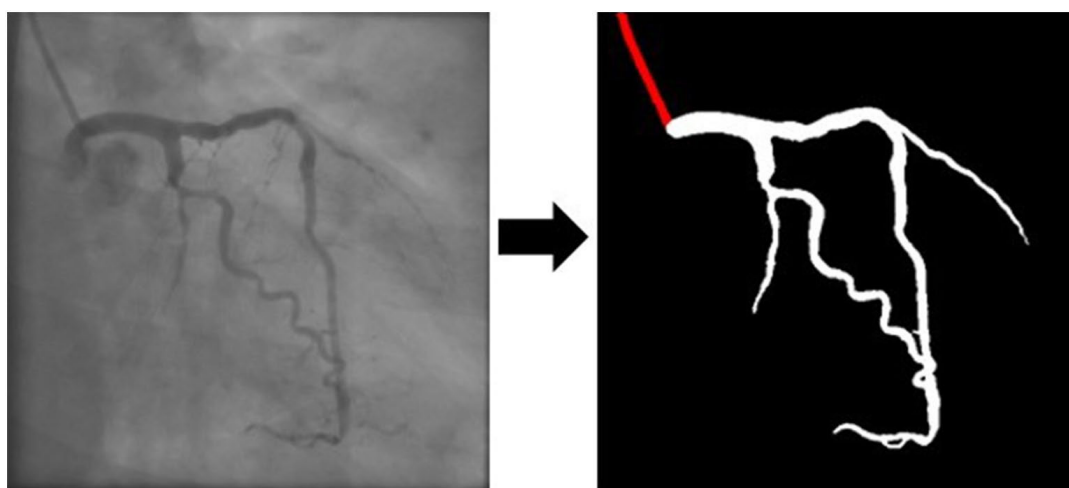


Рис. 16. Сегментация КА при использовании программно-аппаратного комплекса для расчета неинвазивного показателя AI-iFR.

Примечание: источник — Oliveira C, Vilela M, Silva Marques J, et al. Non-invasive derivation of instantaneous free-wave ratio from invasive coronary angiography using a new deep learning artificial intelligence model and comparison with human operators' performance. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*. 2025;1-17. doi:10.1007/s10554-025-03369-y.

Расчет iFR при помощи ИИ (AI-Based iFR Technology)

Еще одной технологией, позволяющей на основании данных КАГ производить оценку гемодинамической значимости поражения, является AI-Based iFR Technology (AI-iFR) [33, 34] (рис. 16).

Расчет показателя AI-iFR осуществляется на основании данных 1 или 2 проекций. Предобученная нейронная сеть выполняет сегментацию целевого сосуда с последующим извлечением морфологических и динамических признаков: ИИ сопоставляет геометрию КА и динамику контрастирования

с физиологическими параметрами. Следующим этапом происходит бинарная классификация полученного показателя внутрикоронарного давления дистальнее стеноза по общепринятому порогу iFR [34].

Эффективность использования технологий ИИ для неинвазивного расчета iFR была продемонстрирована в исследовании STARFLOW. Так, диагностическая точность для iFR составила 90,2% (95% ДИ: 86,0-94,6%), чувствительность — 87,2% (95% ДИ: 76,6-97,8%), специфичность — 93,2% (95% ДИ: 91,7-94,7%),

$$DFR = \frac{P_d}{P_{diastole}}$$

Рис. 17. Формула расчета DFR.

Сокращения: DFR — Diastolic Hyperemia-Free Ratio, P_d — давление после стеноза в фазу диастолы, $P_{diastole}$ — давление до стеноза (значение давления в аорте) в фазу диастолы.

$$RFR = \min \frac{P_d}{P_a}$$

Рис. 18. Формула расчета RFR.

Сокращения: RFR — Resting Full-Cycle Ratio, P_d — давление после стеноза (дистально), P_a — давление до стеноза (значение давления в аорте), $\min$ — минимальное значение отношения за сердечный цикл (с усреднением по нескольким 4-5 последовательным циклам).

тогда как при расчете показателя FFR они были статистически значимо ниже — 84,8%, 81,9% и 87,7%, соответственно [35].

Основным преимуществом использования данного метода является его еще большая скорость обработки изображения, по сравнению с аналогами.

