

Новые визуализирующие методики в диагностике сердечной недостаточности с сохранной фракцией выброса

Е.К. Серезина¹, профессор А.Г. Обрезан^{1,2}

¹ ООО «ММЦ «СОГАЗ», Санкт-Петербург

² ФГБОУ ВО СПбГУ, Санкт-Петербург

РЕЗЮМЕ

В настоящее время сердечная недостаточность (СН) представляет собой одну из наиболее распространенных кардиологических патологий, частота которой за последние десятилетия возрастает. Существует теория, что СН представлена двумя патологическими процессами: систолической и диастолической дисфункцией. В настоящее время дифференциация между СН с сохранной фракцией выброса (HFpEF) и СН со сниженной фракцией выброса (HFrEF) основана на измерении фракции выброса (ФВ) с помощью доплеровской ЭхоКГ. Однако благодаря новым методам оценки сердечной функции, таким как измерение скорости деформации длинной оси и тканевая доплеровская визуализация, появляются новые, более корректные критерии оценки систолической функции, чем ФВ. Приведенные в данном обзоре углубленные методики — импульсно-волновая тканевая доплерография, двухмерная и трехмерная спектральная следящая ЭхоКГ, позволяют: выявлять изменения сократительных и деформационных свойств миокарда, определять ранние нарушения систолической и диастолической функции, оценивать риски как госпитализации, так и смерти по кардиальным причинам, а также рассчитывать прогноз для пациентов с HFpEF. Таким образом, HFpEF на текущем этапе можно оценивать как по различным характеристикам гемодинамического выброса и нарушению продольной сократимости левого желудочка (ЛЖ), так и по характеру ФВЛЖ отдельно от кинетики ЛЖ.

Ключевые слова: сердечная недостаточность, сохранная фракция выброса, эхокардиография, тканевая доплерография, спекл-трекинг, деформация.

Для цитирования: Серезина Е.К., Обрезан А.Г. Новые визуализирующие методики в диагностике сердечной недостаточности с сохранной фракцией выброса. РМЖ. Медицинское обозрение. 2019;1(II):52–56.

ABSTRACT

New imaging techniques in the diagnosis of heart failure with preserved ejection fraction

E.K. Serezhina¹, A.G. Obrezan^{1,2},

¹IMC SOGAZ LLC, St. Petersburg

²St. Petersburg State University

At the present day, heart failure (HF) is one of the most common cardiac pathologies, the frequency of which has been increasing over the past decades. The theory prevails that HF is not the only syndrome, but rather represented by two pathological processes — systolic and diastolic dysfunction. Nowadays, the differentiation between heart failure with preserved ejection fraction (HFpEF) and heart failure with reduced ejection fraction (HFrEF) is based on the ejection fraction (EF) measurement by Doppler echocardiography. However, in contrast with EF measurement, new and more valid criteria for the systolic function assessment appear by virtue of cardiac function assessment, such as the long-axis strain rate measurement and tissue Doppler imaging. The in-depth techniques presented in this review, such as pulse-wave tissue Doppler, 2D and 3D speckle tracking echocardiography, allow you to: identify changes in myocardial contractility and deformity, determine early systolic and diastolic dysfunction, assess the risks of both hospitalization and death due to cardiac causes, and calculate the prognosis for patients with HFpEF. Thus, HFpEF in the current stage can be viewed both as by virtue of different characteristics of hemodynamic response and the longitudinal left ventricular (LV) contractile dysfunction, and by the LVEF analysis separately from the LV kinetics.

Keywords: heart failure, preserved ejection fraction, echocardiography, tissue Doppler, speckle tracking, deformation.

For citation: Serezhina E.K., Obrezan A.G. New imaging techniques in the diagnosis of heart failure with preserved ejection fraction. RMJ. Medical Review. 2019;1(II):52–56.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сердечная недостаточность (СН) — одна из наиболее распространенных кардиологических патологий, частота которой за последние десятилетия лишь возрастает [1, 2]. Существует теория, что СН представлена двумя патологическими процессами: систолической и диастолической дисфункцией. Данная гипотеза подтверждается структурными, функциональными и молекулярными

изменениями, связанными с диастолической функцией сердца [3], а также клиническими фармакологическими исследованиями, которые показывают, что у пациентов с СН с сохранной фракцией выброса (HFpEF) эффект от проводимой терапии отличен от такового у пациентов с СН со сниженной фракцией выброса (HFrEF). Это указывает на существование различных патофизиологических механизмов возникновения и прогрессирования СН [4].

ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ HFrEF и HFReEF

На данный момент дифференциальная диагностика между HFrEF и HFReEF основана на измерении фракции выброса (ФВ) с помощью доплеровской эхокардиографии (ЭхоКГ). Однако благодаря новым методам оценки сердечной функции, таким как измерение скорости деформации длинной оси и тканевая доплеровская визуализация, появляются новые, более корректные критерии оценки систолической функции, чем ФВ [5]. Таким образом, HFrEF на текущем этапе можно оценивать как по различным характеристикам гемодинамического выброса и нарушению продольной сократимости левого желудочка (ЛЖ), так и по характеру ФВЛЖ отдельно от кинетики ЛЖ [5, 6].

Согласно текущим клиническим рекомендациям Европейского сообщества кардиологов необходимыми компонентами для постановки диагноза HFrEF являются:

- ♦ клиническая картина;
- ♦ диастолическая дисфункция ЛЖ или структурные изменения миокарда (увеличение размеров левого предсердия и/или гипертрофия ЛЖ);
- ♦ повышенный уровень натрийуретического пептида;
- ♦ нормальная или немного измененная систолическая функция ЛЖ [7].

В 2018 г. профессором В. Pieske была предложена четырехступенчатая модель диагностики HFrEF.

- ♦ 1-я ступень — анализ симптомов, факторов риска СН, клинический анализ крови, рго-BNP, выполнение ЭКГ и стандартного ЭхоКГ;
- ♦ 2-я ступень — выполнение расширенного протокола ЭхоКГ (оценка вероятности наличия HFrEF по 6-балльной шкале). Если набрано более 3 баллов, то переходят к 3-й ступени исследования;
- ♦ 3-я ступень — стресс-ЭхоКГ (проба с физической нагрузкой);
- ♦ 4-я ступень — МРТ, сцинтиграфия или биопсия миокарда для определения этиопатогенеза СН [8].

Приведенные в данном обзоре углубленные визуализирующие методики позволяют: выявлять изменения сократительных и деформационных свойств миокарда, определять ранние нарушения систолической и диастолической функции, оценивать риски как госпитализации, так и смерти по кардиальным причинам, а также рассчитывать прогноз для пациентов с HFrEF.

Для количественного и качественного анализа функции миокарда при помощи визуализирующих методик необходимо понимать архитектуру волокон, компоненты деформации и движение миокарда в пространстве.

ОРИЕНТАЦИЯ ВОЛОКОН МИОКАРДА, ИХ ДВИЖЕНИЕ В ПРОСТРАНСТВЕ И КОМПОНЕНТЫ ДЕФОРМАЦИИ МИОКАРДА

Архитектура волокон ЛЖ состоит из нескольких слоев. Субэндокардиальные волокна проходят в продольном направлении и закручены против часовой стрелки, волокна среднего слоя проходят продольно и закручены по часовой стрелке. Вследствие перекрестного расположения волокон этих двух слоев происходит утолщение стенки в радиальном направлении и укорочение в продольном и циркулярном направлении [9]. Существует три принципиальных компонента деформации: продольное, радиальное и циркулярное укорочение [10]. Считается, что эти плоскости деформации связаны с ориентацией волокон миокарда

ЛЖ, которая преимущественно проходит в продольном направлении субэндокардиально и преимущественно в косой ориентации субэпикардиально [11].

Кроме того, к этим деформациям добавляется вращение, представляющее собой угловое смещение сегмента миокарда в поперечном направлении вокруг продольной оси ЛЖ вследствие перекрестного хода мышечных волокон. Апикальное систолическое вращение происходит в направлении против часовой стрелки и выражается в градусах с положительными значениями при просмотре из вершины. И наоборот, базальное вращение происходит по часовой стрелке с отрицательными значениями. Из-за этого возникает угловое различие между апикальным и базальным вращением [12].

Продольная деформация и скручивание желудочков могут не в равной мере влиять на их дисфункцию [13], поэтому их оценка может представлять собой ценный инструмент для клинической практики даже в случаях начальных и умеренных патологических изменений, которые не обнаруживаются при анализе классических параметров гемодинамики [14–18].

Профили продольных скоростей просты и малоизменяемы. Они чаще используются в функциональной диагностике ввиду их большой исследованности и валидности, в то время как профили радиальной и циркулярной деформации менее постоянны и реже используются в исследованиях.

Известно, что компонент продольной деформации миокардиальной функции реагирует быстрее, чем циркулярный или радиальный вследствие большей чувствительности эндокарда и субэндокардиальных слоев к ишемии [19–21].

Ввиду невозможности различить пассивную и активную деформацию на основании числовых значений нельзя делать вывод о сокращении или расслаблении миокарда [9].

Рассмотрим некоторые из визуализирующих методик.

ТКАНЕВАЯ ДОПЛЕРОГРАФИЯ

Тканевая доплерография (TDI) — это надежный и воспроизводимый эхокардиографический метод, позволяющий провести количественную оценку не только глобальной и регионарной функции миокарда, но и времени миокардиальных событий [22, 23]. Существует несколько модальностей TDI.

