

**ПЕРФУЗИОННЫЕ ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МИОКАРДА:
КЛИНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ ИБС**

Асланиди И.П., Суркова Н.А., Шурупова И.В.

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр
сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева» МЗ РФ. г. Москва, Россия.

Обзор литературы посвящен анализу возможностей современных неинвазивных методов оценки перфузии и количественных показателей кровотока при обследовании пациентов с ишемической болезнью сердца (ИБС). Радионуклидные методы диагностики также как и компьютерно-томографические (КТ) и магнитно-резонансные (МР) томографические исследования объединяет принцип томографического сбора данных и получение максимально детального на сегодняшний день изображения сердца. В статье изложены основные подходы к применению нагрузочных тестов в контексте визуализирующих, в том числе, радионуклидных методик, проанализированы результаты оценки их диагностической эффективности, освещены возможности количественной оценки кровотока.

Из представленных данных следует, что МРТ и КТ – наиболее развивающиеся в методическом плане виды исследования. В противовес этому радионуклидные методы можно охарактеризовать как наиболее валидированные, широко распространенные в клинической практике, имеющие большой потенциал в диагностике не только эпикардиальной коронарной болезни сердца, но и микрососудистой дисфункции.

Ключевые слова: перфузионная визуализация миокарда, ОФЭКТ, ПЭТ, КТ-перфузия, МРТ перфузионные исследования, гемодинамическая значимость стенозов.

Контактный автор: Шурупова И.В., e-mail: iffdoc@mail.ru

Для цитирования: Асланиди И.П., Суркова Н.А., Шурупова И.В. Перфузионные томографические методы визуализации миокарда: клиническое применение в диагностике ИБС. REJR 2025; 15(3):37-51. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-3-37-51.

Статья получена: 17.04.25

Статья принята: 27.10.25

**PERFUSION TOMOGRAPHIC METHODS OF MYOCARDIAL IMAGING: CLINICAL
APPLICATION IN DIAGNOSTICS OF CORONARY HEART DISEASE**

Aslanidi I.P., Surkova N.A., Shurupova I.V.

A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery. Moscow, Russia.

The literature review is devoted to the analysis of the capabilities of modern non-invasive methods for assessing perfusion and quantitative blood flow indices. Radionuclide diagnostic methods, as well as computed tomography (CT) and magnetic resonance (MR) tomography, combine the principle of tomographic data collection and obtaining the most detailed image of the heart to date. The article presents the main approaches to the use of stress-tests in the context of visualization techniques, analyzes the results of their diagnostic effectiveness and highlights the possibilities of quantitative blood flow assessment.

The presented data show that MR and CT are the most methodologically developing types of examinations. In contrast, radionuclide methods can be characterized as the most validated, widely used in clinical practice, having great potential in the diagnosis of not only epicardial coronary heart disease, but also microvascular dysfunction.

Keywords: myocardial perfusion imaging, SPECT, PET, CT perfusion, MRI perfusion studies, hemodynamic significance of stenosis.

Corresponding author: Shurupova I.V., e-mail: iffdoc@mail.ru

For citation: Aslanidi I.P., Surkova N.A., Shurupova I.V. Perfusion tomographic methods of myocardial imaging: clinical application in diagnostics of coronary heart disease. REJR 2025; 15(3):37-51. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-3-37-51.

Received: 17.07.25

Accepted: 27.10.25

Перфузия миокарда – это ключевой процесс, обеспечивающий доставку кислорода и питательных веществ к тканям сердца через коронарные сосуды. Оценка миокардиальной перфузии играет важную роль в диагностике и мониторинге таких различных сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), как ишемическая болезнь сердца (ИБС), инфаркт миокарда (ИМ) и хроническая сердечная недостаточность (ХСН). Современные методы визуализации перфузии миокарда позволяют получить точные данные о функциональном состоянии сердечной мышцы и коронарных артерий (КА), что способствует более точной оценке риска и оптимизации лечения.

В статье рассматриваются основные методы перфузионной визуализации миокарда, включая перфузионную компьютерную томографию (КТ), магнитно-резонансную томографию (МРТ), а также две наиболее информативные и широко используемые радионуклидные технологии: однофотонную эмиссионную компьютерную томографию (ОФЭКТ) и позитронно-эмиссионную томографию (ПЭТ).

Оценка стенозов коронарных артерий пограничной степени сужения представляет серьёзную клиническую проблему. Такие стенозы не всегда проявляются выраженными симптомами, но могут вызывать ишемию миокарда, особенно при повышенной нагрузке. Точная диагностика их клинического значения критически важна для принятия решений о дальнейшей тактике лечения – медикаментозной терапии или реваскуляризации. Вышеуказанные современные методы перфузионной визуализации позволяют оценить гемодинамическую значимость таких стенозов. У разных авторов встречаются различные значения для умеренной степени сужения КА, в основном это от 30-50% до 70-90% сужения просвета [1,2]. В действующих российских кардиологических рекомендациях это от 50% до 90%, в европейских – от 40% до 90% [2,3].

Перфузионные методы визуализации

предоставляют мощные инструменты для оценки промежуточных стенозов КА. Современная тенденция направлена на интеграцию количественной оценки кровотока (например, с помощью ПЭТ или КТ) с анатомической визуализацией для повышения точности диагностики и оптимизации лечения. Учитывая вышесказанное, данная тема статьи представляется весьма актуальной.

Принципы проведения томографических перфузионных исследований миокарда с целью выявления нарушений перфузии миокарда.

Общим принципом оценки перфузии сердечной мышцы для всех томографических методов (радионуклидных, КТ и МРТ с контрастным усилением) является оценка равномерности миокардиального кровотока. Для радионуклидных исследований миокарда (РИМ) распределение кровотока (равномерное или неравномерное) пропорционально распределению радиофармпрепарата (РФП) и может быть представлено по результатам сканирования и оценено визуально и полуколичественно. Радиофармпрепараты вводятся внутривенно и аккумулируются в клеточном пространстве кардиомиоцитов. Другими словами, РИМ-методики оценивают перфузию на «клеточном» уровне. При КТ и МРТ распределение кровотока пропорционально распределению контраста в околоклеточном пространстве, что отражает «тканевой» или интерстициальный уровень перфузии [4].

Если неравномерность перфузии в покое или, что более важно, на нагрузке, оцененная тем или иным способом, превосходит допустимые нормы, то такие изменения расцениваются как дефекты перфузии (ДП) и оцениваются полуколичественно, чаще в баллах. Другим более трудоемким способом является количественная оценка скорости кровотока в абсолютных величинах (мл/мин) на единицу ткани миокарда. Снижение скорости кровотока на максимальной вазодилатации в каком-либо отделе миокарда свидетельствует о его недостаточном (потенциаль-

но) кровоснабжении, чаще всего связанном со стенозированными КА.

Нагрузочные пробы при различных перфузионных исследованиях миокарда.

Стресс-тесты с физической нагрузкой необходимы для создания условий повышенной потребности миокарда в кислороде и усиленного коронарного кровотока, его неравномерность обычно обусловлена наличием стеноза коронарной артерии. Чаще всего пациент выполняет физическую нагрузку на велоэргометре с постепенным увеличением интенсивности. Метод широко используется при ОФЭКТ и немногочисленных МРТ-исследованиях, однако не подходит для протоколов, предполагающих динамическое сканирование с целью количественной оценки кровотока.

Фармакологический стресс-тест предпочтителен при невозможности выполнения пациентом физической нагрузки (например, при болезнях суставов или слабости). В качестве фармагрузки применяют препараты, воспроизводящие сосудорасширяющий эффект физической нагрузки. Наиболее часто используют прямые вазодилататоры (аденозин, дипиридамола, регаденозон), расширяющие мелкие и средние КА и значительно увеличивающие объем кровотока, также применяют инотропные и хронотропные агенты. Среди последней группы чаще используется добутамин, который, не являясь прямым вазодилататором, но учащая ритм сердца, повышает потребность миокарда в кислороде, что влечет за собой периферическую вазодилатацию. Повышение кровенаполнения миокарда при этом также носит неравномерный характер вследствие стенозирующего атеросклероза. В сочетании с внутривенным введением радионуклидных перфузионных индикаторов или контрастных средств, применяемых при КТ и МРТ, все виды физической или фармагрузки позволяют оценить наличие и распространенность дефектов перфузии.

Радионуклидные методы оценки миокардиальной перфузии.

В настоящее время наиболее валидированным методом оценки перфузии сердца является радионуклидная диагностика. При проведении радионуклидных перфузионных исследований (РПИ) используются РФП как генераторного, так и циклотронного производства, проникающие и накапливающиеся непосредственно в клетках миокарда. Однако способы транспорта в клетку для различных РФП также различаются. Для ОФЭКТ наиболее распространены две группы препаратов – ^{201}Tl -хлорид и РФП, меченные

$^{99\text{mTc}}$, для ПЭТ – ^{82}Rb -хлорид и ^{13}N -аммоний. Регистрация данных происходит на гамма-камерах (однофотонная эмиссионная компьютерная томография – ОФЭКТ) и позитронно-эмиссионных томографах (ПЭТ). Стресс-агентами выступают фармакологические препараты (ПЭТ и ОФЭКТ) и физическая нагрузка (ОФЭКТ).