Помимо общепринятых инвазивных индексов оценки параметров гемодинамики (FFR и iFR), описанных выше, дополнительно были разработаны альтернативные показатели, такие как DFR и RFR. Однако их широкое внедрение в клиническую практику ограничено низкими критериями доказательности ввиду отсутствия убедительных данных об их эффективности и безопасности.

Индекс DFR

Индекс DFR представляет собой негиперемический показатель соотношений давлений (дистального и аортального) в условиях покоя, измеряемый в фазу диастолы. При расчете показателя DFR во внимание принимается только диастолический кровоток в период расслабления левого желудочка и наименьшего сопротивления КА, при этом также учитывается микрососудистое сопротивление. Является официально валидированным безаденозиновым индексом наряду с iFR и RFR. Формула для расчета показателя DFR представлена на рисунке 17.

Установленный критерий порога значимости ишемии при оценке стенозов КА совпадает с критерием iFR и составляет $DFR \leq 0,89$.

Vira A, et al. (2024), проанализировав 343 пограничных коронарных поражения у 308 пациентов, продемонстрировали высокую значимую корреляцию результатов измерения DFR при сравнении с данными FFR ($r=0,75$, $p<0,05$), неверная оценка гемодинамической значимости поражения была отмечена только в 17% случаев [36]. Схожие данные были получены в проспективном исследовании Roh JW, et al. (2025), включавшем данные 300 пациентов с 324 погранич-

ными поражениями. Диагностическая точность DFR составила 92,0%, вне зависимости от сосуда, в котором проводилось измерение [37].

Nohara H, et al. (2024), ретроспективно проанализировав 1033 пограничных поражения КА у 761 пациента, не выявили значимого неблагоприятного влияния коморбидной патологии (нарушения функции почек, требующие проведения процедуры гемодиализа, сопутствующее снижение фракции выброса левого желудочка) на информативность показателя DRF. Также авторами была отмечена хорошая корреляция между измерениями FFR и DFR, как в группе пациентов на гемодиализе и сниженной фракцией выброса левого желудочка ($r=0,780$, $p<0,0001$), так и без данных осложнений ($r=0,770$, $p<0,0001$) [38]. Высокая диагностическая значимость DRF отмечена как у пациентов с острой, так и хронической формами ИБС [39, 40].

Главными преимуществами данного метода являются: отсутствие зависимости от показателей систолической гемодинамики, что позволяет получать наибольшую стабильность измерения и качество записи на фоне тахикардии или нарушения ритма сердца, по сравнению с классической iFR.

Тем не менее применение данной методики остается ограниченным из-за недостаточности валидированных данных и крупных рандомизированных исследований, подтверждающих ее клиническую эффективность и безопасность.

RFR

RFR — усредненный показатель давления за весь сердечный цикл в покое, основанный на расчете наименьшего отношения дистального коронарного давления (P_d) к давлению в аорте (P_a) в состоянии покоя в течение 5 сердечных циклов [41]. Формула для расчета показателя RFR представлена на рисунке 18.

В рамках нескольких исследований было установлено, что оптимальным пороговым значением ишемии для RFR является показатель $\leq 0,89$. При значении $RFR \leq 0,89$ показано проведение реваскуляризации КА, в случае же увеличения показателя $>0,89$ рекомендована консервативная терапия [41, 42]. В отличие от FFR, для проведения RFR не требуется предвартельная медикаментозная дилатация КА.

В 2018г были опубликованы результаты ретроспективного исследования VALIDATE-RFR, в рамках которого проводилось сравнение измерений RFR как с данными FFR ($n=633$), так и iFR ($n=504$). В результате полученные данные RFR оказались диагностически эквивалентны обоим индексам резерва кровотока ($p<0,05$) [41].

Wienemann H, et al. (2021), проанализировав 712 поражений КА у 617 пациентов в немецкой популяции, также подтвердили значимую корреляцию между результатами RFR и FFR ($r=0,766$, $p<0,01$). При этом авторы отметили, что в 20% случаев может отмечаться несоответствие получаемых данных,

предикторами которых могут быть наличие ЧКВ в анамнезе, заболеваний периферических артерий, женский пол, а также поражения огибающей артерии и передней межжелудочковой ветви [43]. Схожие результаты при сравнении методик RFR и FFR были получены в рамках исследования Kato Y, et al. (2021), где было установлено, что у пациентов женского пола или у пациентов, находящихся на гемодиализе, а также при оценке поражений в передней межжелудочковой ветви RFR может переоценивать функциональную значимость стеноза [44]. В работе Myung Lee J, et al., проанализировавших 1024 коронарных поражения, наибольшая корреляция отмечалась между RFR и iFR ($r=0,979$), нежели с показателем FFR ($r=0,822$), ($p<0,001$) [45].

