

<https://doi.org/10.24835/1607-0771-2022-1-27-43>

Эхокардиография при ишемической болезни сердца на современном этапе

Л.Л. Берштейн¹, А.Е. Андреева¹, Н.С. Жуковский²,
П.О. Карчикьян³, В.И. Новиков¹

¹ ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Санкт-Петербург

² СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница», г. Санкт-Петербург

³ СПб ГБУЗ «Городская Покровская больница», г. Санкт-Петербург

Эхокардиография – активно развивающаяся ультразвуковая диагностическая методика, играющая ключевую роль при обследовании пациентов с ишемической болезнью сердца. За последние годы произошли важные изменения в протоколах выполнения и методах анализа эхокардиографии покоя и нагрузки, применяемых у пациентов с ишемической болезнью сердца. Наряду со стандартным визуальным анализом локальной сократимости широко используется режим тканевого следа для количественной оценки локальной и глобальной сократимости в покое и на фоне стресс-теста. Все более часто применяется визуализация коронарных артерий

для оценки скоростей кровотока в зоне стеноза в покое, а также коронарного резерва на фоне нагрузки. Протокол стресс-эхокардиографии расширен за счет оценки параметров, не связанных с сократимостью левого желудочка. Для повышения диагностической ценности стресс-эхокардиографию дополняют ультразвуковым исследованием сонных артерий. Описанные нововведения уже нашли или находят свое место в повседневной клинической практике. В настоящей статье приводится обзор современного состояния эхокардиографии при ишемической болезни сердца.

Л.Л. Берштейн – д.м.н., профессор, профессор кафедры госпитальной терапии и кардиологии имени М.С. Кушаковского ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0002-9444-159X>

А.Е. Андреева – заведующая отделением функциональной диагностики Клиники имени Э.Э. Эйхвальда ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Санкт-Петербург.

Н.С. Жуковский – врач отделения ультразвуковой диагностики СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница», г. Санкт-Петербург.

П.О. Карчикьян – к.м.н., врач-кардиолог отделения рентгенохирургических методов диагностики и лечения СПб ГБУЗ «Городская Покровская больница», г. Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0001-8288-0352>

В.И. Новиков – д.м.н., профессор, заведующий кафедрой функциональной диагностики ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0002-2493-6300>

Контактная информация: 195067 г. Санкт-Петербург, Пискаревский пр., д. 47, ФГБОУ ВО «СЗГМУ им. И.И. Мечникова», кафедра госпитальной терапии и кардиологии им. М.С. Кушаковского. Берштейн Леонид Львович. E-mail: leonid.bershtein@szgmu.ru

Ключевые слова: эхокардиография, ишемическая болезнь сердца, коронарный кровоток, деформация миокарда.

Цитирование: Берштейн Л.Л., Андреева А.Е., Жуковский Н.С., Карчикьян П.О., Новиков В.И. Эхокардиография при ишемической болезни сердца на современном этапе. Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2022; 1: 27–43. <https://doi.org/10.24835/1607-0771-2022-1-27-43>

Эхокардиография – активно развивающаяся ключевая диагностическая методика в кардиологии. В частности, она играет важнейшую роль в диагностике и обследовании пациентов с ишемической болезнью сердца (ИБС). За последние годы произошли важные изменения в протоколах эхокардиографии покоя и нагрузки, применяемых у пациентов с ИБС. Появились новые алгоритмы использования эхокардиографии покоя и нагрузки, стали использоваться новые ультразвуковые режимы. Все это уже нашло или находит свое место в повседневной клинической практике. В настоящей статье приводится обзор современного состояния эхокардиографии при ИБС.

Эхокардиография покоя

Стандартный визуальный анализ

Как известно, ишемия вызывает нарушение локальной сократимости (НЛС) миокарда левого и правого желудочков (ЛЖ и ПЖ) [1]. Ишемические состояния миокарда многообразны и могут быть транзиторными (собственно ишемия, стэннирование) и хроническими (жизнеспособный миокард, некроз, рубец) [2, 3]. До настоящего момента основным методом оценки локальной сократимости ЛЖ является визуальный анализ. Для обозначения локализации поражения ЛЖ используется его деление на 17 сегментов [4]. Сократимость каждого сегмента визуально оценивают в баллах, чаще всего по четырехбалльной системе, с учетом степени систолического утолщения, систолической экскурсии эндокарда, а также возможной задержки сокращения сегмента в зоне ишемии. При этом имеют в виду следующие критерии [5]:

1 – норма (систолическая экскурсия >4 мм, утолщение >30%),

2 – гипокинезия (экскурсия 2–4 мм, утолщение 10–30%),

3 – акинезия (отсутствие систолического движения или движение <2 мм, утолщение <10%),

4 – дискинезия (систолическое движение, противоположное нормальному, то есть от центра полости ЛЖ, систолическое истончение).

Эти цифры используются в качестве примерного ориентира при визуальном анализе – фактически их не измеряют.

Локализация поражения коронарного русла устанавливается на основании общепринятой схемы коронарного кровоснабжения ЛЖ [4].

Анализ на основе оценки продольной деформации в режиме тканевого следа

В связи с субъективностью визуального анализа давно делались попытки оценивать локальную сократимость количественно. Предлагавшийся для этой цели с начала 2000-х гг. метод оценки продольных скоростей движения миокарда, а также его деформации и скорости деформации на основе тканевого доплеровского режима не получил развития в силу его многочисленных ограничений [5].

Вместо него сегодня существует возможность оценивать деформацию миокарда на основе режима тканевого следа (*speckle tracking*). Его принцип – отслеживание изменений расположения ультразвуковой зернистости миокарда в течение сердечного цикла [6]. Анализ тканевого следа не имеет ограничений, связанных с локализацией исследуемых сегментов, в отличие от методов оценки деформации, основанных на доплеровском принципе. В частности, он независим от угла между направлением движения и направлением луча. В систолу в норме происходит укорочение миокарда ЛЖ по продольной оси от основания к верхушке. Это наиболее важный компонент сокращения, который можно оценить, измерив величину систолической продольной деформации (укорочения) для каждого сегмента ЛЖ. На основании этого рассчитывается и глобальная продольная деформация – показатель глобальности функции ЛЖ.

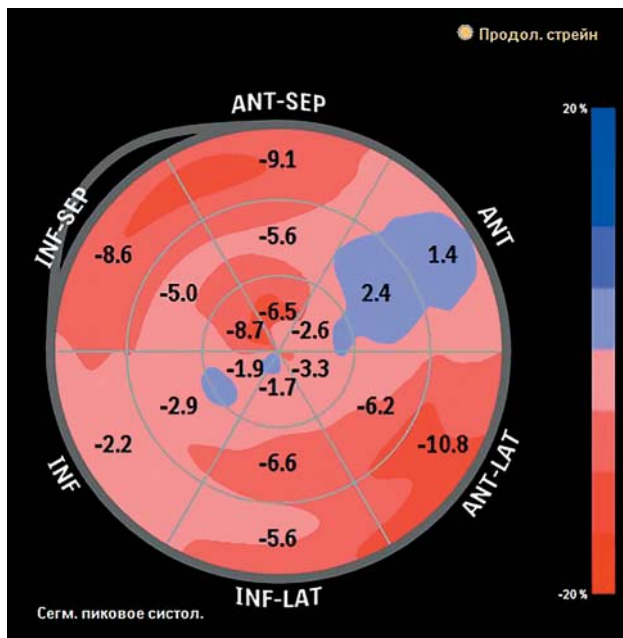


Рис. 1. Исследование в режиме *speckle tracking*. Пациент с ранее перенесенным передне-верхушечным инфарктом миокарда и ишемической кардиомиопатией с диффузным снижением сократимости в нескольких бассейнах кровоснабжения. На карте *bull's eye* представлены диффузно сниженные значения деформации, наиболее значительно в передней стенке – территория кровоснабжения передней межжелудочковой артерии.

В норме укорочение всех сегментов происходит практически одновременно и в одинаковой степени. Величину систолической деформации сегментов отображают с помощью цветового картирования сегментов ЛЖ на двухмерном изображении, графиков “деформация–время” и построения карты *bull's eye* (бычий глаз). Значения локальной и глобальной деформации в норме находятся в диапазоне -22 – -18% [7]. При наличии НЛС в покое на фоне ИБС продольная деформация пораженных сегментов уменьшается (соответственно, уменьшается модуль показателя деформации). Оценка локальной деформации в режиме *speckle tracking* позволяет в этом случае количественно охарактеризовать локальные нарушения сократимости. В качестве примера на рис. 1 представлена карта *bull's eye* пациента с ранее перенесенным инфарктом миокарда и ишемической кардиомиопатией.

Технология *speckle tracking* позволяет также осуществить принципиально новый подход к эхокардиографической диагностике стабильной ИБС: выявить заболевание без нагрузочной пробы и в отсутствие НЛС покоя [8]. Действительно, на фоне обструктивного поражения коронарных артерий наблюдается снижение показателя глобальной продольной деформации ЛЖ в покое. Величина глобальной продольной деформации ЛЖ $<18\%$ (по модулю) показала чувствительность 79% и специфичность 78% в выявлении значимой обструктивной коронарной болезни [9]. Были получены пороговые значения глобальной продольной деформации ЛЖ для диагностики одно-, двух- и трехсосудистого поражения: с учетом модуля $<18,4$, $<17,3$ и $<15,3\%$. Таким образом, у пациентов со стабильной ИБС отмечается закономерное снижение глобальной продольной деформации ЛЖ, параллельное увеличению числа вовлеченных коронарных артерий. Кроме того, значения продольной деформации отдельных сегментов ЛЖ позволяют предсказать локализацию поражения коронарных артерий [9].