Оба метода играют ключевую роль в диагностике гемодинамической значимости пограничных стенозов, в выявлении ишемии. ПЭТ является предпочтительным методом для количественной оценки кровотока, особенно в сложных клинических случаях. Отрицательные результаты визуализирующего стресс-теста практически сводят к минимуму обнаружение гемодинамически значимых стенозов (фракционный резерв кровотока (ФРК) $<0,80$) [3].

Перфузионная однофотонная эмиссионная томография миокарда.

Сцинтиграфия (или ОФЭКТ) миокарда является одним из наиболее доступных и широко используемых методов для диагностики ИБС, позволяющим с высокой точностью оценить преходящие (стресс-индуцированная ишемия) и стойкие нарушения перфузии миокарда, связанные с рубцовыми изменениями.

Использование $^{99\text{mTc}}$ вместо ^{201}Tl позволило повысить диагностическую эффективность из-за более высокого разрешения пространственной визуализации и меньшего затухания излучения в мягких тканях [5,6]. В среднем чувствительность ОФЭКТ с нагрузочными пробами в диагностике ИБС варьирует в пределах 73-92% (среднее значение 85-90%), специфичность – 63-87% (среднее значение 70-75%). Возможные различия в результативности метода связаны с отсутствием синхронизации с ЭКГ или учета коррекции поглощения. Указанные результаты основаны на визуальной оценке перфузионного изображения, когда за референтное значение принимается сегмент с максимальным накоплением РФП, остальные сегменты оцениваются по отношению к нему. Сложности возникают, когда метод сталкивается со снижением накопления индикатора во всех территориях миокарда ЛЖ и скорректированное к максимальному участку накопления диагностическое изображение не имеет дефекта перфузии – не выявляются различия в кровотоке между коронарными бассейнами [7]. Либо, указанное равномерное снижение аккумуляции перфузионного агента в бассейнах всех КА приводит к визуализации дефекта перфузии малого размера, не соответствующего истинному

объему ишемии [8,9]. Чаще всего ограничения в чувствительности анализа для выявления ишемии возникают у пациентов с многососудистым (МС) поражением КР из-за феномена «сбалансированной ишемии». Исследователи Aarnoudse W.H. и Madias J.E. уточнили, что в том числе и пограничные стенозы (50-70%) при МС-поражении могут приводить к формированию данного феномена [6,10].

Подтверждением значимости указанных ограничений являются результаты исследования Driessen R. с соавт. (2018 г). Были опубликованы данные диагностических характеристик для разных методик, в том числе ОФЭКТ, при выявлении поражений, ассоциированных с ишемией. В анализ было включено 612 КА, обращает внимание низкая чувствительность метода (42%) в диагностике поражений на уровне отдельного сосуда, что является прямым следствием присутствия сбалансированной ишемии. Специфичность (97%) и точность (82%) диагностики на уровне сосуда, а также аналогичные показатели на уровне пациента (61%, 78%, 93%) были выше [11].

Решением указанной проблемы стало внедрение новых гамма-камер с детекторами на основе кадмий-цинк-теллурида (CZT), которые обеспечили повышенную чувствительность счета, улучшили энергетическое и пространственное разрешение. Благодаря этому появилась возможность динамической оценки кровотока с расчетом абсолютных значений миокардиального кровотока нагрузки (МКнагр.), миокардиального кровотока покоя (МКпк.) и коронарного резерва (КР) [12].

В недавнем проспективном многоцентровом исследовании (2022 г.) были приведены данные о диагностической точности метода динамической ОФЭКТ для выявления стеноза $\geq 50\%$ (всего 154 пациента, с указанными стенозами 76 пациентов и 112 КА). Чувствительность составила 81,6% и 78,6% (на «пациент» и «сосуд» уровнях) для показателя МКнагр. 1,86 мл/мин/г, для КР с показателем 1,95 – 72,4% и 75,9% соответственно [13]. Тем самым было доказано, что количественная оценка КР и МКнагр. с помощью динамической ОФЭКТ с CZT-камерой может быть полезна для выявления сбалансированной ишемии, вызванной скрытой ИБС, у пациентов с нормальными показателями при проведении полуколичественной стресс-ОФЭКТ [12].

В другой работе были исследованы пациенты с наличием однососудистого поражения с пограничной степенью стеноза (40-

70%), где цель составляла определение их гемодинамической значимости. Показатель КР по данным динамической ОФЭКТ, в сравнении с эталонным инвФРК, имел умеренную корреляцию с ФРК ($r=0,505$, $p=0.003$). Диагностическая ценность КР (с порогом 1,73) в предсказании аномальной инвФРК была высока: чувствительность, специфичность и точность составили 88,9%, 83,3% и 87,9% соответственно. Однако работа ограничена маленькой выборкой пациентов ($n=34$) [14].

Крупными отечественными исследователями в данной области является научная группа из г. Томска (Завадовский К.В., Мочула А.В., Мальцева А.Н. и др.), которая подтвердила диагностическую ценность CZT-ОФЭКТ в определении гемодинамической значимости стеноза КА: чувствительность 57% и специфичность 92% – для регионарного МКнагр. ($\leq 0,54$ мл/мин/г), для КР – 71,4% и 92,8% соответственно (со значением $\leq 1,5$). Среди исследуемых поражений были пограничной степени тяжести (51-70%), из которых 55% (6/11) являлись гемодинамически значимыми (ФРК $\leq 0,80$) [15].

Десятилетия опыта работы с ОФЭКТ способствовали накоплению данных, демонстрирующих ее прогностическую роль. В исследовании 5183 пациентов ежегодные риски сердечной смерти и инфаркта миокарда составили 0,3% и 0,5% соответственно у 2946 пациентов с нормальным изображением перфузии, в отличие от 6% и 9,8% соответственно у 2237 пациентов с наличием дефектов перфузии [16]. У пациентов с диагностированной ИБС физиологическая информация, полученная с помощью стресс-визуализации перфузии миокарда, улучшает стратификацию риска по сравнению с информацией об анатомической оценке при КАГ [17].

К ограничениям метода относится сравнительно низкое пространственное разрешение (по сравнению с ПЭТ), необходимость использования радионуклидов, лучевая нагрузка (хотя ниже, чем при КТ, но выше, чем при ПЭТ). Динамическая оценка требует дальнейшей валидации и изучения.

Перфузионная позитронно-эмиссионная томография миокарда.

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) является одной из наиболее информативных и точных методик для оценки миокардиальной перфузии. В ПЭТ используются РФП, содержащие позитрон-излучающие радионуклиды (^{13}N , ^{15}O , ^{82}Rb или ^{18}F). В результате их радиохимического распада и аннигиляции при взаимодействии с электро-

нами непосредственно в тканях, образуются пары гамма-фотонов,двигающихся в противоположных направлениях. Происходит их одновременная регистрация двумя противоположными детекторами (благодаря кольцевому расположению).

Одним из больших преимуществ ПЭТ является высокая чувствительность и специфичность для оценки миокардиальной ишемии. Метод также позволяет проводить оценку метаболизма миокарда с использованием диагностического препарата ^{18}F -ФДГ, что дает возможность выявлять жизнеспособный миокард с сохраненным метаболизмом, даже если перфузия в этой области имеет значительные нарушения и изменения первично расценены как рубцовые.

Благодаря лучшей разрешающей способности и алгоритмам коррекции затухания ПЭТ-изображения превосходят по качеству ОФЭКТ-изображения [6]. Это приводит к более точной локализации дефекта перфузии соответственно бассейнам КА. Следует отметить, что ПЭТ является первым методом, использование которого позволило разработать принципы и способы количественной оценки кровотока, что также значительно улучшило диагностику ИБС за счет преодоления диагностических сложностей при наличии феномена «сбалансированной ишемии». Так в работе Kajander S.A. с участием 104 пациентов с ИБС, в том числе имеющих многососудистые стенозы КА и прошедших стресс-ПЭТ миокарда с $[^{15}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$, установлены ППЦ, ОПЦ и точность в определении значимого стеноза (ФРК \leq 0,80, либо инвКАГ стеноз \geq 50%) для абсолютной оценки кровотока 86%, 97% и 92% соответственно, а также для относительной оценки (по отношению к сегменту с максимальным накоплением) 61%, 83% и 73% соответственно. В частности, только 9 из 24 пациентов с поражением трех сосудов были правильно оценены с помощью относительного анализа [18].

Более позднее исследование Driessen R. et al. (2019 г.) также показало высокую чувствительность и специфичность для ПЭТ при выявлении поражений, ассоциированных с ишемией. Согласно площадям под кривыми рабочих характеристик ПЭТ продемонстрировала самые высокие показатели (AUC) как на уровне пациента, так и сосуда (0,86 и 0,90, $p=0,005$ соответственно) [11]. В исследовании Wang X. в 2023 году пациенты с ИБС с наличием дефекта перфузии при ПЭТ с $[^{15}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ были независимо ассоциированы не только наличием сужения просвета КА, но и качественными характеристиками атеросклеротической бляшки – объемного некро-

тического ядра (по данным КТ-КАГ) [19].