Таким образом, RFR в качестве нового негиперемического индекса представляет собой альтернативу FFR и iFR для оценки промежуточных стенозов КА. Главными преимуществами данной методики являются: отсутствие необходимости индуцировать состояние гиперемии, что упрощает процедуру измерения и является более экономически оправданным [46], кроме того в рамках исследования VALIDATE-RFR было установлено, что данная методика обладает потенциальной возможностью выявления физиологически значимых коронарных стенозов, которые могли быть

не признаны таковыми при использовании методик, требующих ЭКГ-синхронизации. RFR не зависит от ЭКГ и различных смещений и артефактов в рамках сердечного цикла [41].

Заключение

В настоящее время опубликовано значительное количество работ, подтверждающих высокую эффективность оценки гемодинамической значимости стенозирующих поражений КА путем расчета инвазивных показателей FFR или iFR. Тем не менее параллельно происходит активная разработка программно-аппаратных решений на основе алгоритмов ИИ, позволяющих производить расчеты данных показателей неинвазивным способом. Однако несмотря на очевидные экономические преимущества использования данных программ, их высокую диагностическую точность и значительное ускорение получения "расчитанного показателя", необходимо дальнейшее обучение моделей машинного обучения для более корректной обработки данных.

Отношения и деятельность: все авторы заявляют об отсутствии потенциального конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Декларация ИИ. Не предоставлена.