Этот же подход может использоваться для дифференциальной диагностики острого коронарного синдрома. Отсутствие НЛС при визуальном анализе у пациента с подозрением на острый коронарный синдром не исключает диагноз, однако уменьшает его вероятность. В отсутствие альтернативного диагноза в этом случае можно выполнить пациенту анализ глобальной продольной деформации ЛЖ в режиме тканевого следа. Значение глобальной продольной деформации ЛЖ $<18,8\%$ (с учетом модуля) показало чувствительность 86% и специфичность 73% в выявлении значимого стеноза коронарных артерий у пациентов с болью в грудной клетке, с одной стороны, и ЭКГ, не диагностической в отношении острой ишемии миокарда, отрицательным тропониновым тестом и отсутствием НЛС при стандартной эхокардиографии – с другой [8].

Минусом использования глобальной продольной деформации ЛЖ для диагностики ИБС является недостаточная специфичность, поскольку модуль величины глобальной продольной деформации ЛЖ снижается и при некоронарогенной патологии [6, 7].

Оценка скорости кровотока в коронарной артерии

При выполнении трансторакальной эхокардиографии в режиме “коронарные артерии” можно исследовать кровотоки в главных ветвях коронарных артерий, преимущественно в их проксимальных частях. Для оценки скоростей в стволе левой коронарной артерии и проксимальной части передней межжелудочковой артерии используют модифицированное парастернальное поперечное сечение на уровне аорты (рис. 2), ее срединной части – модифицированное парастернальное продольное сечение (рис. 3). Для оценки проксимальных отделов левой огибающей и правой коронарной артерий используют модифицированное парастернальное поперечное сечение на уровне аорты и модифицированное двухкамерное сечение с верхушки.

Наибольшая скорость кровотока в коронарной артерии отмечается в диастолу. При ИБС в покое наблюдается ускорение кровотока в области стеноза (рис. 4), что позволяет выявить поражение без проведения нагрузочного теста. В отношении порогового значения диастолической скорости, указывающего на наличие значимого стеноза, единого мнения нет. В качестве такового было предложено значение $\geq 47,5$ см/с (выявление стеноза проксимальной части передней межжелудочковой артерии или ствола левой коронарной артерии $\geq 70\%$ с чувствительностью 88% и специфичностью 97%) [10]. Повышение скорости кровотока в проксимальной части левой коронарной артерии > 37 см/с предсказывает увеличение риска сердечно-сосудистых осложнений с чувствительностью 82% и специфичностью 62% [11]. Также показано, что соотношение максимальной диастолической скорости кровотока в зоне стеноза к максимальной диастолической скорости кровотока проксимальнее стеноза $> 2,2$ позволяет с большой точностью диагностировать значимое поражение коронарной артерии [12].

В последние годы также разработана концепция диагностики эпикардального коронарного стеноза на основании расчета соотношения диастолической и систолической скоростей коронарного кровотока (diastolic-

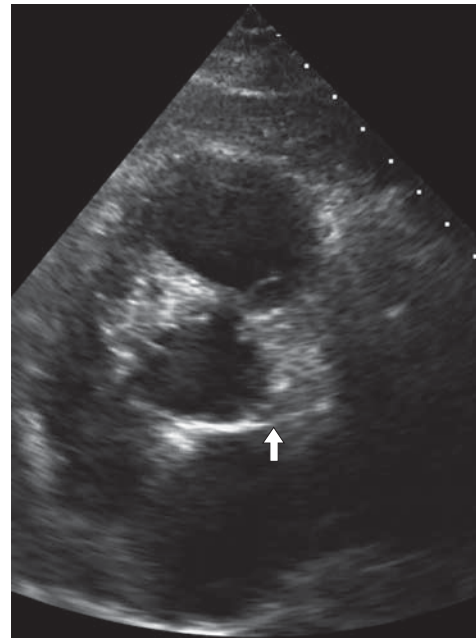


Рис. 2. Модифицированное парастернальное поперечное сечение на уровне аорты. Визуализация ствола левой коронарной артерии (стрелка) в В-режиме.



Рис. 3. Модифицированное парастернальное продольное сечение. Ускоренный кровоток в срединной части передней межжелудочковой артерии (стрелка) в режиме цветного доплеровского картирования.

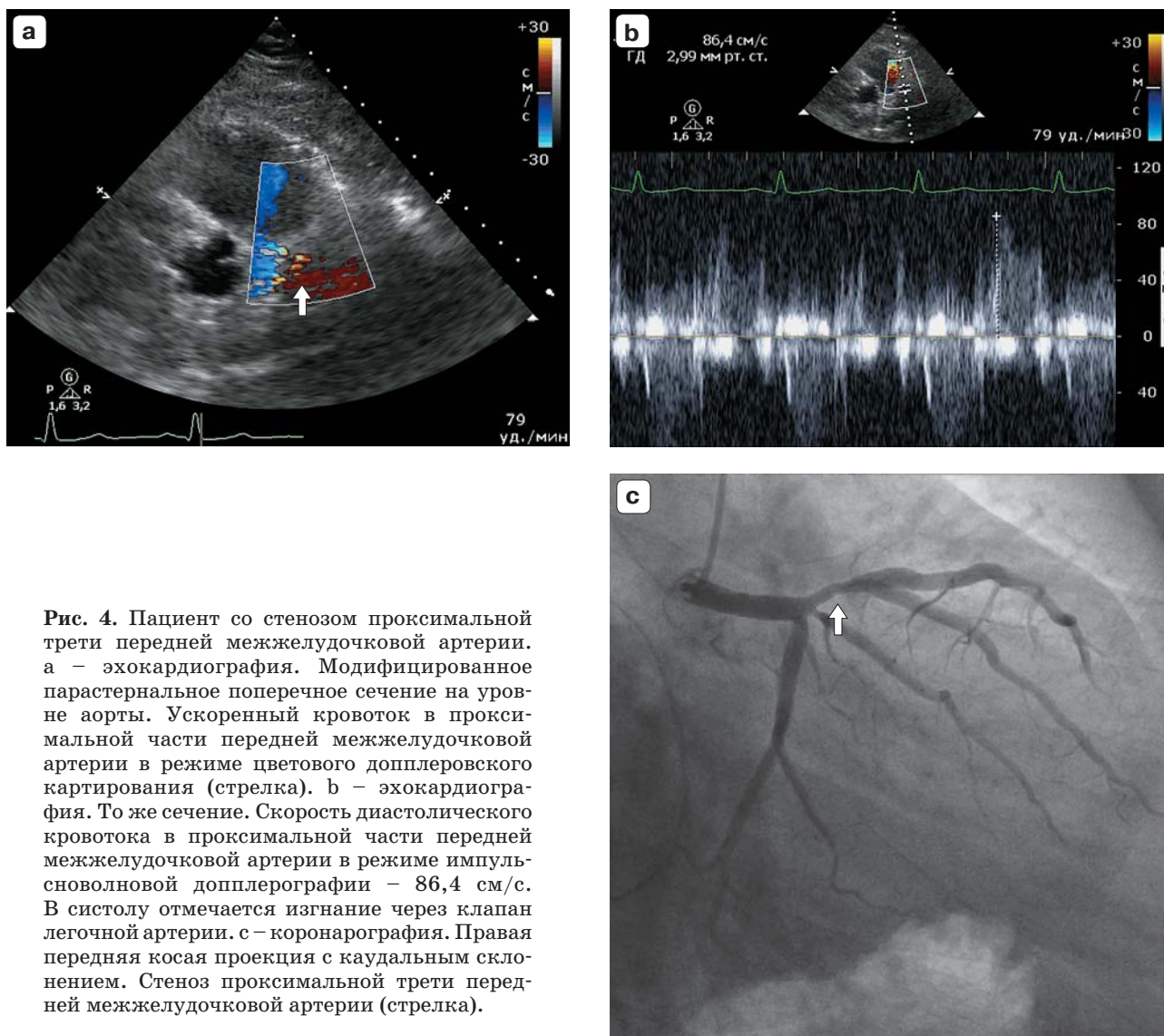


Рис. 4. Пациент со стенозом проксимальной трети передней межжелудочковой артерии. а – эхокардиография. Модифицированное парастернальное поперечное сечение на уровне аорты. Ускоренный кровоток в проксимальной части передней межжелудочковой артерии в режиме цветового доплеровского картирования (стрелка). б – эхокардиография. То же сечение. Скорость диастолического кровотока в проксимальной части передней межжелудочковой артерии в режиме импульсной доплерографии – 86,4 см/с. В систолу отмечается изгнание через клапан легочной артерии. с – коронарография. Правая передняя косая проекция с каудальным наклоном. Стеноз проксимальной трети передней межжелудочковой артерии (стрелка).

systolic velocity ratio (DSVR)) в условиях покоя дистальнее стеноза. Изначально метод разработан для диагностики стеноза передней межжелудочковой артерии. В основе этого метода лежат следующие принципы. Скорости коронарного кровотока обратно зависят от суммарного сосудистого сопротивления, которое складывается из сопротивления эпикардиального стеноза и сопротивления микроциркуляции. В условиях эпикардиального стеноза микроциркуляторная система ауторегуляции (преартериолы) стремится обеспечить стабильный коронарный кровоток за счет расслабления резистивных микрососудов-преартериол в зоне поражения. Поэтому у пациента со

значимым коронарным стенозом сопротивление микроциркуляции в диастолу ниже, чем у пациента без стеноза. При этом сопротивление со стороны эпикардиальной артерии за счет развития стеноза, конечно, возрастает пропорционально тяжести стеноза – так, что суммарное сосудистое сопротивление все же увеличивается. При выраженном стенозе сопротивление увеличивается более значительно. В результате диастолическая скорость в коронарной артерии у пациента дистальнее зоны тяжелого стеноза снижается (она обратно зависит от суммарного сопротивления) [13].