Импульсно-волновая TDI используется для измерения пиковых скоростей миокарда и особенно хорошо подходит для измерения продольной деформации желудочков ввиду параллельности ориентации эндокардиальных волокон ультразвуковому лучу в апикальных позициях [24]. Митральные кольцевые или базальные скорости ЛЖ отражают продольную деформацию миокарда, что является важным показателем систолической и диастолической функции ЛЖ [25].

Импульсно-волновая TDI позволяет получить несколько показателей, которые имеют клиническое и прогностическое значение:

S' — систолическая скорость миокарда выше базовой линии, отражающая сокращение миокарда, когда кольцевое пространство смещается к вершине;

E' — ранняя диастолическая скорость релаксации миокарда ниже базовой линии, когда кольцевое пространство смещается от вершины;

A' — скорость миокарда, связанная с позднедиастолическим сокращением предсердий.

Пиковая систолическая скорость миокарда, усредненная по 6 участкам вокруг митрального кольца, хорошо коррелирует с ФВЛЖ [26], а также является чувствительным маркером его слаборазрушенной систолической функции даже у пациентов с нормальной ФВЛЖ или с сохраненной его систолической функцией с нарушением диастолического расслабления. Кроме того, изменение пиковой систолической скорости миокарда является маркером неблагоприятного прогноза [27].

Wang et al. [28] обнаружили, что кардиальная смертность была значительно выше, когда S' и E' были менее 3 см/с (отношение рисков [HRs] 7,5 и 5,3 соответственно), хотя в многомерном анализе E' сильнее влиял на смертность, чем S' .

Импульсно-волновая TDI имеет высокое временное разрешение, но не позволяет проводить одновременный анализ нескольких сегментов миокарда [24].

В режиме цветовой TDI на изображение в градациях серого накладывается информация о скоростях и направлениях движения, кодированная цветом [9, 24]. Данный режим имеет преимущество увеличенного пространственно-го разрешения и возможность оценки нескольких структур в одной позиции [24]. В 3D-TDI цветовой код TDI применяется в трехмерном изображении, полученном в проекции из апикального окна в трехплоскостном режиме, одновременно получают апикальные четырех-, двух- и трехкамерные позиции. Метод 3D также позволяет оценивать диссинхронию ЛЖ путем одновременного получения TDI из всех сегментов ЛЖ в течение одного и того же сердечного цикла [29].

Хотя большинство методик TDI фокусируются лишь на измерении скоростей, некоторые исследователи использовали TDI для получения систолического и диастолического интервалов времени [30–35]. Временными интервалами TDI, измеренными с участков (боковых или медиальных) в митральном кольце, являются (рис. 1):

IVCT — время изоволюмического сокращения (от конца волны A' до начала волны S');

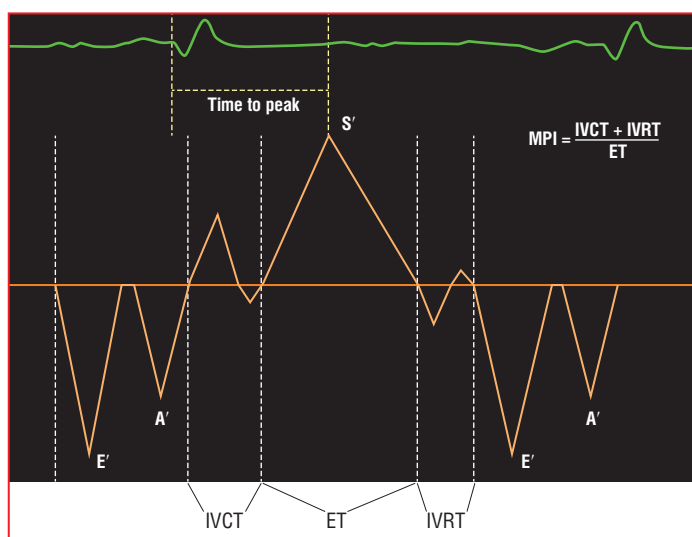


Рис. 1. Временные интервалы TDI: S' — систолическая скорость миокарда, E' — ранняя диастолическая скорость релаксации миокарда, A' — скорость миокарда, связанная с позднедиастолическим сокращением предсердий, IVCT — время изоволюмического сокращения, ET — время выброса, IVRT — время изоволюмической релаксации, MPI — индекс активности миокарда

ET — время выброса (от начала до конца волны S'); IVRT — время изоволюмической релаксации (от конца волны S' до начала волны E').

На основе систолических и диастолических интервалов времени высчитывается индекс активности миокарда (MPI), определяемый как отношение суммы времени изоволюмического сокращения (IVCT) и релаксации (IVRT) ко времени выброса (ET). Этот показатель является простым и хорошо воспроизводимым [36, 37].