Литература/References

- Shi H, Xia Y, Cheng Y, et al. Global burden of ischaemic heart disease from 2022 to 2050: projections of incidence, prevalence, deaths, and disability-adjusted life years. *European Heart Journal-Quality of Care and Clinical Outcomes*. 2025;11(4):355-66. doi:10.1093/ehjqcco/qcae049.
- Barbarash OL, Karpov YuA, Panov AV, et al. 2024 Clinical practice guidelines for Stable coronary artery disease. *Russian Journal of Cardiology*. 2024;29(9):6110. (In Russ.) Барбараш О.Л., Карпов Ю.А., Панов А.В. и др. Стабильная ишемическая болезнь сердца. Клинические рекомендации 2024. Российский кардиологический журнал. 2024;29(9):6110. doi:10.15829/1560-4071-2024-6110.
- Pijls NH, Van Schaardenburgh P, Manoharan G, et al. Percutaneous coronary intervention of functionally nonsignificant stenosis: 5-year follow-up of the DEFER Study. *Journal of the American College of Cardiology*. 2007;49(21):2105-11. doi:10.1016/j.jacc.2007.01.087.
- Zimmermann FM, Ferrara A, Johnson NP, et al. Deferral vs. performance of percutaneous coronary intervention of functionally non-significant coronary stenosis: 15-year follow-up of the DEFER trial. *European heart journal*. 2015;36(45):3182-8. doi:10.1093/eurheartj/ehv452.
- Tonino PA, De Bruyne B, Pijls NH, et al. Fractional flow reserve versus angiography for guiding percutaneous coronary intervention. *New England Journal of Medicine*. 2009;360(3):213-24. doi:10.1056/NEJMoa0807611.
- Fearon WF, Nishi T, De Bruyne B, et al. Clinical Outcomes and Cost-Effectiveness of Fractional Flow Reserve-Guided Percutaneous Coronary Intervention in Patients With Stable Coronary Artery Disease: Three-Year Follow-Up of the FAME 2 Trial (Fractional Flow Reserve Versus Angiography for Multivessel Evaluation). *Circulation*. 2018;137(5):480-7. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.117.031907.
- Davies JE, Sen S, Dehbi HM, et al. Use of the Instantaneous Wave-free Ratio or Fractional Flow Reserve in PCI. *New England Journal of Medicine*. 2017;376(19):1824-34. doi:10.1056/NEJMoa1700445.
- Göteborg M, Christiansen EH, Gudmundsdottir IJ, et al. Instantaneous Wave-free Ratio versus Fractional Flow Reserve to Guide PCI. *New England Journal of Medicine*. 2017;376(19):1813-23. doi:10.1056/NEJMoa1616540.
- Vrints C, Andreotti F, Koskinas KC, et al. 2024 ESC guidelines for the management of chronic coronary syndromes: developed by the task force for the management of chronic coronary syndromes of the European Society of Cardiology (ESC) endorsed by the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS). *European heart journal*. 2024;45(36):3415-537. doi:10.1093/eurheartj/ehae177.
- Trofimov YuV, Semashko VS, Muravyov IP, et al. Fuzzy production rules and deep learning neural networks: explicable artificial intelligence 2.0 for coronary stenosis diagnosis. *System analysis in science and education*. 2025;(2):73-82. (In Russ.) Трофимов Ю.В., Семашко В.С., Муравьев И.П. и др. Нечёткие продукционные правила и нейросети глубокого обучения: объяснимый искусственный интеллект 2.0 для диагностики коронарных стенозов. Системный анализ в науке и образовании. 2025;(2):73-82. EDN: ONRAKG.
- Bochkarev VA, Usynin AA, Osipov AD, et al. Models of cardiac artery segmentation from coronary angiographic images. *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*. 2025;(2/69):65-87. (In Russ.) Бочкарев В.А., Усынин А.А., Осипов А.Д. и др. Модели сегментации сердечных артерий по коронарографическим снимкам. Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025;(2/69):65-87. doi:10.17072/1993-0550-2025-2-65-87.
- Abdualimov TP, Obrezan AG. Potential of artificial intelligence in prediction of coronary arterial lesions. *Kardiologiya: novosti, mneniya, obuchenie*. 2022;10(1-28):34-9. (In Russ.) Абдуалимов Т.П., Обрезан А.Г. Возможности искусственного интеллекта в прогнозировании поражения коронарных артерий. Кардиология: новости, мнения, обучение. 2022;10(1-28):34-9. doi:10.33029/2309-1908-2022-10-1-34-39.
- Gognieva DG, Gamilov TM, Pryamonosov RA, et al. Noninvasive assessment of the fractional reserve of coronary blood flow with a one-dimensional mathematical model. Preliminary results of the pilot study. *Russian Journal of Cardiology*. 2019;24(3):60-8. (In Russ.) Гогниева Д.Г., Гамилов Т.М., Прямоносоев Р.А. и др. Неинвазивная оценка фракционного резерва коронарного кровотока при помощи одномерной математической модели. Промежуточные результаты пилотного исследования. Российский кардиологический журнал. 2019;24(3):60-8. doi:10.15829/1560-4071-2019-3-60-68.
- Gognieva DG, Pershina ES, Mitina YuO, et al. Non-invasive fractional flow reserve: a comparison of one-dimensional and three-dimensional mathematical modeling effectiveness. *Cardiovascular Therapy and Prevention*. 2020;19(2):2303. (In Russ.) Гогниева Д.Г., Першина Е.С., Митина Ю.О. и др. Сравнение диагностической эффективности методик неинвазивного расчета фракционного резерва кровотока, основанных на построении одномерной и трехмерной математических моделей. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2020;19(2):2303. doi:10.15829/1728-8800-2020-2303.
- Pijls NH, van Son JA, Kirkeeide RL, et al. Experimental basis of determining maximum coronary, myocardial, and collateral blood flow by pressure measurements for assessing functional stenosis severity before and after percutaneous transluminal coronary angioplasty. *Circulation*. 1993;87(4):1354-67. doi:10.1161/01.cir.87.4.1354.