В то же время в систолу, как при отсутствии стеноза, так и при наличии стеноза,

суммарное сосудистое сопротивление будет в основном определяться сопротивлением микроциркуляторного русла, сжатого сократившимся миокардом, и влияние на него наличия и степени стеноза эпикардиальной артерии будет невелико. В результате значения систолической скорости дистальнее стеноза в пораженной артерии и в неизменной артерии будут сходными [13].

Соответственно, DSVR дистальнее стеноза будет ниже, чем в неизменной артерии. Причем это снижение пропорционально тяжести стеноза. При сопоставлении DSVR с тяжестью стеноза, которая оценивалась по величине фракционного резерва кровотока, показано снижение значений DSVR от $2,10 \pm 0,42$ (при значениях фракционного резерва кровотока $>0,95$) до $1,55 \pm 0,25$ (при значениях фракционного резерва кровотока $<0,65$) (параметр представлен в виде $M \pm SD$). Отметим, что данные результаты получены при интракоронарной оценке DSVR в передней межжелудочковой артерии и ее крупных ветвях. Тест “значение DSVR $<1,74$ ” обладает чувствительностью 65% и специфичностью 80% в выявлении функционально значимого стеноза при значениях фракционного резерва кровотока $<0,75$. Показана высокая корреляция инвазивной и эхокардиографической оценки DSVR ($r = 0,82$, $P < 0,001$) [13].

Стресс-эхокардиография

Стресс-эхокардиография при ИБС: визуальный анализ локальной сократимости

В условиях рутинной практики анализ полученных в процессе исследования результатов проводят в режиме *off-line* после завершения теста. При стресс-эхокардиографии применяются обычное деление ЛЖ на 16/17 сегментов и полуколичественная четырехбалльная шкала, которая используется и для эхокардиографии покоя. Движение сегментов до и после (иногда и во время) нагрузки сравнивается на одном экране в режиме *side-by-side*, где представляются сечения, синхронизированные по ЭКГ. Основным критерием ишемии является ухудшение на фоне нагрузки локальной сократимости сегментов ЛЖ, имевших нормальную сократимость в покое. В норме

на фоне стресса полость ЛЖ в систолу по сравнению с покоем уменьшается, форма полости не изменяется, экскурсия эндокарда и систолическое утолщение сегментов равномерно возрастают. Важным преимуществом стресс-эхокардиографии перед ЭКГ-стресс-тестом является возможность установить локализацию поражения. Это делается так же, как при интерпретации эхокардиографии покоя [4].

Показания к выполнению стресс-эхокардиографии

Показанием к выполнению стресс-эхокардиографии может являться необходимость [3, 14]:

- 1) объективизации ишемии миокарда при подозрении на ИБС,
- 2) подтверждения функциональной значимости стеноза коронарной артерии, выявленного при коронарографии,
- 3) стратификации коронарного риска,
- 4) оценки жизнеспособности миокарда при наличии хронической сократительной дисфункции ЛЖ.

Объективизация ишемии миокарда при подозрении на ИБС

Ранее неинвазивным исследованием первого ряда при подозрении на ИБС считался ЭКГ-стресс-тест. При этом чувствительность ЭКГ-стресс-теста составляет 68%, а стресс-эхокардиографии – 77–83% [14, 15]. Согласно действующим европейским рекомендациям 2019 г. [16], стресс-тест с визуализацией наиболее часто проводится в качестве первого диагностического теста при подозрении на ИБС. Альтернативой является выполнение КТ-коронарографии или инвазивной коронарографии. Выбор определяется результатом оценки предтестовой вероятности ИБС (табл. 1) (данные и интерпретация изменились по сравнению с предыдущей версией рекомендаций) и клиническими данными.

Характеристика боли в грудной клетке [16]:

- загрудинная локализация боли или ощущение дискомфорта с характерными особенностями и продолжительностью,
- провоцируется физической нагрузкой или эмоциональным стрессом,
- проходит на фоне приема нитроглицерина.

Таблица 1. Предтестовая вероятность (%) ИБС у пациентов со стабильными симптомами соответственно возрасту и полу [16]

Возраст, годы	Типичная стенокардия		Атипичная стенокардия		Неангинозная боль		Одышка	
	мужчины	женщины	мужчины	женщины	мужчины	женщины	мужчины	женщины
30–39	3	5	4	3	1	1	0	3
40–49	22	10	10	6	3	2	12	3
50–59	32	13	17	6	11	3	20	9
60–69	44	16	26	11	22	6	27	14
≥70	52	27	34	19	24	10	32	12

Типичную стенокардию характеризует наличие всех трех признаков, атипичную стенокардию – любых двух признаков, неангинозную боль – любого одного признака [16].

Если предтестовая вероятность ИБС <5%, дальнейшее обследование не требуется. Если она составляет >15%, проводится неинвазивный тест, а в наиболее тяжелых и очевидных случаях (при высокой вероятности и типичных симптомах, особенно при низком уровне физической нагрузки) – коронарография. При значениях 5–15% целесообразность неинвазивного теста следует рассмотреть с учетом клинических параметров. В частности, наличие факторов риска атеросклероза (дислипидемия, сахарный диабет, артериальная гипертензия, курение, семейный анамнез), изменения на ЭКГ покоя (патологический Q или изменения ST/T), выявление кальциноза коронарных артерий при КТ (коронарный кальциевый индекс >0) повышают вероятность ИБС и целесообразность проведения нагрузочного теста. С другой стороны, например, отрицательный результат исследования коронарных артерий на наличие кальциноза значительно снижает вероятность ИБС и делает нецелесообразным выполнение нагрузочной пробы [16].

Подтверждение функциональной значимости стеноза коронарной артерии, выявленного при коронарографии

Данные стресс-эхокардиографии дополняют результаты коронарографии и позволяют оценить функциональную значимость выявленных при коронарографии поражений. По европейским рекомендациям 2019 г.

[16], при оценке целесообразности реваскуляризации необходимо для всех стенозов (кроме стенозов >90%) доказать их функциональную значимость. Для этого следует измерить фракционный резерв кровотока / моментальный резерв кровотока в зоне стеноза при коронарографии (значения ≤0,80 / ≤0,89 соответственно указывают на функционально значимое поражение) или выполнить стресс-эхокардиографию и подтвердить ишемию в зоне кровоснабжения соответствующей артерии. Используя этот принцип, можно решить вопрос об очередности реваскуляризации при наличии нескольких стенозов и необходимости этапного лечения. Довольно часто стресс-эхокардиографию выполняют пациентам с хронической ИБС, перенесшим коронарную реваскуляризацию, при появлении подозрительных на ишемию симптомов, так как в этом случае тоже требуется определить локализацию зоны ишемии [16].

Стратификация коронарного риска

Стратификация коронарного риска является задачей любого стресс-теста. Как известно, уровень риска сердечно-сосудистых осложнений пациента со стабильной ИБС определяется в основном тяжестью поражения коронарного русла и функцией ЛЖ. Стресс-эхокардиография позволяет получить дополнительную информацию об уровне риска. Он определяется главным образом величиной зоны ишемии (количество сегментов или процент площади ЛЖ) и уровнем нагрузки, при котором развивается ишемия. Имеется линейная взаимосвязь размера зоны провоцируемой ишемии и частоты сердечных событий на фоне консерва-

Таблица 2. Стратификация риска по данным стресс-эхокардиографии [18]

Уровень риска	Результаты теста	Ежегодная смертность
Высокий	Выраженная дисфункция ЛЖ при нагрузке (ФВ при нагрузке <45% или падение ФВ >10%) Стресс-индуцированная дилатация ЛЖ Обширная зона ишемии при стресс-эхокардиографии (>2 сегментов или 2 бассейна кровоснабжения) НЛС, развивающиеся при низкой скорости инфузии добутамина (≤ 10 мг/кг/мин) или при низкой ЧСС (<120 уд/мин)	>3%
Средний	Зона ишемии при стресс-эхокардиографии среднего размера (1–2 сегмента и 1 бассейн кровоснабжения)	1–3%
Низкий	Нормальные результаты стресс-эхокардиографии или отсутствие изменений со стороны небольшой зоны НЛС в покое	<1%

Обозначения: ФВ – фракция выброса, ЧСС – частота сердечных сокращений.