Следует отметить опыт отечественных исследователей из г. Санкт-Петербурга, которые рекомендуют проводить ПЭТ/КТ-исследование в целом всем пациентам, страдающим ИБС, однако, учитывая высокую стоимость и малую доступность методики, в первую очередь – пациентам с промежуточными стенозами КА (50%-70% от диаметра просвета сосуда) для оценки их функциональной значимости и лицам с тяжелыми нарушениями ритма и проводимости, при которых другие методы комплексного лучевого исследования неинформативны, а полученные результаты сомнительны [20].

Более детальный анализ группы пограничных стенозов проведен в работе Шавман М.Г. Из группы артерий с пограничным поражением 42% (42/101) имели сниженный МКнагр. (\leq 2,09) и 43% (43/101) артерий – сниженный КР (\leq 2,50). Скорость кровотока и резерв в группе с пограничным поражением были достоверно выше, чем в среднем у пациентов с более значительными стенозами (\geq 75%), но достоверно ниже (МКнагр. 2,26 мл/мин/г и КР 2,68), чем в группе интактных КА (МКнагр. 2,66 мл/мин/г и КР 3,45).

Среди исследуемых с пограничным поражением 18% имели снижение регионарного КР диффузного характера, т.е. во всех трех коронарных бассейнах, что указывает на вероятное сочетание признаков микровазкулярной дисфункции и атеросклеротического поражения КА [21]. В сложных диагностических случаях ПЭТ/КТ, оценивая состояние микроциркуляторного русла и выявляя признаки микрососудистой дисфункции, помогает в определении лечебной тактики у пациентов без признаков стенозирующего поражения, но с сопутствующими факторами риска сердечно-сосудистой патологии, такими как артериальная гипертензия, сахарный диабет [22].

Измерения субэндокардиальной перфузии и количественная оценка трансмурального градиента перфузии являются многообещающими приложениями, в которых улучшается эффективность ПЭТ. Это будет полезно для повышения чувствительности и специфичности диагностики ИБС [23].

К ограничениям метода ПЭТ относится высокая стоимость, низкая доступность, наличие лучевой нагрузки, необходимость специализированного оборудования. Кроме того, существует методологическая неоднородность, особенно в отношении порогов аномалий количественных измерений, общепринятые пороги по абсолютным показателям кровотока отсутствуют.

К преимуществам дополнительно стоит отнести хорошую визуализацию у пациентов с ожирением (из-за высокой энергии фотонов), низкую дозу облучения по сравнению с ОФЭКТ. Также ПЭТ может быть рекомендована пациентам с известным или предполагаемым диффузным нарушением МК, например, пациентам с многососудистым поражением коронарных артерий или микрососудистой дисфункцией (рис. 1) [24].

Оценка перфузии миокарда методами КТ и МРТ.

При проведении перфузионных КТ- и МРТ-исследований миокарда используются контрастные препараты, распределяющиеся во внеклеточной жидкости и не имеющие механизмов проникновения через сохранную мембрану кардиомиоцита внутрь клетки. Для КТ это водорастворимые йодсодержащие рентгеноконтрастные препараты, для МРТ – индикаторы на основе солей гадолиния. Указанные контрастные агенты не метаболизируются, гадолиний-содержащие препараты не связываются с белками плазмы крови, а связывание йодсодержащих препаратов составляет менее 2%, последние не подвергаются дейодированию. Обе группы препаратов выводятся из организма почками посредством клубочковой фильтрации в неизменном виде.

Перфузионная магнитно-резонансная томография миокарда.

Известно, что МРТ является альтернативным методом диагностики нарушений сократимости миокарда у пациентов с подозрением на ИБС, когда ЭхоКГ не дает однозначных результатов [25]. Метод является эталонным, с точки зрения точности и воспроизводимости, для оценки объемов и других геометрических параметров ЛЖ. Опосредованное выявление участков нарушения перфузии (или ишемии) при помощи анализа движения и сократимости регионарной стенки ЛЖ по данным МР-сканирования является хорошо разработанной методикой, не требующей обязательного использования контрастных агентов (парамагнетиков).

МРТ также позволяет эффективно оценивать перфузию миокарда в контексте выявления стресс-индуцированной ишемии. Существующий способ, подобно радионуклидным методам визуализации и КТ-перфузии, основан на выявлении дефектов перфузии – участков сниженного распределения парамагнитного контрастного вещества, в покое и на пике фармакологической нагрузки, чаще на фоне введения вазодилаторов [26].

Для исследования перфузии миокарда

предпочтительно проведение 3D-сканирования МРТ. При 3D-визуализации создаются трехмерные изображения сердца по множеству срезов, что дает полную картину кровоснабжения сердца. Преимущества – более точные и подробные данные, позволяющие оценить перфузию в разных слоях и частях миокарда, возможность выявления более мелких дефектов перфузии [27]. Согласно данным мета-анализа зарубежных авторов (Danad I. с соавт, 2015 г.), чувствительность и специфичность в целом для перфузионной стресс-МРТ составляют 89-90% и 87-94% соответственно [28].

В работе Andrew Arai с соавт. была применена методика оценки миокардиальной перфузии с учетом позднего контрастного усиления (late gadolinium enhancement). Были проведены два международных клинических исследования с использованием гадобутрола, включивших в общей сложности 764 пациента – GadaCAD1, 2013 год (n = 376) и GadaCAD2, 2019 год (n = 388). Показатели чувствительности и специфичности для выявления стеноза $\geq 70\%$ (по КАГ) при многососудистом характере поражения составили 87,4% и 73,0% соответственно. Нарушения перфузии по данным стресс-МРТ были отмечены у сравнительно небольшой части пациентов с промежуточными стенозами – 18% в GadaCAD1 и у 29% пациентов в GadaCAD2 [29].

В настоящее время в клинической практике более широко используется визуальная оценка дефектов перфузии. Тем не менее, в научной сфере активно ведутся работы по изучению абсолютных показателей миокардиального кровотока. Важной составляющей таких работ является определение пороговых значений, разделяющих нормальный кровоток и сниженный в условиях коронарного стеноза [30]. В работе Giorgos Papanastasiou с соавт. было проведено сравнение двух методов моделирования – деконволюции Ферми и деконволюции распределенных параметров [31]. Авторы получили пороговые показатели для диагностики ИБС: для модели Ферми МКнагр. составил 2,49 мл/мин/мл на уровне отдельного сосуда и 2,60 мл/мин/мл на уровне пациента, для модели распределенных параметров – 1,75 мл/мин/мл на уровне сосуда и 2,00 мл/мин/мл на уровне пациента. В некоторых работах по изучению количественных показателей миокардиального кровотока при МРТ-перфузии с картированием получена хорошая воспроизводимость метода, соизмеримая с эталонной ПЭТ [32].

В целом, можно заключить, что основ-

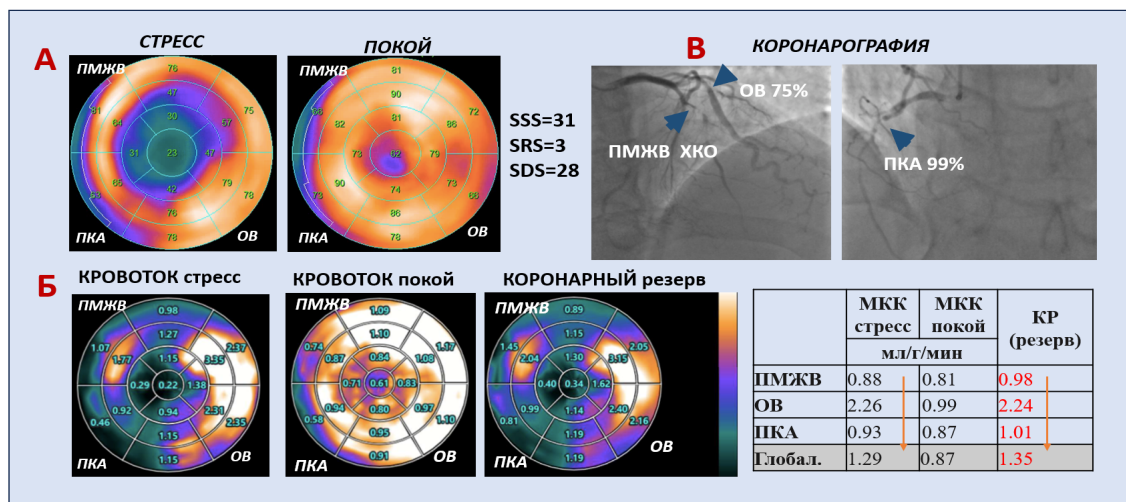


Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. Результаты стресс-ПЭТ миокарда с 13N-аммонием, выполненной в динамическом режиме сканирования.