16. Lotfi A, Jeremias A, Fearon WF, et al. Expert consensus statement on the use of fractional flow reserve, intravascular ultrasound, and optical coherence tomography: a consensus statement of the Society of Cardiovascular Angiography and Interventions. *Catheter Cardiovasc Interv.* 2014;83(4):509-18. doi:10.1002/ccd.25222.
17. Pijls NH, De Bruyne B, Peels K, et al. Measurement of fractional flow reserve to assess the functional severity of coronary-artery stenoses. *New England Journal of Medicine.* 1996;334(26):1703-8. doi:10.1056/NEJM199606273342604.
18. Zhang D, Lv S, Song X, et al. Fractional flow reserve versus angiography for guiding percutaneous coronary intervention: a meta-analysis. *Heart.* 2015;101(6):455-62. doi:10.1136/heartjnl-2014-306578.
19. Antoniadis M, Stader J, Ussat M, et al. Comparison of quantitative flow ratio (QFR) and instantaneous wave-free ratio (iFR) or resting full-cycle ratio (RFR) during daily routine in the catheterization laboratory. *European Heart Journal.* 2022;43(S2): ehac544.1369. doi:10.1093/eurheartj/ehac544.1369.
20. Salihi A, Zulauff J, Gadi MA, et al. Head-to-Head Comparison of Learning Curves Between QFR and FFRangio Software Users. *Catheterization and Cardiovascular Interventions.* 2025;105(3):692-7. doi:10.1002/ccd.31384.
21. Antoniadis M, Blum M, Ussat M, et al. Standardized angiographic projections allow evaluation of coronary artery side branches with quantitative flow ratio (QFR). *IJC Heart & Vasculture.* 2024;50:101349. doi:10.1016/j.ijcha.2024.101349.
22. Tu S, Ding D, Chang Y, et al. Diagnostic accuracy of quantitative flow ratio for assessment of coronary stenosis significance from a single angiographic view: a novel method based on bifurcation fractal law. *Catheterization and Cardiovascular Interventions.* 2021;97:1040-7. doi:10.1002/ccd.29592.
23. Fearon WF, Achenbach S, Engstrom T, et al. Accuracy of fractional flow reserve derived from coronary angiography. *Circulation.* 2019;139(4):477-84. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.118.037350.
24. Kornowski R, Lavi I, Pellicano M, et al. Fractional flow reserve derived from routine coronary angiograms. *Journal of the American College of Cardiology.* 2016;68(20):2235-7. doi:10.1016/j.jacc.2016.08.051.
25. Pellicano M, Lavi I, De Bruyne B, et al. Validation study of image-based fractional flow reserve during coronary angiography. *Circulation: Cardiovascular Interventions.* 2017;10(9):e005259. doi:10.1161/CIRCINTERVENTIONS.116.005259.
26. Li J, Gong Y, Wang W, et al. Accuracy of computational pressure-fluid dynamics applied to coronary angiography to derive fractional flow reserve: FLASH FFR. *Cardiovascular research.* 2020;116(7):1349-56. doi:10.1093/cvr/cvz289.
27. Masdjedi K, Tanaka N, Van Belle E, et al. Vessel fractional flow reserve (vFFR) for the assessment of stenosis severity: the FAST II study. *EuroIntervention.* 2022;17(18):1498. doi:10.4244/EIJ-D-21-00471.
28. Scoccia A, Byrne RA, Banning AP, et al. Fractional flow reserve or 3D-quantitative-coronary-angiography based vessel-FFR guided revascularization. Rationale and study design of the prospective randomized fast III trial. *American Heart Journal.* 2023;260:1-8. doi:10.1016/j.ahj.2023.02.003.
29. Pisters R, Ilhan M, Veenstra LF, et al. Instantaneous wave-free ratio and fractional flow reserve in clinical practice. *Netherlands Heart Journal.* 2018;26:385-92. doi:10.1007/s12471-018-1125-1.
30. Donnelly PM, Kolossváry M, Karády J, et al. Experience with an on-site coronary computed tomography-derived fractional flow reserve algorithm for the assessment of intermediate coronary stenoses. *The American Journal of Cardiology.* 2018;121(1):9-13. doi:10.1016/j.amjcard.2017.09.018.
31. Van Hamersvelt RW, Voskuil M, De Jong PA, et al. Diagnostic performance of on-site coronary CT angiography-derived fractional flow reserve based on patient-specific lumped parameter models. *Radiology: Cardiothoracic Imaging.* 2019;1(4):e190036. doi:10.1148/ryct.2019190036.
32. Ono M, Serruys PW, Patel MR, et al. A prospective multicenter validation study for a novel angiography-derived physiological assessment software: Rationale and design of the radiographic imaging validation and evaluation for Angio-iFR (ReVEAL iFR) study. *American Heart Journal.* 2021;239:19-26. doi:10.1016/j.ahj.2021.05.004.