тивного лечения [17]. Общепринятые критерии стратификации риска по данным стресс-эхокардиографии приведены в табл. 2.

Большое прогностическое значение имеет величина фракции выброса (ФВ) нагрузки. Если у пациента провоцируются новые НЛС при нагрузке и ФВ значительно снижается, он имеет наиболее высокий риск сердечной смерти и сердечных осложнений (подробнее в следующем разделе) [19]. Результаты оценки риска по данным неинвазивного теста оказывают значительное влияние на выбор лечебной стратегии. По европейским рекомендациям 2018 г. [20] и 2019 г. [16], реваскуляризация показана для улучшения прогноза пациентам со стабильной ИБС, имеющим характеристики высокого риска по стресс-тесту, в частности, величину зоны провоцируемой ишемии >10% площади ЛЖ. Следует отметить, что недавнее исследование *ISCHEMIA* поставило под сомнение этот привычный подход [21].

Диагностика жизнеспособности миокарда

Актуальной задачей стресс-эхокардиографии является дифференциальная диагностика состояния миокарда в зоне хронической сократительной дисфункции ЛЖ. Для этого используется, как правило, фармакологическая нагрузка с добутамином. Критериями жизнеспособности считают [19]: 1) двухфазный ответ – улучшение сократимости при низкой скорости инфузии и последующее ухудшение при более высо-

кой скорости, 2) стойкое улучшение – улучшение сократимости при низкой дозе, которое сохраняется при высокой скорости инфузии и до окончания теста (в последнем случае специфичность теста ниже). При регистрации таких ответов говорят о наличии сократительного резерва в зоне дисфункции. Регистрация сократительного резерва при введении добутамина обладает чувствительностью 80% и специфичностью 78% в отношении восстановления функции соответствующих сегментов ЛЖ после реваскуляризации [3].

Оценка ФВ нагрузки

ФВ является важнейшим параметром неинвазивного нагрузочного теста. Низкая ФВ покоя и/или нагрузки определяет более высокий уровень риска по неинвазивному тесту и, как правило, является показанием к реваскуляризации [16, 20, 22, 23]. В связи с этим измерение ФВ нагрузки следует считать обязательным элементом анализа стресс-эхокардиографии.

На фоне стресс-теста с физической нагрузкой у пациента без ИБС наблюдаются увеличение конечного диастолического объема ЛЖ, снижение конечного систолического объема ЛЖ и прирост ФВ. Ишемическая реакция (при трехсосудистом поражении / стенозе проксимальной части передней межжелудочковой артерии или ствола левой коронарной артерии) – увеличение конечного диастолического и конечного систолического объемов ЛЖ и снижение ФВ [19].

Параметры стресс-эхокардиографии, не связанные с систолической функцией ЛЖ

Стресс-эхокардиография дает важные дополнительные данные, не касающиеся непосредственно систолической функции ЛЖ на нагрузке. Это диастолическая функция ЛЖ (по соотношению E/e'), динамика митральной регургитации и давления в легочной артерии, а также локальная и общая функция ПЖ. Их оценка производится во время нагрузки или сразу после ее окончания. Большинство показателей оценивают в покое, на пике нагрузки и в периоде восстановления. В отличие от других показателей, E/e' и степень митральной регургитации не следует оценивать на пике нагрузки, поскольку на фоне высокой частоты сердечных сокращений (ЧСС) качество их оценки страдает. В то же время при их оценке на фоне невысокой ЧСС и в периоде восстановления получаемые данные остаются не менее информативными [19].

Диастолическая функция ЛЖ

Оценка диастолической функции ЛЖ на фоне нагрузки в первую очередь целесообразна у пациентов с основной жалобой на одышку при физической нагрузке. Одышка может быть эквивалентом стенокардии или отражать ухудшение расслабления миокарда при нагрузке, характерное для некоронарогенной патологии миокарда [22, 23]. В связи с этим ухудшение диастолической функции при нагрузке – чувствительный, но неспецифичный признак ИБС.

Основным измеряемым показателем является соотношение E/e' (соотношение ранней трансмитральной скорости и скорости движения септальной части митрального кольца в режиме тканевого доплеровского исследования). Скорости измеряют при ЧСС 100–110 во время нагрузки или периода восстановления, чтобы избежать слияния пиков Е и А. У здоровых лиц среднего возраста увеличение E/e' при нагрузке в сравнении с состоянием покоя не происходит [23]. Величина $E/e' > 15$ на нагрузке указывает на повышенное давление наполнения ЛЖ [19]. Кроме этого, целесообразно оценить динамику трикуспидальной регургитации.

Скорость трикуспидальной регургитации и давление в легочной артерии

Увеличение скорости трикуспидальной регургитации на нагрузке происходит параллельно увеличению E/e' и коррелирует с повышением давления наполнения ЛЖ. Максимальная скорость трикуспидальной регургитации $> 3,1$ м/с при физической нагрузке или систолическое давление в легочной артерии > 43 мм рт. ст. указывает на наличие патологии. Тем не менее давление в легочной артерии при физической нагрузке увеличивается с возрастом. Иногда высокая скорость трикуспидальной регургитации на нагрузке наблюдается у тренированных спортсменов [23].

Митральная регургитация

Оценка митральной регургитации рекомендуется при дифференциальной диагностике одышки при физической нагрузке. Другое возможное показание – умеренная митральная регургитация в покое у пациента, которому планируется аортокоронарное шунтирование, для решения вопроса о целесообразности вмешательства на митральном клапане. Увеличение выраженности митральной регургитации (эффективная площадь отверстия ≥ 13 мм²), а также легочная гипертензия нагрузки (систолическое давление в легочной артерии ≥ 60 мм рт. ст.) – предикторы неблагоприятного прогноза, однако вопрос о целесообразности хирургического вмешательства на клапане в этом случае еще требует изучения. Наоборот, уменьшение выраженности вторичной митральной регургитации, связанное с существованием достаточного сократительного резерва ЛЖ, – маркер хорошего прогноза исхода при медикаментозной терапии [23].

Функция ПЖ

Возможный элемент протокола стресс-эхокардиографии – оценка локальной и общей систолической функции ПЖ. Для оценки функции ПЖ используют модифицированное для правых отделов верхушечное четырехкамерное сечение. Основные оцениваемые показатели – сократимость свободной стенки ПЖ, систолическая экс-

курсия трикуспидального кольца (tricuspid annular plane systolic excursion (TAPSE)) в М-режиме, пиковая систолическая скорость трикуспидального кольца (s') в тканевом доплеровском режиме. Их анализ позволяет выявить поражение правой коронарной артерии, снабжающей свободную стенку ПЖ [19].

Недостаточный прирост TAPSE (<18 мм при физической нагрузке) обладает умеренной чувствительностью в отношении поражения правой коронарной артерии. При стресс-эхокардиографии с добутамином этот показатель менее надежен [22].

Дилатация ПЖ и снижение глобальной систолической функции ПЖ при нагрузке встречаются редко и могут свидетельствовать как о многососудистом поражении коронарных артерий, так и о легочной гипертензии, индуцированной физической нагрузкой [19].

Исследование сонных артерий в сочетании со стресс-эхокардиографией

Перспективным представляется учет данных фокусированного ультразвукового исследования сонных артерий при проведении стресс-эхокардиографии, которое рекомендовано для характеристики атеросклероза. Такой предварительный анализ увеличивает диагностическую ценность стресс-эхо-теста. Целью исследования сонных артерий являются исключительно поиск и наиболее простая количественная оценка атеросклеротической бляшки (АСБ) в дистальной части (1 см) общей сонной артерии, на уровне бифуркации и в проксимальной части (1 см) внутренней сонной артерии [24].

Использование ультразвуковой визуализации АСБ сонных артерий в сочетании со стресс-эхокардиографией с физической нагрузкой повышало диагностическую точность последней в отношении ИБС. Так, прогностическая ценность положительного результата стресс-теста возросла с 78,5% (95%-й доверительный интервал (95% ДИ) – 69,1–85,6%) до 82,5% (95% ДИ – 71,4–90,0%), а прогностическая ценность отрицательного результата – с 84,2% (95% ДИ – 69,6–92,6%) до 95,0% (95% ДИ – 76,4–99,1%) [25].

О соотношении результатов стресс-эхокардиографии и данных визуализации АСБ сонных артерий и их значения для

прогноза говорят следующие цифры [26]. Среди 580 пациентов в возрасте 59 ± 11 лет (здесь и далее $M \pm SD$) (46% мужчин, 54% женщин) с подозрением на ИБС результаты стресс-эхокардиографии были положительными в 12% случаев, в то время как АСБ были выявлены в 59%. Частота сердечно-сосудистых событий за период $1,117 \pm 361$ дней составила 0,9, 1,97, 4,3 и 9,7% для пациентов без АСБ и с отрицательным стресс-тестом, с АСБ и отрицательным стресс-тестом, без АСБ и с положительным стресс-тестом и с АСБ и положительным стресс-тестом. Таким образом, прогноз у пациентов с АСБ и отрицательным стресс-тестом промежуточный по сравнению с пациентами без АСБ и с отрицательным стресс-тестом и пациентами с положительным стресс-тестом, в том числе без АСБ [26].