Результаты стресс-ПЭТ миокарда с 13N-аммонием – полуколичественная оценка перфузии на нагрузке и в покое методом построения круговых диаграмм и определение SSS (суммарного балла нагрузки), SRS (суммарного балла покоя), SDS (суммарного балла разницы); Б – количественная оценка кровотока миокарда на стрессе (максимальная вазодилатация), в покое, с определением коронарного резерва, количественные значения по трем коронарным бассейнам приведены в таблице; В – данные инвазивной коронарографии, выявлено обструктивное поражение ОВ (оггибающей ветви), субокклюзии ПКА (правой коронарной артерии) и окклюзии ПМЖВ (передней межжелудочковой артерии). При полуколичественной оценке перфузии (А) методом анализа полярных диаграмм (карт) определяются дефекты перфузии (выделены синим цветом) в бассейне ПМЖВ (верхушка, передняя, частично передне-боковая стенка и межжелудочковая перегородка), а также умеренный дефект перфузии в бассейне ПКА (на границе задней стенки и задней межжелудочковой перегородки) с нормализацией (выравниванием) перфузии в покое. При количественной оценке отмечается снижение кровотока нагрузки и коронарного резерва (Б) более выраженного и распространенного характера, охватывающие большую часть миокарда левого желудочка. Такие изменения свидетельствуют о более распространенной ишемии миокарда, в частности в бассейне ПКА. Значительное диффузное снижение коронарного резерва говорит о присутствии микроваскулярной дисфункции, характерной для больных с тяжелым коронарным атеросклерозом; низкие цифры глобального резерва (1,35) – о неблагоприятном прогнозе заболевания. ием, выполненной в динамическом режиме сканирования.

Fig. 1. Results of myocardial stress PET with 13N-ammonium, performed in the dynamic scanning mode.

A – semi-quantitative assessment of perfusion under stress and at rest by plotting circle diagrams and determining the SSS (Summed Stress Score), SRS (Summed Rest Score), SDS (Summed Difference Score); B – quantitative assessment of myocardial blood flow under stress (maximum vasodilation), at rest, with determination of coronary reserve, quantitative values for three coronary territories are presented in the table; C – data of invasive coronary angiography, obstructive lesion of the circumflex branch, subocclusion of the RCA (right coronary artery) and occlusion of the LAD (left anterior descending) were revealed. Semi-quantitative assessment of perfusion (A) using polar diagram (map) analysis reveals perfusion defects (highlighted in blue) in the LAD territory (apex, anterior, partially anterolateral wall and interventricular septum), as well as a moderate perfusion defect in the RCA territory (at the junction of the posterior wall and posterior interventricular septum) with normalization (equalization) of perfusion at rest. Quantitative assessment reveals a decrease in load blood flow and coronary reserve (B) of a more pronounced and widespread features, covering a greater portion of the left ventricular myocardium. Such changes indicate more widespread myocardial ischemia, particularly in the RCA territory. A significant diffuse decrease in coronary reserve indicates the presence of microvascular dysfunction, characteristic of patients with severe coronary atherosclerosis; low global reserve values (1.35) indicate an unfavorable prognosis of the disease.

ными преимуществами неинвазивной МР-перфузии являются: высокое пространственное разрешение, позволяющее получать высококачественные изображения анатомических характеристик, возможность оценки функциональных данных, а также выявления зон гипоперфузии (в том числе субэндокардиальной), отсутствие лучевой нагрузки [33]. Основными ограничениями метода являются: невозможность применения при несовместимых имплантированных устройствах, низкая доступность, высокая стоимость, необходимость специального программного обеспечения для сложных математических моделирований, клаустрофобия. Также отдельно следует отметить требования к квалификации врача и к стабильности сердечного ритма пациента для получения изображений необходимого качества без артефактов.

Перфузионная рентгеновская компьютерная томография миокарда.

Компьютерная томография в настоящее время обладает широким спектром опций, направленных на диагностику патологии сердца, включая уровень эпикардиальных коронарных артерий (КТ-коронароангиография (КАГ), КТ-фракционный резерв кровотока (КТ-ФРК)) и миокардиальный уровень (КТ-перфузия) [34, 35].

Перфузионная КТ (перф-КТ) предполагает выполнение исследования на многосрезовых КТ-сканерах и основана на оценке прохождения контрастных веществ по кровеносному руслу для изучения кровоснабжения миокарда [11]. Также перфузионная КТ с высоким пространственным разрешением способна определять градиенты трансмуральной перфузии [35].

Различают две разновидности перфузионной КТ – статическую и динамическую. Под статической перфузионной КТ подразумевается получение изображения контрастированного миокарда в момент прохождения максимального болюса контраста в КА в покое и при нагрузке; нагрузочный этап чаще проводится с помощью введения фармакологических вазодилататоров (аденозин, регаденозин). Методика позволяет оценить неравномерность перфузии визуально и полуколичественно [35].

В литературе встречаются указания на весомый вклад данного стресс-теста в диагностику гемодинамически значимой ИБС. Так, в когортном исследовании PERFECTION сочетание нагрузочной перфузионной КТ и КТ-КАГ показало высокую чувствительность 92%, специфичность 95%, ОЦП 97%, ППЦ

87% и общую точность 94% на уровне артерии и 98%, 87%, 99%, 86% и 92% на уровне пациента соответственно. Площадь под кривой для выявления стенозов, ограничивающих кровотоки, при сочетанной методике составила 0,92 и 0,93, что значимо выше по сравнению с изолированной КТ-КАГ [36].

Немногочисленны данные относительно эффективности статической перфузионной КТ при пограничных стенозах КА. Так, российские исследователи при изучении диагностической точности указанного метода для оценки гемодинамической значимости стенозов 50-75% на небольшой группе пациентов (n=25) получили следующие показатели чувствительности, специфичности, ППЦ и ОПЦ: по сравнению с ФРК < 0,8 – 47%, 90%, 87% и 53% соответственно и по сравнению с ФРК < 0,75 – 67%, 81%, 67% и 81% соответственно [37].

Динамическая перфузионная КТ включает сканирование и сбор данных в режиме «реального времени» (в течение 3 минут) во время проведения теста с помощью АТФ и отсроченного сканирования (через 6 минут). Метод имеет хорошую согласованность с МРТ и ОФЭКТ, но требует определения пороговых величин для каждой отдельной лаборатории. Данные по использованию этого метода в клинической практике немногочисленны. В исследовании Wang Y. с соавт. на 30 пациентах МКнагр. составил $142,9 \pm 30,6$ мл/100мл/мин в интактной ткани и $90,0 \pm 22,8$ мл/100мл/мин – в гипоперфузированном участке. Чувствительность, специфичность для динамической перфузионной КТ в оценке гемодинамически значимых стенозов на уровне пациента составила 100%, 69% соответственно (эталонном для определения значимости стенозов послужил ОФЭКТ) [38].

Схожая высокая чувствительность количественного метода при более низких показателях специфичности была продемонстрирована в исследовании SPECIFIC (Dynamic Stress Perfusion CT for Detection of Inducible Myocardial Ischemia) в 2022 году – для выявления стеноза КА $\geq 50\%$ показатели чувствительности, специфичности и точности (по сравнению с инв-КАГ и инв-ФРК) составили: 96%, 72%, и 78% на уровне артерии, 94%, 53% и 73% на уровне пациента [39].

Среди работ российских коллег в изучении динамической КТ-перфузии на двухдетекторном томографе стоит отметить исследование, в котором было установлено наличие статистически значимой обратной умеренной связи между величиной стеноза

КА и миокардиального кровотока (МКК) при фармакологической нагрузке, $\rho = -0,34$ ($p < 0,001$). Были установлены достоверные различия между пороговыми значениями регионального МКК для стенозов $\geq 50\%$ и $\geq 70\%$ ($p < 0,001$), которые составили 135мл/100мл/мин и 126мл/100мл/мин соответственно (рис. 2) [40].

Таким образом, основным преимуществом применения перфузионной КТ является комплексная оценка сосудистого русла (при совмещении с КТ-КАГ) и оценка функциональных перфузионных параметров, как следствие, высокая точность в выявлении стенозов и одновременная оценка их гемодинамической значимости при первичном исследовании [41].

К основным недостаткам относится лучевая нагрузка и все известные ограничения

для применения йодсодержащих контрастов. Также к факторам, снижающим диагностическую ценность перфузионной КТ, относится невозможность задержки дыхания пациентом на 30 секунд, приводящая к наличию артефактов от движения, и особенность коронарного русла (наличие массивных кальцинатов и стентов). Помимо вышесказанного, при перфузионной КТ необходимо получение высококачественных изображений с отсутствием артефактов усиления луча, которые возникают из-за наличия контрастного вещества в левом желудочке и аорте, и которые затрудняют оценку смежных сегментов миокарда. Так, в исследовании PERFECTION доля сегментов левого желудочка с «неопределенной» или «очень неопределенной» перфузией, связанной с низким качеством изображения, в совокупности до-

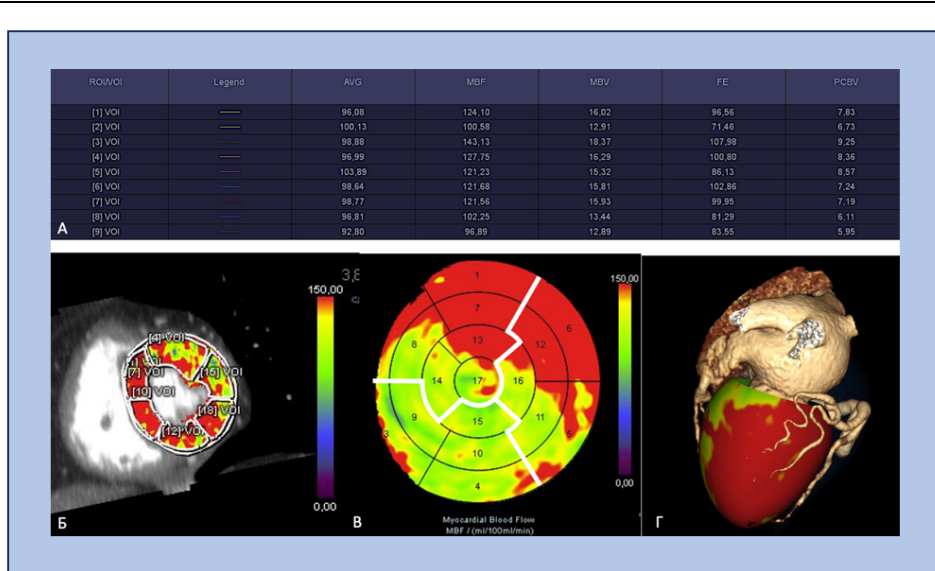


Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. Оценка кровотока нагрузки методом динамической КТ-перфузии миокарда, пост-процессинг и представление результатов.