33. Li B, Chen H, Wang H, et al. An overview of computational coronary physiology technologies based on medical imaging and artificial intelligence. *Reviews in Cardiovascular Medicine.* 2024;25(6):211. doi:10.31083/j.rcm2506211.
34. Oliveira C, Vilela M, Silva Marques J, et al. Non-invasive derivation of instantaneous free-wave ratio from invasive coronary angiography using a new deep learning artificial intelligence model and comparison with human operators' performance. *The International Journal of Cardiovascular Imaging.* 2025;41(4):755-71. doi:10.1007/s10554-025-03369-y.
35. De Filippo O, Mineo R, Millesimo M, et al. Non-invasive physiological assessment of intermediate coronary stenoses from plain angiography through artificial intelligence: the STARFLOW system. *European Heart Journal-Quality of Care and Clinical Outcomes.* 2025;11(3):343-52. doi:10.1093/ehjcco/qcae024.
36. Vira A, Balanescu DV, George JA, et al. Diagnostic Performance of Diastolic Hyperemia-Free Ratio Compared With Invasive Fractional Flow Reserve for Evaluation of Coronary Artery Disease. *The American Journal of Cardiology.* 2024;214:55-8. doi:10.1016/j.amjcard.2023.12.050.
37. Roh JW, Lee OH, Kim Y, et al. Diastolic hyperemia-free ratio in patients with coronary artery disease: a prospective observational study. *Korean Circulation Journal.* 2025;55(7):600-10. doi:10.4070/kcj.2024.0351.
38. Nohara H, Egami Y, Abe M, et al. Diastolic hyperemia-free ratio for the assessment of intermediate coronary artery stenosis in patients with hemodialysis. *European Heart Journal.* 2024;45(S1): ehae666-1392. doi:10.1093/eurheartj/ehae666.1392.
39. Tebaldi M, Biscaglia S, Erriquez A, et al. Comparison of quantitative flow ratio, Pd/Pa and diastolic hyperemia-free ratio versus fractional flow reserve in non-culprit lesion of patients with non ST-segment elevation myocardial infarction. *Catheterization and Cardiovascular Interventions.* 2021;98(6):1057-65. doi:10.1002/ccd.29380.
40. Ramamurthy MT, Balakrishnan VK, Vallivedu MV, et al. Improved Diagnosis through Diastolic Hyperemia-Free Ratio (DFR) over Fractional Flow Reserve (FFR) in Intermediate Coronary Lesions. *Cardiology and cardiovascular medicine.* 2023;7(2):108-16.
41. Svanerud J, Ahn JM, Jeremias A, et al. Validation of a novel non-hyperaemic index of coronary artery stenosis severity: the Resting Full-cycle Ratio (VALIDATE RFR) study. *EuroIntervention.* 2018;14(7):806-14. doi:10.4244/EIJ-D-18-00342.
42. Zdzierak B, Zasada W, Krawczyk-Ozóg A, et al. Comparison of Fractional Flow Reserve with Resting Non-Hyperemic Indices in Patients with Coronary Artery Disease. *Journal of Cardiovascular Development and Disease.* 2023;10(2):34. doi:10.3390/jcdd10020034.
43. Wienemann H, Meyer A, Mauri V, et al. Comparison of Resting Full-Cycle Ratio and Fractional Flow Reserve in a German Real-World Cohort. *Frontiers in cardiovascular medicine.* 2021;8:744181. doi:10.3389/fcvm.2021.744181.
44. Kato Y, Dohi T, Chikata Y, et al. Predictors of discordance between fractional flow reserve and resting full-cycle ratio in patients with coronary artery disease: Evidence from clinical practice. *Journal of Cardiology.* 2021;77(3):313-9. doi:10.1016/j.jjcc.2020.10.014.
45. Lee JM, Choi KH, Park J, et al. Physiological and clinical assessment of resting physiological indexes: resting full-cycle ratio, diastolic pressure ratio, and instantaneous wave-free ratio. *Circulation.* 2019;139(7):889-900. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.118.037021.
46. Lee OH, Roh JW, Kim Y, et al. Invasive physiologic assessment of coronary artery stenosis by resting full-cycle ratio and fractional flow reserve: a prospective observational study. *Scientific Reports.* 2023;13(1):15783. doi:10.1038/s41598-023-43082-1.

Адреса организаций авторов: ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины Минздрава России, Петроверигский пер., д. 10, стр. 3, Москва, Россия; ГБУЗ МО Одинцовская областная больница, ул. Маршала Бирюзова, д. 3Г, Одинцово, Россия.

Addresses of the authors' institutions: National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Petroverigsky Lane, 10, bld. 3, Moscow, 101990, Russia; Odintsovo Regional Hospital, Marshal Biryuzov str., 3G, Odintsovo, Russia.