Количественный анализ сократимости в режиме тканевого следа

Как говорилось выше, движение миокарда во время сердечного цикла может быть оценено с помощью режима *speckle tracking*, основанного на анализе двухмерного изображения, причем это может быть анализ как деформации индивидуальных сегментов ЛЖ, так и глобальной деформации ЛЖ. Применимость такого анализа при стресс-эхокардиографии вызывала сомнения, поскольку его качество на фоне высокой ЧСС и ухудшения акустического окна на фоне нагрузки может страдать. Особенно это касается оценки локальной деформации сегментов по аналогии с эхокардиографией покоя. На сегодняшний день получены данные, подтверждающие эффективность клинического использования анализа глобальной продольной деформации ЛЖ на нагрузке [27, 28]. Анализ глобальной деформации показал чувствительность 94% и специфичность 92% в выявлении обструктивной ИБС, что превышает цифры для визуального анализа НЛС [27]. Еще более точно предсказывала ИБС величина глобальной продольной деформации ЛЖ в периоде восстановления. Значения модуля глобальной продольной деформации ЛЖ $<16\%$ в периоде восстановления после теста с добутамином прогнозировали ИБС с чувствительностью 85% и специфичностью 92% (для визуальной

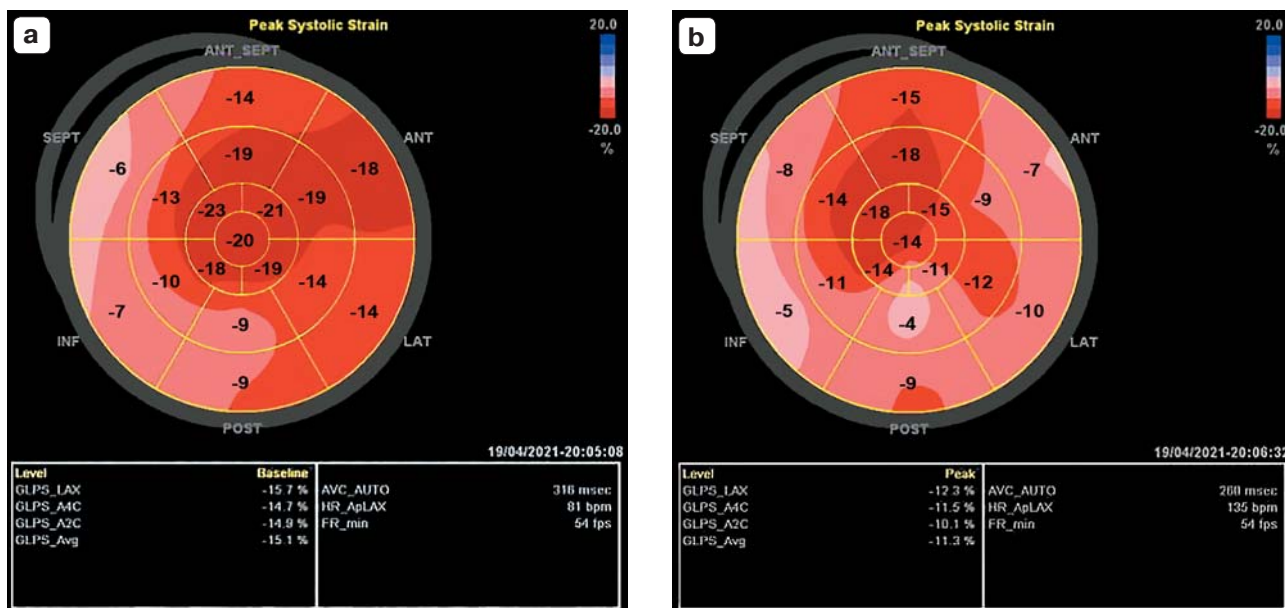


Рис. 5. Анализ продольной деформации ЛЖ в режиме *speckle tracking* при проведении стресс-эхокардиографии с физической нагрузкой на тредмиле. Карта *bull's eye* в покое (а) и сразу после нагрузки (б). Исходно определяются зоны акинезии ниже-перегородочных, нижних, ниже-боковых сегментов на базальном и срединном уровнях, что соответствует перенесенному ранее инфаркту миокарда в бассейне правой коронарной артерии. Глобальная продольная деформация ЛЖ покоя немного ниже нормы (15% с учетом модуля). После нагрузки развиваются новые НЛС передне-боковых отделов ЛЖ на базальном уровне (бассейн передней межжелудочковой артерии). Кроме того, происходит ухудшение сократимости в зоне НЛС бассейна правой коронарной артерии, в связи с чем требуется специальное исследование для поиска жизнеспособного миокарда. Глобальная продольная деформация ЛЖ нагрузки значительно снижена (11% с учетом модуля).

оценки 48 и 83% соответственно) [28]. Интересно, что глобальная концентрическая деформация при стресс-эхокардиографии позволяла диагностировать микрососудистую стенокардию, хотя визуальный анализ в этом отношении малоинформативен [29]. На рис. 5 представлен пример анализа стресс-эхокардиографии с физической нагрузкой с помощью режима *speckle tracking*.

Приведенные данные свидетельствуют о серьезном потенциале количественного анализа данных стресс-эхокардиографии. Тем не менее в настоящее время количественная оценка любым из описанных выше методов применяется на практике не очень широко – для ее проведения требуются много времени и высокое качество исходных изображений. Несмотря на это, можно рассчитывать, что разработка автоматизированных методов обработки данных и анализа показателей позволит в недалеком будущем более широко использовать стресс-эхокардиографию с количе-

ственной оценкой в повседневной практике в любом медицинском центре, а не только в крупных клиниках / исследовательских лабораториях.

Оценка резерва коронарного кровотока

В последнее время получил развитие вариант выполнения стресс-эхокардиографии, при котором оценка локальной сократимости сочетается с исследованием изменения скоростей коронарного кровотока, записываемых при трансторакальном исследовании [30]. Для этого используют те же эхокардиографические позиции, что и для оценки коронарного кровотока в покое (см. выше).

Запись скоростей проводится в покое и затем во время нагрузки. В норме скорости кровотока при нагрузке возрастают более чем в 2,5 раза. Основное значение для диагностики имеет диастолическая скорость. При ишемии наблюдается недостаточное увеличение диастолической скорости [31].

Отношение диастолической скорости нагрузки к диастолической скорости покоя называется резервом коронарного кровотока. Уменьшение резерва коронарного кровотока пропорционально увеличению тяжести стеноза. При успешной реваскуляризации наблюдается восстановление значений резерва коронарного кровотока [31, 32].

Сочетание анализа резерва коронарного кровотока с анализом НЛС нагрузки повышает чувствительность стресс-эхокардиографии в отношении ИБС при определенном снижении специфичности. В среднем, по данным метаанализа, чувствительность и специфичность такого комбинированного подхода по сравнению с визуальной оценкой локальной сократимости составили $90 \pm 3\%$ против $67 \pm 9\%$ и $86 \pm 12\%$ против $93 \pm 2\%$ соответственно [33].

Действительно, снижение резерва коронарного кровотока менее специфично, чем НЛС нагрузки, что ограничивает использование этого показателя. Пороговым значением принято считать 2,5, однако сопоставимые значения наблюдаются при многих кардиологических заболеваниях помимо обструктивной ИБС (например, микроваскулярная стенокардия – $2,27 \pm 0,30$, артериальная гипертензия – $2,46 \pm 0,44$, аортальный стеноз – $2,18 \pm 0,34$) [33].

Заключение

Эхокардиография является одной из основных рутинных методик, используемых в диагностике различных ишемических состояний миокарда, и широко применяется при хронических и острых коронарных синдромах. В последние годы возможности эхокардиографической диагностики ИБС вышли далеко за рамки стандартного визуального анализа локальной сократимости. Используются методы количественного анализа локальной и глобальной деформации миокарда, визуализация и анализ параметров коронарного кровотока. Протокол стресс-эхокардиографии дополнен анализом диастолических параметров, функции ПЖ, коронарного резерва. Упрощение и повышение воспроизводимости количественного анализа деформации миокарда при стресс-эхокардиографии позволят более широко использовать эту методику в повседневной практике в любом медицин-