А – сводная таблица показателей кровотока нагрузки, автоматически рассчитанных глобальных показателей, и регионарных, полученных с помощью ручного сегментирования миокарда ЛЖ. Б – срез миокарда по короткой оси ЛЖ с посегментарной оценкой кровотока. В – 17-сегментарная модель миокарда левого желудочка, представленная в виде полярной карты (отмечается снижение кровотока нагрузки в бассейне ПКА и ОВ на базальном, среднем и верхушечном уровне – выделено зеленым цветом). Г – VRT-реконструкция (объемная томографическая) сердца и КА, совмещенная с полярной картой [40].

Fig. 2. Assessment of stress blood flow by the dynamic CT myocardial perfusion, post-processing and presentation of results.

A – summary table of stress blood flow parameters, automatically calculated global parameters and regional parameters obtained by manual segmentation of LV myocardium. B – myocardium section along the short axis of LV with segmental assessment of blood flow. C – 17-segment model of left ventricular myocardium presented as a polar map (a decrease in stress blood flow in the territory of RCA and OV is noted at the basal, middle and apical levels – highlighted in green). D – VRT reconstruction (volume tomographic) of the heart and coronary artery combined with the polar map [40].

стигла 14%. При динамической перфузионной КТ недооценка базальных сегментов ЛЖ может достигать до 51% (ложноположительные дефекты перфузии по сравнению с оценкой средних и верхушечных сегментов, по данным эталонной ОФЭКТ) [38].

Заключение.

Подводя итог всему вышесказанному, следует отметить, что ишемия миокарда может быть вызвана как эпикардиальной обструктивной болезнью коронарных артерий, так и микрососудистой дисфункцией [42,43]. Все тесты, основанные на оценке функциональных резервов коронарного русла, демонстрируют суммарные эффекты макрососудистых и микрососудистых причин ишемии. Таким образом, они ценны в этом отношении, но также не будут отражать исключительно эпикардиальное заболевание КА.

Опыт показывает, что радионуклидные методики в большей степени применимы для полноценной двухэтапной оценки кровотока (нагрузка–покой) и коронарного резерва, быстро и достаточно точно визуализируют постинфарктные рубцовые изменений. Измерение МК с помощью миокардиальной ПЭТ не увеличивает время облучения или визуализации. Поскольку все больше исследований с использованием ПЭТ продемонстрировали, что количественные измерения глобального МК и КР могут иметь важные последствия для выявления микрососудистой дисфункции и отличную прогностическую ценность, клиническое значение количественной ПЭТ-перфузии миокарда существенно возросло за последние 10 лет. Однако, отсутствие четких границ миокарда на скинтиграфических изображениях ОФЭКТ и ПЭТ, записанных в динамическом режиме (на малой статистике), являются препятствием к точному оконтуриванию миокарда и служат причиной ложных диагностических результатов. Развитие данных методик идет в направлении усовершенствования программ математической обработки изображений [33,44].

Перфузионные изображения по данным КТ и МРТ миокарда, наоборот, легко и точно оконтуриваются. Так как контраст при динамическом сканировании фиксируется только в рамках стенки ЛЖ, вероятность ложного оконтуривания крайне мала, в результате методики демонстрируют высокие показатели точности в бассейнах отдельных коронарных артерий. Однако стремление снизить дозу облучения и объем контраста заставляет многих исследователей сокращать протокол сканирования до нагрузочного теста, достаточного для выявления локальной

ишемии. В связи с этим данных о прогностической значимости метода (на основании данных коронарного резерва) и верификации с его помощью микрососудистой дисфункции по-прежнему недостаточно.

Перфузионные методы исследования сквозь призму актуальных рекомендаций.

Поскольку анатомический стеноз менее 90% диаметра просвета не обязательно связан с ишемией миокарда [45,46], для определения необходимости реваскуляризации требуются такие функциональные тесты, как перфузионная стресс-МРТ, перфузионная стресс-КТ, ОФЭКТ и ПЭТ [47,48]. Эти методы позволяют определить область и степень ишемии миокарда и отличить ишемию от инфаркта путем наблюдения за радиоактивными индикаторами, аккумулированными кардиомиоцитами, или прохождении йодсодержащего/гадолиний-содержащего контраста в околоклеточном пространстве миокарда в состоянии покоя и во время стресса. Это помогает принимать решения относительно последующего лечения.

По сравнению с первоначальной диагностической стратегией, основанной на инвКАГ, современные терапевтические стратегии, основанные на оценке перфузии миокарда, связаны с более низкими показателями реваскуляризации вследствие отказа от недостаточно обоснованных процедур [36,45, 49].

В клинических рекомендациях европейского общества кардиологов (ЕОК) по хронических коронарным синдромам (ХКС) 2024 года, у лиц с подозрением на ХКС или с умеренной и высокой ПТВ ИБС (15-85%) ОФЭКТ-визуализация или, что предпочтительнее, ПЭТ-визуализация имеют уровень рекомендации IB и используются для: 1) диагностики и количественной оценки ишемии миокарда и/или рубца; 2) оценки риска ССО; 3) количественной оценки кровотока (ПЭТ) для диагностики и прогноза [2]. В рекомендациях отмечены достоинства ПЭТ в виде более высокого качества изображения, уникальных возможностей по расчету кровотока в абсолютных цифрах мл/мин/г, который позволяет неинвазивно оценивать КР, и более низкую лучевую нагрузку на пациента (примерно 1-4 мЗв). Наравне с радионуклидными методами миокардиальная перфузионная контрастная стресс-ЭхоКГ и перфузионная стресс-МРТ также имеют уровень рекомендации IB.

Обращает внимание, что для пациентов с низкой ПТВ (менее 15%) рекомендовано выполнение неинвазивной КТ-коронарографии в связи с высокой отрица-

тельной предсказательной способностью метода. В целом, в актуальных рекомендациях делается упор на использование КТ-КАГ и КТ-ФРК в большей степени, чем на КТ-перфузию. Это связано с отсутствием достаточной стандартизации сложных методик динамического КТ-сканирования с последующей количественной оценкой кровотока [50]. Однако методы взаимодополняемы, если первичный тест оказался неинформативным или сомнительным. Достаточно часто стресс-визуализация выполняется после МСКТА КА, если выявлены коронарные стенозы с неясной функциональной значимостью (50-90%) [3,49].

В заключении следует отметить общую тенденцию в отношении всех томографических методов оценки перфузии и кровотока – это дальнейшее развитие возможностей получения количественных параметров кровотока [33]. Совершенствование точности расчетов МК и снижение лучевой нагрузки

будет залогом более широкой востребованности метода в будущем.