ском центре, а не только в крупных исследовательских лабораториях, и добиться объективизации диагностики ишемии. С учетом сказанного, не вызывает сомнения сохранение ведущей роли эхокардиографии в диагностике ИБС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruce R.A., Hornsten T.R. Exercise stress testing in evaluation of patients with ischemic heart disease. *Prog. Cardiovasc. Dis.* 1969; 11 (5): 371–390. [https://doi.org/10.1016/0033-0620\(69\)90027-9](https://doi.org/10.1016/0033-0620(69)90027-9)
2. Heusch G. Myocardial stunning and hibernation revisited. *Nat. Rev. Cardiol.* 2021; 18 (7): 522–536. <https://doi.org/10.1038/s41569-021-00506-7>
3. Garcia M.J., Kwong R.Y., Scherrer-Crosbie M., Taub C.C., Blankstein R., Lima J., Bonow R.O., Eshtehardi P., Bois J.P.; American Heart Association Council on Cardiovascular Radiology and Intervention and Council on Clinical Cardiology. State of the art: imaging for myocardial viability: a scientific statement from the American Heart Association. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2020; 13 (7): e000053. <https://doi.org/10.1161/hci.0000000000000053>
4. Lang R.M., Badano L.P., Mor-Avi V., Afilalo J., Armstrong A., Ernande L., Flachskampf F.A., Foster E., Goldstein S.A., Kuznetsova T., Lancellotti P., Muraru D., Picard M.H., Rietzschel E.R., Rudski L., Spencer K.T., Tsang W., Voigt J.U. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2015; 28 (1): 1–39.e14. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2014.10.003>
5. Берштейн Л.Л. Тканевое доплеровское исследование и его применение у пациентов с ишемической болезнью сердца. *Российский кардиологический журнал.* 2006; 6 (62): 87–94.
6. Алексин М.Н. Клиническое использование показателей продольной систолической деформации левого желудочка сердца. *Кремлевская медицина. Клинический вестник.* 2017; 4-1: 101–111.
7. Feigenbaum H., Mastouri R., Sawada S. A practical approach to using strain echocardiography to evaluate the left ventricle. *Circ. J.* 2012; 76 (7): 1550–1555. <https://doi.org/10.1253/circj.cj-12-0665>
8. Pastore M.C., Mandoli G.E., Contorni F., Cavigli L., Focardi M., D'Ascenzi F., Patti G., Mondillo S., Cameli M. Speckle tracking echocardiography: early predictor of diagnosis and prognosis in coronary artery disease. *Biomed. Res. Int.* 2021; 2021: 6685378. <https://doi.org/10.1155/2021/6685378>
9. Zuo H., Yan J., Zeng H., Li W., Li P., Liu Z., Cui G., Lv J., Wang D., Wang H. Diagnostic power of longitudinal strain at rest for the detection of obstructive coronary artery disease in patients with type 2 diabetes mellitus. *Ultrasound Med. Biol.* 2015; 41 (1): 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2014.08.011>

10. Nishimura K., Okayama H., Inoue K., Saito M., Yoshii T., Hiasa G., Sumimoto T., Inaba S., Ogimoto A., Ohtsuka T., Funada J., Shigematsu Y., Higaki J. Usefulness of the MOSAIC (measurement of stenosis by aliasing coronary flow) method using transthoracic color Doppler echocardiography in unstable angina patients. *Int. J. Cardiol.* 2011; 151 (2): 170–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2010.05.007>
11. Morofuji T., Saito M., Inaba S., Morioka H., Sumimoto T. Prognostic value of proximal left coronary artery flow velocity detected by transthoracic Doppler echocardiography. *Int. J. Cardiol. Heart Vasc.* 2018; 19: 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijcha.2018.04.003>
12. Joutsiniemi E., Saraste A., Pietila M., Ukkonen H., Kajander S., Maki M., Koskenvuo J., Airaksinen J., Hartiala J., Saraste M., Knuuti J. Resting coronary flow velocity in the functional evaluation of coronary artery stenosis: study on sequential use of computed tomography angiography and transthoracic Doppler echocardiography. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2012; 13 (1): 79–85. <https://doi.org/10.1093/ejehocard/jer153>
13. De Waard G.A., Broyd C.J., Cook C.M., van der Hoeven N.W., Petraco R., Nijjer S.S., van de Hoef T.P., Echavarría-Pinto M., Meuwissen M., Sen S., Knaapen P., Escaned J., Piek J.J., van Royen N., Davies J.E. Diastolic-systolic velocity ratio to detect coronary stenoses under physiological resting conditions: a mechanistic study. *Open Heart.* 2019; 6 (1): e000968. <https://doi.org/10.1136/openhrt-2018-000968>
14. Sicari R., Cortigiani L. The clinical use of stress echocardiography in ischemic heart disease. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2017; 15 (1): 7. <https://doi.org/10.1186/s12947-017-0099-2>
15. Vaidya G.N. Application of exercise ECG stress test in the current high cost modern-era healthcare system. *Indian Heart J.* 2017; 69 (4): 551–555. <https://doi.org/10.1016/j.ihj.2017.06.004>
16. Knuuti J., Wijns W., Saraste A., Capodanno D., Barbato E., Funck-Brentano C., Prescott E., Storey R.F., Deaton C., Cuisset T., Agewall S., Dickstein K., Edvardsen T., Escaned J., Gersh B.J., Svitil P., Gilard M., Hasdai D., Hatala R., Mahfoud F., Masip J., Muneretto C., Valgimigli M., Achenbach S., Bax J.J.; ESC Scientific Document Group. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes. *Eur. Heart J.* 2020; 41 (3): 407–477. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz425>
17. 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): 2900–2907. <https://doi.org/10.1161/01.cir.0000072790.23090.41>
18. Fihn S.D., Gardin J.M., Abrams J., Berra K., Blankenship J.C., Dallas A.P., Douglas P.S., Foody J.M., Gerber T.C., Hinderliter A.L., King S.B. 3rd, Kligfield P.D., Krumholz H.M., Kwong R.Y., Lim M.J., Linderbaum J.A., Mack M.J., Munger M.A., Prager R.L., Sabik J.F., Shaw L.J., Sikkema J.D., Smith C.R. Jr., Smith S.C. Jr., Spertus J.A., Williams S.V. 2012 ACCF/AHA/ACP/AATS/PCNA/SCAI/STS Guideline for the diagnosis and management of patients with stable ischemic heart disease: executive summary: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines, and the American College of Physicians, American Association for Thoracic Surgery, Preventive Cardiovascular Nurses Association, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, and Society of Thoracic Surgeons. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2012; 60 (24): 2564–2603. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2012.07.012>
19. Pellikka P.A., Arruda-Olson A., Chaudhry F.A., Chen M.H., Marshall J.E., Porter T.R., Sawada S.G. Guidelines for performance, interpretation, and application of stress echocardiography in ischemic heart disease: from the American Society of Echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2020; 33 (1): 1–41.e8. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2019.07.001>
20. Neumann F.J., Sousa-Uva M., Ahlsson A., Alfonso F., Banning A.P., Benedetto U., Byrne R.A., Collet J.P., Falk V., Head S.J., Juni P., Kastrati A., Koller A., Kristensen S.D., Niebauer J., Richter D.J., Seferovic P.M., Sibbing D., Stefanini G.G., Windecker S., Yadav R., Zembala M.O.; ESC Scientific Document Group. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization. *Eur. Heart J.* 2019; 40 (2): 87–165. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy394>
21. Берштейн Л.Л., Збышевская Е.В., Катамадзе Н.О., Кузьмина-Крутецкая А.М., Волков А.В., Андреева А.Е., Гумерова В.Е., Битакова Ф.И., Сайганов С.А. ISCHEMIA – крупнейшее в истории рандомизированное исследование по стабильной ишемической болезни сердца. Исходные характеристики включенных пациентов на примере российского центра. *Кардиология.* 2017; 57 (10): 12–19. <https://doi.org/10.18087/cardio.2017.10.10038>
22. Lancellotti P., Pellikka P.A., Budts W., Chaudhry F.A., Donal E., Dulgheru R., Edvardsen T., Garbi M., Ha J.W., Kane G.C., Kreeger J., Mertens L., Pibarot P., Picano E., Ryan T., Tsutsui J.M., Varga A. The clinical use of stress echocardiography in non-ischaemic heart disease: recommendations from the European Association of Cardiovascular Imaging and the American Society of Echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2017; 30 (2): 101–138. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2016.10.016>
23. Pieske B., Tschope C., de Boer R.A., Fraser A.G., Anker S.D., Donal E., Edelman F., Fu M., Guazzi M., Lam C.S.P., Lancellotti P., Melonovsky V., Morris D.A., Nagel E., Pieske-Kraigher E., Ponikowski P., Solomon S.D., Vasan R.S., Rutten F.H., Voors A.A., Ruschitzka F., Paulus W.J., Seferovic P., Filippatos G. How to diagnose heart failure with preserved ejection fraction: the HFA-PEFF diagnostic algorithm: a consensus recommendation from the Heart Failure

- Association (HFA) of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur. Heart J.* 2019; 40 (40): 3297–3317. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz641>
24. Johri A.M., Nambi V., Naqvi T.Z., Feinstein S.B., Kim E.S.H., Park M.M., Becher H., Sillesen H. Recommendations for the assessment of carotid arterial plaque by ultrasound for the characterization of atherosclerosis and evaluation of cardiovascular risk: from the American Society of Echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2020; 33 (8): 917–933. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2020.04.021>
 25. Franco-Gutierrez R., Perez-Perez A.J., Franco-Gutierrez V., Testa-Fernandez A.M., Vidal-Perez R.C., Lopez-Reboiro M.L., Puebla-Rojo V.M., Santas-Alvarez M., Crespo-Leiro M.G., Gonzalez-Juanatey C. Usefulness of carotid ultrasonography in the diagnosis of coronary artery disease in patients undergoing exercise echocardiography. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2018; 16 (1): 26. <https://doi.org/10.1186/s12947-018-0143-x>
 26. Ahmadvazir S., Shah B.N., Zacharias K., Senior R. Incremental prognostic value of stress echocardiography with carotid ultrasound for suspected CAD. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2018; 11 (2 Pt 1): 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2016.12.020>
 27. Rumbinaite E., Zaliaduonyte-Peksiene D., Lapinskas T., Zvirblyte R., Karuzas A., Jonauskienė I., Viezėlis M., Ceponiene I., Gustiene O., Slapikas R., Vaskelyte J.J. Early and late diastolic strain rate vs global longitudinal strain at rest and during dobutamine stress for the assessment of significant coronary artery stenosis in patients with a moderate and high probability of coronary artery disease. *Echocardiography.* 2016; 33 (10): 1512–1522. <https://doi.org/10.1111/echo.13282>
 28. Park J.H., Woo J.S., Ju S., Jung S.W., Lee I., Kim J.B., Kim S.J., Kim W., Kim W.S., Kim K.S. Layer-specific analysis of dobutamine stress echocardiography for the evaluation of coronary artery disease. *Medicine (Baltimore).* 2016; 95 (32): e4549. <https://doi.org/10.1097/md.0000000000004549>
 29. Mandoli G.E., Cameli M., Minardi S., Crudele F., Lungchetti S., Mondillo S. Layer-specific strain in dipyridamole stress echo: a new tool for the diagnosis of microvascular angina. *Echocardiography.* 2018; 35 (12): 2005–2013. <https://doi.org/10.1111/echo.14180>
 30. Ciampi Q., Zagatina A., Cortigiani L., Gaibazzi N., Borguezan Daros C., Zhuravskaya N., Wierzbowska-Drabik K., Kasprzak J.D., de Castro E Silva Pretto J.L., D'Andrea A., Djordjevic-Dikic A., Monte I., Simova I., Boshchenko A., Citro R., Amor M., Merlo P.M., Dodi C., Rigo F., Gligorova S., Dekleva M., Severino S., Lattanzi F., Scali M.C., Vrublevsky A., Torres M.A.R., Salustri A., Rodriguez-Zanella H., Costantino F.M., Varga A., Bossone E., Colonna P., De Nes M., Paterni M., Carpeggiani C., Lowenstein J., Gregori D., Picano E.; Stress Echo 2020 Study Group of the Italian Society of Echocardiography and Cardiovascular Imaging. Functional, anatomical, and prognostic correlates of coronary flow velocity reserve during stress echocardiography. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2019; 74 (18): 2278–2291. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2019.08.1046>
 31. Gould K.L., Lipscomb K. Effects of coronary stenoses on coronary flow reserve and resistance. *Am. J. Cardiol.* 1974; 34 (1): 48–55. [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(74\)90092-7](https://doi.org/10.1016/0002-9149(74)90092-7)
 32. Johnson N.P., Kirkeeide R.L., Gould K.L. History and development of coronary flow reserve and fractional flow reserve for clinical applications. *Interv. Cardiol. Clin.* 2015; 4 (4): 397–410. <https://doi.org/10.1016/j.iccl.2015.06.001>
 33. Rigo F. Coronary flow reserve in stress-echo lab. From pathophysiologic toy to diagnostic tool. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2005; 3: 8. <https://doi.org/10.1186/1476-7120-3-8>

REFERENCES

1. Bruce R.A., Hornsten T.R. Exercise stress testing in evaluation of patients with ischemic heart disease. *Prog. Cardiovasc. Dis.* 1969; 11 (5): 371–390. [https://doi.org/10.1016/0033-0620\(69\)90027-9](https://doi.org/10.1016/0033-0620(69)90027-9)
2. Heusch G. Myocardial stunning and hibernation revisited. *Nat. Rev. Cardiol.* 2021; 18 (7): 522–536. <https://doi.org/10.1038/s41569-021-00506-7>
3. Garcia M.J., Kwong R.Y., Scherrer-Crosbie M., Taub C.C., Blankstein R., Lima J., Bonow R.O., Eshtehardi P., Bois J.P.; American Heart Association Council on Cardiovascular Radiology and Intervention and Council on Clinical Cardiology. State of the art: imaging for myocardial viability: a scientific statement from the American Heart Association. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2020; 13 (7): e000053. <https://doi.org/10.1161/hei.0000000000000053>
4. Lang R.M., Badano L.P., Mor-Avi V., Afzalalo J., Armstrong A., Ernande L., Flachskampf F.A., Foster E., Goldstein S.A., Kuznetsova T., Lancellotti P., Muraru D., Picard M.H., Rietzschel E.R., Rudski L., Spencer K.T., Tsang W., Voigt J.U. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2015; 28 (1): 1–39.e14. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2014.10.003>
5. Bershtein L.L. Tissue Doppler imaging in patients with ischemic heart disease. *Russian Journal of Cardiology.* 2006; 6 (62): 87–94. (in Russian)
6. Alekhin M.N. Clinical application of longitudinal systolic deformation indicators in the heart left ventricle. *Kremlin Medicine Journal.* 2017; 4–1: 101–111. (in Russian)
7. Feigenbaum H., Mastouri R., Sawada S. A practical approach to using strain echocardiography to evaluate the left ventricle. *Circ. J.* 2012; 76 (7): 1550–1555. <https://doi.org/10.1253/circj.cj-12-0665>
8. Pastore M.C., Mandoli G.E., Contorni F., Cavigli L., Focardi M., D'Ascenzi F., Patti G., Mondillo S., Cameli M. Speckle tracking echocardiography: early predictor of diagnosis and prognosis in coronary artery disease. *Biomed. Res. Int.* 2021; 2021: 6685378. <https://doi.org/10.1155/2021/6685378>

9. Zuo H., Yan J., Zeng H., Li W., Li P., Liu Z., Cui G., Lv J., Wang D., Wang H. Diagnostic power of longitudinal strain at rest for the detection of obstructive coronary artery disease in patients with type 2 diabetes mellitus. *Ultrasound Med. Biol.* 2015; 41 (1): 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2014.08.011>
10. Nishimura K., Okayama H., Inoue K., Saito M., Yoshii T., Hiasa G., Sumimoto T., Inaba S., Ogimoto A., Ohtsuka T., Funada J., Shigematsu Y., Higaki J. Usefulness of the MOSAIC (measurement of stenosis by aliasing coronary flow) method using transthoracic color Doppler echocardiography in unstable angina patients. *Int. J. Cardiol.* 2011; 151 (2): 170–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2010.05.007>
11. Morofuji T., Saito M., Inaba S., Morioka H., Sumimoto T. Prognostic value of proximal left coronary artery flow velocity detected by transthoracic Doppler echocardiography. *Int. J. Cardiol. Heart Vasc.* 2018; 19: 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijcha.2018.04.003>
12. Joutsiniemi E., Saraste A., Pietila M., Ukkonen H., Kajander S., Maki M., Koskenvuo J., Airaksinen J., Hartiala J., Saraste M., Knuuti J. Resting coronary flow velocity in the functional evaluation of coronary artery stenosis: study on sequential use of computed tomography angiography and transthoracic Doppler echocardiography. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2012; 13 (1): 79–85. <https://doi.org/10.1093/ejehocard/jer153>
13. De Waard G.A., Broyd C.J., Cook C.M., van der Hoeven N.W., Petraco R., Nijjer S.S., van de Hoef T.P., Echavarria-Pinto M., Meuwissen M., Sen S., Knaapen P., Escaned J., Piek J.J., van Royen N., Davies J.E. Diastolic-systolic velocity ratio to detect coronary stenoses under physiological resting conditions: a mechanistic study. *Open Heart.* 2019; 6 (1): e000968. <https://doi.org/10.1136/openhrt-2018-000968>
14. Sicari R., Cortigiani L. The clinical use of stress echocardiography in ischemic heart disease. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2017; 15 (1): 7. <https://doi.org/10.1186/s12947-017-0099-2>
15. Vaidya G.N. Application of exercise ECG stress test in the current high cost modern-era healthcare system. *Indian Heart J.* 2017; 69 (4): 551–555. <https://doi.org/10.1016/j.ihj.2017.06.004>
16. Knuuti J., Wijns W., Saraste A., Capodanno D., Barbato E., Funck-Brentano C., Prescott E., Storey R.F., Deaton C., Cuisset T., Agewall S., Dickstein K., Edvardsen T., Escaned J., Gersh B.J., Svitil P., Gilard M., Hasdai D., Hatala R., Mahfoud F., Masip J., Muneretto C., Valgimigli M., Achenbach S., Bax J.J.; ESC Scientific Document Group. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes. *Eur. Heart J.* 2020; 41 (3): 407–477. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz425>
17. 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): 2900–2907. <https://doi.org/10.1161/01.cir.0000072790.23090.41>
18. Fihn S.D., Gardin J.M., Abrams J., Berra K., Blankenship J.C., Dallas A.P., Douglas P.S., Foody J.M., Gerber T.C., Hinderliter A.L., King S.B. 3rd, Kligfield P.D., Krumholz H.M., Kwong R.Y., Lim M.J., Linderbaum J.A., Mack M.J., Munger M.A., Prager R.L., Sabik J.F., Shaw L.J., Sikkema J.D., Smith C.R. Jr., Smith S.C. Jr., Spertus J.A., Williams S.V. 2012 ACCF/AHA/ACP/AATS/PCNA/SCAI/STS Guideline for the diagnosis and management of patients with stable ischemic heart disease: executive summary: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines, and the American College of Physicians, American Association for Thoracic Surgery, Preventive Cardiovascular Nurses Association, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, and Society of Thoracic Surgeons. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2012; 60 (24): 2564–2603. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2012.07.012>
19. Pellikka P.A., Arruda-Olson A., Chaudhry F.A., Chen M.H., Marshall J.E., Porter T.R., Sawada S.G. Guidelines for performance, interpretation, and application of stress echocardiography in ischemic heart disease: from the American Society of Echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2020; 33 (1): 1–41.e8. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2019.07.001>
20. Neumann F.J., Sousa-Uva M., Ahlsson A., Alfonso F., Banning A.P., Benedetto U., Byrne R.A., Collet J.P., Falk V., Head S.J., Juni P., Kastrati A., Koller A., Kristensen S.D., Niebauer J., Richter D.J., Seferovic P.M., Sibbing D., Stefanini G.G., Windecker S., Yadav R., Zembala M.O.; ESC Scientific Document Group. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization. *Eur. Heart J.* 2019; 40 (2): 87–165. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy394>
21. Bershtein L.L., Zbyshevskaya E.V., Katamadze N.O., Kuzmina-Krutetskaya A.M., Volkov A.V., Andreeva A.E., Gumerova V.E., Bitakova F.I., Sayganov S.A. ISCHEMIA – the largest ever randomized study in stable coronary artery disease. Baseline characteristics of enrolled patients in one Russian site. *Kardiologiia.* 2017; 57 (10): 12–19. <https://doi.org/10.18087/cardio.2017.10.10038> (in Russian)
22. Lancellotti P., Pellikka P.A., Budts W., Chaudhry F.A., Donal E., Dulgheru R., Edvardsen T., Garbi M., Ha J.W., Kane G.C., Kreeger J., Mertens L., Pibarot P., Picano E., Ryan T., Tsutsui J.M., Varga A. The clinical use of stress echocardiography in non-ischaemic heart disease: recommendations from the European Association of Cardiovascular Imaging and the American Society of Echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2017; 30 (2): 101–138. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2016.10.016>
23. Pieske B., Tschöpe C., de Boer R.A., Fraser A.G., Anker S.D., Donal E., Edelmann F., Fu M., Guazzi M., Lam C.S.P., Lancellotti P., Melonovsky V., Morris D.A., Nagel E., Pieske-