На сегодняшний день мы имеем возможность применять целый спектр неинвазивных методик, разнообразных по видам сканирования и используемым контрастам или радиофармпрепаратам, а также способам нагрузочного тестирования. Выбирая ту или иную методику, клиницисты могут быть уверены, что каждая из них обеспечивает проведение диагностики, стратификации рисков, определение показаний к реваскуляризации на высоком диагностическом уровне.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Chinnaiyan K.M., Safian R.D., Gallagher M.L., George J., Dixon S.R., Bilollikar A.N. et al. *Clinical Use of CT-Derived Fractional Flow Reserve in the Emergency Department*. JACC Cardiovasc Imaging. Elsevier Inc. 2020; 13 (2): 452-461.
2. Vrints C., Andreotti F., Koskinas K.C., Rossello X., Adamo M., Ainslie J. et al. *2024 ESC Guidelines for the management of chronic coronary syndromes*. Eur Heart J. 2024; 45: 36.
3. Барбараш О.А., Карпов Ю.А., Панов А.В., Акчурун Р.С., Алекян Б.Г., Алехин М.Н. и др. *Стабильная ишемическая болезнь сердца. Клинические рекомендации 2024*. Российский кардиологический журнал. 2024; 29 (9): 6110.
4. Saeed M., Hetts S.W., Jablonowski R., Wilson M.W. *Magnetic resonance imaging and multi-detector computed tomography assessment of extracellular compartment in ischemic and non-ischemic myocardial pathologies*. World J Cardiol. Baishideng Publishing Group Inc. 2014; 6 (11): 1192-1208.
5. Taillefer R., DePuey E.G., Udelson J.E., Beller G.A., Latour Y., Reeves F. *Comparative diagnostic accuracy of Tl-201 and Tc-99m sestamibi SPECT imaging (perfusion and ECG-gated SPECT) in detecting coronary artery disease in women*. J Am Coll Cardiol. 1997; 29 (1): 69-77.
6. Li D.L., Kronenberg M.W. *Myocardial Perfusion and Viability Imaging in Coronary Artery Disease: Clinical Value in Diagnosis, Prognosis, and Therapeutic Guidance*. American Journal of Medicine. Elsevier Inc. 2021; 134 (8): 968-975.
7. Sabharwal N., Lahiri A. *Multi-vessel disease and CZT SPECT. Comparison with coronary angiography*. Journal of Nuclear Cardiology. 2017; 24 (2): 696-697.
8. Лшманов Ю.Б., Чернов В.И. *Национальное руководство по радионуклидной диагностике. В 2-х т.* Томск, STT, 2010.
9. IAEA. *Nuclear Cardiology: Guidance on the Implementation of SPECT Myocardial Perfusion Imaging*. 2016; 23 (23): 1-101.
10. Aarnoudse W.H., Botman K.J.B.M., Pijls N.H.J. *False-negative myocardial scintigraphy in balanced three-vessel disease, revealed by coronary pressure measurement* Int J Cardiovasc Intervent. Taylor & Francis, 2003; 5 (2): 67-71.
11. Driessen R.S., Danad I., Stuijzand W.J., Rajmakers P.G., Schumacher S.P., van Diemen P.A., et al. *Comparison of Coronary Computed Tomography Angiography, Fractional Flow Reserve, and Perfusion Imaging for Ischemia Diagnosis*. J Am Coll Cardiol. 2019; 73 (2): 161-173.
12. Shiraishi S., Tsuda N., Sakamoto F., Ogasawara K., Tomiguchi S., Tsujita K. et al. *Clinical usefulness of quantification of myocardial blood flow and flow reserve using CZT-SPECT for detecting coronary artery disease in patients with normal stress perfusion imaging*. J Cardiol. 2020; 75 (4): 400-409.
13. Wang L., Zheng Y., Zhang J., Wang M., Wu D., Wang Y. et al. *Diagnostic value of quantitative myocardial blood flow assessment by Na(Tl) SPECT in detecting significant stenosis: a prospective, multi-center study*. J Nucl Cardiol. 2023; 30 (2): 769-780.
14. Li C., Xu R., Yao K., Zhang J., Chen S., Pang L. et al. *Functional significance of intermediate coronary stenosis in patients with single-vessel coronary artery disease: A comparison of dynamic SPECT coronary flow reserve with intracoronary pressure-derived fractional flow reserve (FFR)*. J Nucl Cardiol. 2022; 29 (2): 622-629.
15. Завадовский К.В., Мочула А.В., Врублевский А.В., Баев А.Е., Мальцева А.Н., Бощенко А.А. *Роль нагрузочной динамической однофотонной эмиссионной компьютерной томографии с определением резерва миокардиального кровотока в оценке значимости стенозов коронарных артерий*. Российский кардиологический журнал. 2019; 12: 40-46.
16. Murthy V.L., Naya M., Foster C.R., Hainer J., Gaber M., Di Carli G. et al. *Improved cardiac risk assessment with nonin-*

- vasive measures of coronary flow reserve. *Circulation*. 2011; 124 (20): 2215-2224.
17. Hachamovitch R., Berman D.S., Shaw L.J., Kiat H., Cohen I., Arthur Cabico J. et al. Incremental prognostic value of myocardial perfusion single photon emission computed tomography for the prediction of cardiac death: differential stratification for risk of cardiac death and myocardial infarction. *Circulation*. 1998; 97 (6): 535-543.
18. Kajander S.A., Joutsiniemi E., Saraste M., Pietilä M., Ukkonen H., Saraste A. et al. Clinical value of absolute quantification of myocardial perfusion with (15)O-water in coronary artery disease. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2011; 4 (6): 678-684.
19. Wang X., van den Hoogen I.J., Butcher S.C., Kuneman J.H., de Graaf M.A., Kamperidis V. et al. Importance of plaque volume and composition for the prediction of myocardial ischaemia using sequential coronary computed tomography angiography/positron emission tomography imaging. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2023; 24 (6): 776-784.
20. Рыжкова Д.В., Салахова А.П. Технические основы и клиническое применение позитронной эмиссионной томографии для оценки перфузии миокарда как самостоятельной процедуры и в составе гибридных систем. *Трансляционная медицина*. 2015; 5 (2): 113-122.
21. Асланиди И.П., Бокерия Л.А., Шавман М.Г., Шурупова И.В. Екаева И.В. Новый комбинированный подход оценки коронарного резерва и перфузии миокарда по данным ПЭТ/КТ в диагностике ИБС. *REJR*. 2020; 10 (3): 46-57.
22. Schindler T.H., Fearon W.F., Pelletier-Galarneau M., Ambrosio G., Sechtem U., Ruddy T.D. et al. Myocardial Perfusion PET for the Detection and Reporting of Coronary Microvascular Dysfunction: A JACC: Cardiovascular Imaging Expert Panel Statement. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2023; 16 (4): 536-548.
23. Danad I., Raijmakers P.G., Harms H.J., Heymans M.W., Van Royen N., Lubberink M., et al. Impact of anatomical and functional severity of coronary atherosclerotic plaques on the transmural perfusion gradient: a [15O]H₂O PET study. *Eur Heart J*. 2014; 35: 31.
24. Groepenhoff F., Klaassen R.G.M., Valstar G.B., Bots S.H., Onland-Moret N.C., Den Ruijter H.M. et al. Evaluation of non-invasive imaging parameters in coronary microvascular disease: a systematic review. *BMC Med Imaging*. 2021; 21: 1.
25. Рустамова Я.К., Иманов Г.Г., Азизов В.А. Оценка эффективности метода МРТ сердца в диагностике дисфункционального миокарда. *Вестник Российского Государственного медицинского университета*. 2018; 4: 74-79.
26. Pakkal M., Raj V., McCANN G.P. Non-invasive imaging in coronary artery disease including anatomical and functional evaluation of ischaemia and viability assessment. *Br J Radiol*. 2011; 84 (3): 3.
27. Manka R., Wissmann L., Gebker R., Jogiya R., Motwani M., Frick M. et al. Multicenter evaluation of dynamic three-dimensional magnetic resonance myocardial perfusion imaging for the detection of coronary artery disease defined by fractional flow reserve. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2015; 8: 5.
28. Danad I., Szymonifka J., Twisk J.W.R., Norgaard B.L., Zarins C.K., Knaapen P. et al. Diagnostic performance of cardiac imaging methods to diagnose ischaemia-causing coronary artery disease when directly compared with fractional flow reserve as a reference standard: a meta-analysis. *Eur Heart J*. 2017; 38 (13): 991-998.
29. Arai A.E., Schulz-Menger J., Berman D., Mahrholdt H., Han Y., Bandettini W.P. et al. Gadobutrol-Enhanced Cardiac Magnetic Resonance Imaging for Detection of Coronary Artery Disease. *J Am Coll Cardiol*. 2020; 76 (13): 1536-1547.
30. Van Dijk R., Van Assen M., Vliegenthart R., De Bock G.H., Van Der Harst P., Oudkerk M. Diagnostic performance of semi-quantitative and quantitative stress CMR perfusion analysis: a meta-analysis. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2017; 19: 1.
31. Papanastasiou G., Williams M.C., Dweck M.R., Alam S., Cooper A., Mirsadraee S. et al. Quantitative assessment of myocardial blood flow in coronary artery disease by cardiovascular magnetic resonance: comparison of Fermi and distributed parameter modeling against invasive methods. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2016; 18: 1.
32. Brown L.A.E., Onciul S.C., Broadbent D.A., Johnson K., Fent G.J., Foley J.R.J. et al. Fully automated, inline quantification of myocardial blood flow with cardiovascular magnetic resonance: repeatability of measurements in healthy subjects. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2018; 20: 1.
33. Sakuma H., Ishida M. Advances in Myocardial Perfusion MR Imaging: Physiological Implications, the Importance of Quantitative Analysis, and Impact on Patient Care in Coronary Artery Disease. *Magn Reson Med Sci*. 2022; 21 (1): 195-211.
34. Дарий О.Ю., Асланиди И.П., Рычина И.Е., Семенов Д.С., Юрпольская Л.А., Александрова С.А. и соавт. Двух-энергетическая мультиспиральная компьютерная томография как альтернативный метод диагностической визуализации структуры миокарда левого желудочка. *REJR*. 2024; 14(2):31-42. DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-2-31-42
35. Rochitte C.E., George R.T., Chen M.Y., Arbab-Zadeh A., Dewey M., Miller J.M. et al. Computed tomography angiography and perfusion to assess coronary artery stenosis causing perfusion defects by single photon emission computed tomography: the CORE320 study. *Eur Heart J*. 2014; 35 (17): 1120-1130.
36. Pontone G., Baggiano A., Andreini D., Guaricci A.I., Guglielmo M., Muscogiuri G. et al. Stress Computed Tomography Perfusion Versus Fractional Flow Reserve CT Derived in Suspected Coronary Artery Disease: The PERFECTION Study. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2019; 12 (8): 1487-1497.
37. Омаров Ю.А., Веселова Т.Н., Шахнович Р.М., Сухинина Т.С., Жукова Н.С., Меркулова И.Н. 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.
38. Wang Y., Qin L., Shi X., Zeng Y., Jing H., Schoepf U.J. et al. Adenosine-stress dynamic myocardial perfusion imaging with second-generation dual-source CT: comparison with conventional catheter coronary angiography and SPECT nuclear myocardial perfusion imaging. *AJR Am J Roentgenol*. 2012; 198 (3): 521-529.
39. Nous F.M.A., Geisler T., Kruk M.B.P., Alkadhi H., Kitaga-

wa K., Vliegenthart R. et al. Dynamic Myocardial Perfusion CT for the Detection of Hemodynamically Significant Coronary Artery Disease. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2022; 15 (1): 75-87.

40. Болдырева К.М., Асланиди И.П., Шурупова И.В., Дорофеев А.В., Рычина И.Е., Джангджава Д.А. и др. Информативность количественных показателей кровотока по данным динамической компьютерной томографии при идентификации обструктивного поражения коронарного русла. *Грудная и сердечно-сосудистая хирургия*. 2024; 66 (1): 71-84.

41. Балахонова А.А., Веселова Т.Н., Сухинина Т.С., Арutyнян Г.К., Шитов В.Н., Меркулова И.Н., Терновой С.К. Диагностическая значимость компьютерной томографии в комплексной оценке коронарных артерий и преходящей ишемии миокарда у пациентов с болями в груди. *REJR*. 2024; 14(2):19-30. DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-2-19-30.

42. Crea F., Camici P.G., Merz C.N.B. Coronary microvascular dysfunction: an update. 24366916. Oxford University Press, 2023; 35 (17): 1101-1111.

43. 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.

44. Green R., Cantoni V., Acampa W., Assante R., Zampella E., Nappi C. et al. Prognostic value of coronary flow reserve in patients with suspected or known coronary artery disease referred to PET myocardial perfusion imaging: A meta-analysis. *Journal of Nuclear Cardiology*. 2021; 28 (3): 904-918.

45. Zhang H., Ma Z., Mi H., Jiao J., Dong W., Yang S., et al. Diagnostic Value of Magnetocardiography to Detect Abnormal Myocardial Perfusion: A Pilot Study. *Rev Cardiovasc Med*.

References:

1. Chinnaiyan K.M., Safian R.D., Gallagher M.L., George J., Dixon S.R., Bilollikar A.N. et al. Clinical Use of CT-Derived Fractional Flow Reserve in the Emergency Department. *JACC Cardiovasc Imaging*. Elsevier Inc. 2020; 13 (2): 452-461.

2. Vrints C., Andreotti F., Koskinas K.C., Rossello X., Adamo M., Ainslie J. et al. 2024 ESC Guidelines for the management of chronic coronary syndromes. *Eur Heart J*. 2024; 45: 36.

3. Barbarash O.L., Karpov Yu.A., Panov A.V., Akchurin R.S., Alekyan B.G., Alekhine M.N. et al. Stable coronary artery disease. Clinical guidelines 2024. *Russian Journal of Cardiology*. 2024; 29 (9): 6110 (in Russian).

4. Saeed M., Hetts S.W., Jablonowski R., Wilson M.W. Magnetic resonance imaging and multi-detector computed tomography assessment of extracellular compartment in ischemic and non-ischemic myocardial pathologies. *World J Cardiol*. Baishideng Publishing Group Inc. 2014; 6 (11): 1192-1208.

5. Taillefer R., DePuey E.G., Udelson J.E., Beller G.A., Latour Y., Reeves F. Comparative diagnostic accuracy of Tl-201 and Tc-99m sestamibi SPECT imaging (perfusion and ECG-gated SPECT) in detecting coronary artery disease in women. *J Am Coll Cardiol*. 1997; 29 (1): 69-77.

6. Li D.L., Kronenberg M.W. Myocardial Perfusion and Viability Imaging in Coronary Artery Disease: Clinical Value in Diagnosis, Prognosis, and Therapeutic Guidance. *American*

Journal of Medicine. Elsevier Inc. 2021; 134 (8): 968-975.

46. Knuuti J., Ballo H., Juarez-Orozco L.E., Saraste A., Kolh P., Rutjes A.W.S. et al. The performance of non-invasive tests to rule-in and rule-out significant coronary artery stenosis in patients with stable angina: a meta-analysis focused on post-test disease probability. *Eur Heart J*. 2018; 39 (35): 3322-3330.

47. Neumann F.J., Sechtem U., Banning A.P., Bonaros N., Bueno H., Bugiardini R. 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): 407-477.

48. Hachamovitch R., Hayes S.W., Friedman J.D., Cohen I., Berman D.S. Comparison of the short-term survival benefit associated with revascularization compared with medical therapy in patients with no prior coronary artery disease undergoing stress myocardial perfusion single photon emission computed tomography. *Circulation*. 2003; 107 (23): 2900-2906.

49. Голухова Е.З. Отчет о научной и лечебной работе Национального медицинского исследовательского центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева Минздрава России за 2023 год и перспективы развития. . *Бюллетень НЦССХ*. 2024; 25 (Спецвыпуск): 5-141. DOI: <https://doi.org/10.24022/1810-0694-2024-25S>

50. Hoffmann U., Ferencik M., Udelson J.E., Picard M.H., Truong Q.A., Patel M.R. et al. Prognostic Value of Noninvasive Cardiovascular Testing in Patients With Stable Chest Pain: Insights From the PROMISE Trial (Prospective Multicenter Imaging Study for Evaluation of Chest Pain). *Circulation*. 2017; 135 (24): 2320-2332.

7. Sabharwal N., Lahiri A. Multi-vessel disease and CZT SPECT. Comparison with coronary angiography. *Journal of Nuclear Cardiology*. 2017; 24 (2): 696-697.

8. Lishmanov Yu.B., Chernov V.I. National Guide to Radionuclide Diagnostics. In 2 volumes. Tomsk, STT, 2010 (in Russian).

9. IAEA. Nuclear Cardiology: Guidance on the Implementation of SPECT Myocardial Perfusion Imaging. 2016; 23 (23): 1-101.

10. Aarnoudse W.H., Botman K.J.B.M., Pijls N.H.J. False-negative myocardial scintigraphy in balanced three-vessel disease, revealed by coronary pressure measurement. *Int J Cardiovasc Intervent*. Taylor & Francis, 2003; 5 (2): 67-71.

11. Driessen R.S., Danad I., Stuijzand W.J., Rajmakers P.G., Schumacher S.P., van Diemen P.A., et al. Comparison of Coronary Computed Tomography Angiography, Fractional Flow Reserve, and Perfusion Imaging for Ischemia Diagnosis. *J Am Coll Cardiol*. 2019; 73 (2): 161-173.

12. Shiraiishi S. Tsuda N., Sakamoto F., Ogasawara K., Tomiguchi S., Tsujita K. et al. Clinical usefulness of quantification of myocardial blood flow and flow reserve using CZT-SPECT for detecting coronary artery disease in patients with normal stress perfusion imaging. *J Cardiol*. 2020; 75 (4): 400-409.