- Kraigher E., Ponikowski P., Solomon S.D., Vasan R.S., Rutten F.H., Voors A.A., Ruschitzka F., Paulus W.J., Seferovic P., Filippatos G. How to diagnose heart failure with preserved ejection fraction: the HFA-PEFF diagnostic algorithm: a consensus recommendation from the Heart Failure Association (HFA) of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur. Heart J.* 2019; 40 (40): 3297–3317. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz641>
24. Johri A.M., Nambi V., Naqvi T.Z., Feinstein S.B., Kim E.S.H., Park M.M., Becher H., Sillesen H. Recommendations for the assessment of carotid arterial plaque by ultrasound for the characterization of atherosclerosis and evaluation of cardiovascular risk: from the American Society of Echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2020; 33 (8): 917–933. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2020.04.021>
25. Franco-Gutierrez R., Perez-Perez A.J., Franco-Gutierrez V., Testa-Fernandez A.M., Vidal-Perez R.C., Lopez-Reboiro M.L., Puebla-Rojo V.M., Santas-Alvarez M., Crespo-Leiro M.G., Gonzalez-Juanatey C. Usefulness of carotid ultrasonography in the diagnosis of coronary artery disease in patients undergoing exercise echocardiography. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2018; 16 (1): 26. <https://doi.org/10.1186/s12947-018-0143-x>
26. Ahmadvazir S., Shah B.N., Zacharias K., Senior R. Incremental prognostic value of stress echocardiography with carotid ultrasound for suspected CAD. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2018; 11 (2 Pt 1): 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2016.12.020>
27. Rumbinaite E., Zaliaduonyte-Peksiene D., Lapinskas T., Zvirblyte R., Karuzas A., Jonauskienė I., Viezelis M., Ceponiene I., Gustiene O., Slapikas R., Vaskelyte J.J. Early and late diastolic strain rate vs global longitudinal strain at rest and during dobutamine stress for the assessment of significant coronary artery stenosis in patients with a moderate and high probability of coronary artery disease. *Echocardiography.* 2016; 33 (10): 1512–1522. <https://doi.org/10.1111/echo.13282>
28. Park J.H., Woo J.S., Ju S., Jung S.W., Lee I., Kim J.B., Kim S.J., Kim W., Kim W.S., Kim K.S. Layer-specific analysis of dobutamine stress echocardiography for the evaluation of coronary artery disease. *Medicine (Baltimore).* 2016; 95 (32): e4549. <https://doi.org/10.1097/md.0000000000004549>
29. Mandoli G.E., Cameli M., Minardi S., Crudele F., Lunghetti S., Mondillo S. Layer-specific strain in dipyridamole stress echo: a new tool for the diagnosis of microvascular angina. *Echocardiography.* 2018; 35 (12): 2005–2013. <https://doi.org/10.1111/echo.14180>
30. Ciampi Q., Zagatina A., Cortigiani L., Gaibazzi N., Borguezan Daros C., Zhuravskaya N., Wierzbowska-Drabik K., Kasprzak J.D., de Castro E Silva Pretto J.L., D'Andrea A., Djordjevic-Dikic A., Monte I., Simova I., Boshchenko A., Citro R., Amor M., Merlo P.M., Dodi C., Rigo F., Gligorova S., Dekleva M., Severino S., Lattanzi F., Scali M.C., Vrublevsky A., Torres M.A.R., Salustri A., Rodriguez-Zanella H., Costantino F.M., Varga A., Bossone E., Colonna P., De Nes M., Paterni M., Carpegiani C., Lowenstein J., Gregori D., Picano E.; Stress Echo 2020 Study Group of the Italian Society of Echocardiography and Cardiovascular Imaging. Functional, anatomical, and prognostic correlates of coronary flow velocity reserve during stress echocardiography. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2019; 74 (18): 2278–2291. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2019.08.1046>
31. Gould K.L., Lipscomb K. Effects of coronary stenoses on coronary flow reserve and resistance. *Am. J. Cardiol.* 1974; 34 (1): 48–55. [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(74\)90092-7](https://doi.org/10.1016/0002-9149(74)90092-7)
32. Johnson N.P., Kirkeeide R.L., Gould K.L. History and development of coronary flow reserve and fractional flow reserve for clinical applications. *Interv. Cardiol. Clin.* 2015; 4 (4): 397–410. <https://doi.org/10.1016/j.iccl.2015.06.001>
33. Rigo F. Coronary flow reserve in stress-echo lab. From pathophysiologic toy to diagnostic tool. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2005; 3: 8. <https://doi.org/10.1186/1476-7120-3-8>

Contemporary role of echocardiography in coronary artery disease (a pictorial review)

L.L. Bershtein¹, A.E. Andreeva¹, N.S. Zhukovsky², P.O. Karchikyan³, V.I. Novikov¹

¹ North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov,
Saint-Petersburg

² Mariinsky Hospital, Saint Petersburg

³ Pokrovskaya Hospital, Saint Petersburg

L.L. Bershtein – M.D., Ph.D., Professor, Division of Cardiology, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint-Petersburg. <https://orcid.org/0000-0002-9444-159X>

A.E. Andreeva – M.D., Head of Functional Diagnostics Department, Clinic named after E.E. Eichwald, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint-Petersburg.

N.S. Zhukovsky – M.D., Ultrasound Diagnostics Department, Mariinsky Hospital, Saint Petersburg.

P.O. Karchikyan – M.D., Ph.D., Department of Interventional Radiology, Pokrovskaya Hospital, Saint Petersburg. <https://orcid.org/0000-0001-8288-0352>

V.I. Novikov – M.D., Ph.D., Professor, Director, Division of Functional Diagnostics, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint-Petersburg. <https://orcid.org/0000-0002-2493-6300>

Correspondence to Prof. Leonid L. Bershtein. E-mail: leonid.bershtein@s zgmu.ru

Echocardiography is an actively developing modality that plays a key role in the diagnosis of coronary artery disease (CAD). In recent years, the important changes occurred in the examination protocols and analysis methods of resting and stress echocardiography in patients with CAD. Along with the standard visual analysis of wall motion, the speckle tracking mode is widely used to quantify local and global contractility when the resting or stress echocardiography is performed. Coronary artery imaging is increasingly used to assess blood flow velocities across stenosis at rest, as well as coronary flow reserve during the stress test. The stress echocardiography protocol has been expanded by including several parameters unrelated to left ventricular contractility. To increase the diagnostic value of stress echocardiography, some authors have suggested to combine it with a focused ultrasound examination of the carotid arteries. The described innovations have already found or are finding their place in everyday clinical practice. This article provides an overview of the current state of echocardiography use in patients with CAD.

Key words: echocardiography, coronary artery disease, coronary artery flow, myocardial strain.

Citation: Bershtein L.L., Andreeva A.E., Zhukovsky N.S., Karchikyan P.O., Novikov V.I. Contemporary role of echocardiography in coronary artery disease (a pictorial review). *Ultrasound and Functional Diagnostics*. 2022; 1: 27–43. <https://doi.org/10.24835/1607-0771-2022-1-27-43> (in Russian)