13. Wang L., Zheng Y., Zhang J., Wang M., Wu D., Wang Y. et al. Diagnostic value of quantitative myocardial blood flow assessment by NaI(Tl) SPECT in detecting significant stenosis: a prospective, multi-center study. *J Nucl Cardiol.* 2023; 30 (2): 769-780.
14. Li C., Xu R., Yao K., Zhang J., Chen S., Pang L. et al. Functional significance of intermediate coronary stenosis in patients with single-vessel coronary artery disease: A comparison of dynamic SPECT coronary flow reserve with intracoronary pressure-derived fractional flow reserve (FFR). *J Nucl Cardiol.* 2022; 29 (2): 622-629.
15. Zavadovsky K.V., Mochula A.V., Vrublevsky A.V., Baev A.E., Maltseva A.N., Boshchenko A.A. The role of stress dynamic single-photon emission computed tomography with determination of myocardial blood flow reserve in assessing the significance of coronary artery stenosis. *Russian Journal of Cardiology.* 2019; 12: 40-46 (in Russian).
16. Murthy V.L., Naya M., Foster C.R., Hainer J., Gaber M., Di Carli G. et al. Improved cardiac risk assessment with noninvasive measures of coronary flow reserve. *Circulation.* 2011; 124 (20): 2215-2224.
17. Hachamovitch R., Berman D.S., Shaw L.J., Kiat H., Cohen I., Arthur Cabico J. et al. Incremental prognostic value of myocardial perfusion single photon emission computed tomography for the prediction of cardiac death: differential stratification for risk of cardiac death and myocardial infarction. *Circulation.* 1998; 97 (6): 535-543.
18. Kajander S.A., Joutsiniemi E., Saraste M., Pietilä M., Ukkonen H., Saraste A. et al. Clinical value of absolute quantification of myocardial perfusion with (15)O-water in coronary artery disease. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2011; 4 (6): 678-684.
19. Wang X., van den Hoogen I.J., Butcher S.C., Kuneman J.H., de Graaf M.A., Kamperidis V. et al. Importance of plaque volume and composition for the prediction of myocardial ischaemia using sequential coronary computed tomography angiography/positron emission tomography imaging. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2023; 24 (6): 776-784.
20. Ryzhkova D.V., Salakhova A.R. Technical fundamentals and clinical application of positron emission tomography for myocardial perfusion assessment as a standalone procedure and as part of hybrid systems. *Translational Medicine.* 2015; 5 (2): 113-122 (in Russian).
21. Aslanidi I.P., Bokeria L.A., Shavman M.G., Shurupova I.V., Ekaeva I.V. A new combined approach to assessing coronary reserve and myocardial perfusion using PET/CT data in the diagnosis of coronary heart disease. *REJR.* 2020; 10 (3): 46-57 (in Russian).
22. Schindler T.H., Fearon W.F., Pelletier-Galarneau M., Ambrosio G., Sechtem U., Ruddy T.D. et al. Myocardial Perfusion PET for the Detection and Reporting of Coronary Microvascular Dysfunction: A JACC: Cardiovascular Imaging Expert Panel Statement. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2023; 16 (4): 536-548.
23. Danad I., Rajmakers P.G., Harms H.J., Heymans M.W., Van Royen N., Lubberink M., et al. Impact of anatomical and functional severity of coronary atherosclerotic plaques on the transmural perfusion gradient: a [15O]H₂O PET study. *Eur Heart J.* 2014; 35: 31.
24. Groepenhoff F., Klaassen R.G.M., Valstar G.B., Bots S.H., Onland-Moret N.C., Den Ruijter H.M. et al. Evaluation of non-invasive imaging parameters in coronary microvascular disease: a systematic review. *BMC Med Imaging.* 2021; 21: 1.
25. Rustamova Ya.K., Imanov G.G., Azizov V.A. Evaluation of the effectiveness of the cardiac MRI method in the diagnosis of dysfunctional myocardium. *Bulletin of the Russian State Medical University.* 2018; 4: 74-79 (in Russian).
26. Pakkal M., Raj V., McCANN G.P. Non-invasive imaging in coronary artery disease including anatomical and functional evaluation of ischaemia and viability assessment. *Br J Radiol.* 2011; 84 (3): 3.
27. Manka R., Wissmann L., Gebker R., Jogiya R., Motwani M., Frick M. et al. Multicenter evaluation of dynamic three-dimensional magnetic resonance myocardial perfusion imaging for the detection of coronary artery disease defined by fractional flow reserve. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2015; 8: 5.
28. Danad I., Szymonifka J., Twisk J.W.R., Norgaard B.L., Zarins C.K., Knaapen P. et al. Diagnostic performance of cardiac imaging methods to diagnose ischaemia-causing coronary artery disease when directly compared with fractional flow reserve as a reference standard: a meta-analysis. *Eur Heart J.* 2017; 38 (13): 991-998.
29. Arai A.E., Schulz-Menger J., Berman D., Mahrholdt H., Han Y., Bandettini W.P. et al. Gadobutrol-Enhanced Cardiac Magnetic Resonance Imaging for Detection of Coronary Artery Disease. *J Am Coll Cardiol.* 2020; 76 (13): 1536-1547.
30. Van Dijk R. Van Assen M., Vliegenthart R., De Bock G.H., Van Der Harst P., Oudkerk M. Diagnostic performance of semi-quantitative and quantitative stress CMR perfusion analysis: a meta-analysis. *J Cardiovasc Magn Reson.* 2017; 19: 1.
31. Papanastasiou G., Williams M.C., Dweck M.R., Alam S., Cooper A., Mirsadraee S. et al. Quantitative assessment of myocardial blood flow in coronary artery disease by cardiovascular magnetic resonance: comparison of Fermi and distributed parameter modeling against invasive methods. *J Cardiovasc Magn Reson.* 2016; 18: 1.
32. Brown L.A.E., Onciul S.C., Broadbent D.A., Johnson K., Fent G.J., Foley J.R.J. et al. Fully automated, inline quantification of myocardial blood flow with cardiovascular magnetic resonance: repeatability of measurements in healthy subjects. *J Cardiovasc Magn Reson.* 2018; 20: 1.
33. Sakuma H., Ishida M. Advances in Myocardial Perfusion MR Imaging: Physiological Implications, the Importance of Quantitative Analysis, and Impact on Patient Care in Coronary Artery Disease. *Magn Reson Med Sci.* 2022; 21 (1): 195-211.
34. Darii O. Yu., Aslanidi I. P., Rychina I. E., Semenov D. S., Yurpolskaya L. A., Aleksandrova S. A. et al. Dual-energy multispiral computed tomography as an alternative method for diagnostic visualization of the left ventricular myocardium structure. *REJR.* 2024; 14(2):31–42. DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-2-31-42 (in Russian).
35. Rochitte C.E., George R.T., Chen M.Y., Arbab-Zadeh A., Dewey M., Miller J.M. et al. Computed tomography angiography and perfusion to assess coronary artery stenosis causing perfusion defects by single photon emission computed tomography: the CORE320 study. *Eur Heart J.* 2014; 35 (17): 1120-1130.
36. Pontone G., Baggiano A., Andreini D., Guaricci A.I., Gug-

- lielmo M., Muscogiuri G. et al. Stress Computed Tomography Perfusion Versus Fractional Flow Reserve CT Derived in Suspected Coronary Artery Disease: The PERFECTION Study. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2019; 12 (8): 1487-1497.
37. Omarov Yu.A., Veselova T.N., Shakhnovich R.M., Sukhinina T.S., Zhukova N.S., Merkulova I.N. et al. Myocardial perfusion computed tomography with transesophageal pacing as a stress test in patients with borderline stenosis in the coronary arteries: comparison with fractional flow reserve measurements. *Cardiology*. 2021; 61 (1): 4-11 (in Russian).
38. Wang Y., Qin L., Shi X., Zeng Y., Jing H., Schoepf U.J. et al. Adenosine-stress dynamic myocardial perfusion imaging with second-generation dual-source CT: comparison with conventional catheter coronary angiography and SPECT nuclear myocardial perfusion imaging. *AJR Am J Roentgenol*. 2012; 198 (3): 521-529.
39. Nous F.M.A., Geisler T., Kruk M.B.P., Alkadhi H., Kitagawa K., Vliegenthart R. et al. Dynamic Myocardial Perfusion CT for the Detection of Hemodynamically Significant Coronary Artery Disease. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2022; 15 (1): 75-87.
40. Boldyreva K.M., Aslanidi I.P., Shurupova I.V., Dorofeev A.V., Rychina I.E., Dzhangdzhava D.A. et al. Information content of quantitative blood flow indicators based on dynamic computed tomography data in identifying obstructive coronary lesions. *Thoracic and cardiovascular surgery*. 2024; 66 (1): 71-84 (in Russian).
41. Balakhonova A.A., Veselova T.N., Sukhinina T.S., Arutyunyan G.K., Shitov V.N., Merkulova I.N., Ternovoy S.K. Diagnostic value of computed tomography in a comprehensive assessment of coronary arteries and transient myocardial ischemia in patients with chest pain. *REJR*. 2024; 14(2):19-30. DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-2-19-30 (in Russian).
42. Crea F., Camici P.G., Merz C.N.B. Coronary microvascular dysfunction: an update. 24366916. Oxford University Press, 2023; 35 (17): 1101-1111.
43. Ansheles A. A., Sergienko V. B. Myocardial perfusion: what is meant by this term when visualizing with various methods of radiological diagnostics? *Cardiology*. 2017; 57 (7): 5-12 (in Russian).
44. Green R., Cantoni V., Acampa W., Assante R., Zampella E., Nappi C. et al. Prognostic value of coronary flow reserve in patients with suspected or known coronary artery disease referred to PET myocardial perfusion imaging: A meta-analysis. *Journal of Nuclear Cardiology*. 2021; 28 (3): 904-918.
45. Zhang H., Ma Z., Mi H., Jiao J., Dong W., Yang S., et al. Diagnostic Value of Magnetocardiography to Detect Abnormal Myocardial Perfusion: A Pilot Study. *Rev Cardiovasc Med*. 2024; 25: 10.
46. Knuuti J., Ballo H., Juarez-Orozco L.E., Saraste A., Kolh P., Rutjes A.W.S. et al. The performance of non-invasive tests to rule-in and rule-out significant coronary artery stenosis in patients with stable angina: a meta-analysis focused on post-test disease probability. *Eur Heart J*. 2018; 39 (35): 3322-3330.
47. Neumann F.J., Sechtem U., Banning A.P., Bonaros N., Bueno H., Bugiardini R. 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): 407-477.
48. Hachamovitch R., Hayes S.W., Friedman J.D., Cohen I., Berman D.S. Comparison of the short-term survival benefit associated with revascularization compared with medical therapy in patients with no prior coronary artery disease undergoing stress myocardial perfusion single photon emission computed tomography. *Circulation*. 2003; 107 (23): 2900-2906.
49. Golukhova E.Z. Report on the scientific and medical work of the National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery named after A.N. Bakulev of the Ministry of Health of the Russian Federation for 2023 and development prospects. *Bulletin of the NCSCSS*. 2024; 25 (Special Issue): 5-141. DOI: <https://doi.org/10.24022/1810-0694-2024-25S> (in Russian).
50. Hoffmann U., Ferencik M., Udelson J.E., Picard M.H., Truong Q.A., Patel M.R. et al. Prognostic Value of Noninvasive Cardiovascular Testing in Patients With Stable Chest Pain: Insights From the PROMISE Trial (Prospective Multicenter Imaging Study for Evaluation of Chest Pain). *Circulation*. 2017; 135 (24): 2320-2332.