В ходе ряда исследований было определено, что увеличение MPI служит надежным предиктором ранней внутрибольничной СН у пациентов, перенесших инфаркт миокарда с подъемом сегмента ST [38–40]. Кроме того, MPI оказался независимым предиктором смертности среди населения в целом [37].

Таким образом, TDI играет фундаментальную роль в диагностике СН, поскольку клинически HFrEF неотличима от HFpEF, и требует измерения ФВ. В свою очередь, E' является достоверным предиктором прогноза СН, а также используется для ее дифференциальной диагностики, поскольку отражает как систолическую, так и диастолическую функцию ЛЖ [41–44]. Кроме того, субэндокардиальные волокна, которые ответственны за сокращение по длинной оси, могут быть более восприимчивыми к ишемии, фиброзу и гипертрофии вследствие их положения, и это объясняет, почему E' является достоверным маркером СН [44].

Разработка новых методов TDI [45] обеспечила большую точность в оценке функции желудочков. M. Wang et al. [46] показали, что изменение скорости релаксации в ранней диастоле (E') является достоверным предиктором смертности по сравнению с клиническими данными и стандартной ЭхоКГ. Это измерение легко воспроизводится и делает более эффективной оценку результатов лечения пациентов с СН [46, 47].

Таким образом, TDI можно считать надежным методом количественной оценки как глобальной, так и регионарной систолической и диастолической функции ЛЖ. Полученные с помощью этого метода данные позволяют прогнозировать риски различных сердечно-сосудистых заболеваний.

СПЕКТРАЛЬНАЯ СЛЕДЯЩАЯ ЭХОКАРДИОГРАФИЯ (STE)

Спекл-трекинг эхокардиография (speckle-tracking echocardiography — STE) — метод оценки сердечной функции [48], позволяющий визуализировать каждую область миокарда как определенную, относительно стабильную и уникальную структуру паттернов, что позволяет ей дифференцироваться от других областей миокарда в течение сердечного цикла. При использовании данного метода измеряются такие параметры миокардиального сокращения, как деформация и скорость деформации. Эти параметры количественно определяют систолическую и диастолическую функцию миокарда в трех взаимоперпендикулярных плоскостях [49, 50].

Было также обнаружено, что STE полезна для количественной оценки глобальной и регионарной функции ЛЖ с использованием таких параметров, как миокардиальная деформация, модели движения ЛЖ и диссинхронизация [51]. STE обладает высоким временным и пространственным разрешением, хорошей воспроизводимостью [52] и не зависит от угла сканирования и ограниченного окна, что

позволяет количественно определять деформацию миокарда в нескольких плоскостях [53]. Важен и тот факт, что поступательные движения сердца не влияют на результаты измерений. Кроме того, благодаря своему трехмерному режиму метод позволяет одновременно оценивать весь миокард ЛЖ. Значения, полученные с помощью STE, специфически связаны с функцией миокарда ЛЖ и позволяют описывать механизм сокращения и его компоненты, такие как: продольная и циркулярная деформация, радиальное утолщение и вращательные движения.

Под деформацией понимают процентное изменение длины волокна миокарда относительно исходной длины. Систолическое укорочение миокардиального волокна обозначается отрицательным значением, тогда как систолическое удлинение — положительным [54].

Продольная деформация (global longitudinal strain — GLS) — это укорочение мышечных волокон в направлении от основания до верхушки в систолу. Она измеряется в двухкамерной и четырехкамерной позиции по длинной оси [55]. Исследуя GLS, можно оценить как глобальную сократимость, так и локальную деформацию ЛЖ [56]. Радиальная деформация (global radial strain — GRS) — укорочение мышечных волокон к центру полости ЛЖ, отражающая его утолщение и истончение во время сердечного цикла [55]. Параметры GRS определяются с помощью исследования коротких осей ЛЖ как из базального, так и из апикального доступа [57].

У пациентов с HFrEF, несмотря на сохраненную систолическую функцию миокарда, имеют место существенные нарушения отдельных параметров деформации [58–60].

Следует отметить, что компонент GLS миокардиальной функции реагирует быстрее, чем циркулярный или радиальный. Это объясняется большей подверженностью ишемии субэндокардиальных слоев [61]. Как показано в исследованиях, циркулярная и продольная дисфункция деформации имеют место у 25% пациентов с HFrEF, в то время как радиальная остается сохранной [62, 63]. Кроме того, R.W.J. van Grootel et al. показали, что диастолическая функция левого желудочка, оцененная с помощью STE, снижается с возрастом даже у людей без кардиологической патологии. В связи с этим в повседневной клинической практике необходимо сравнивать полученные данные с эталонными для соответствующего возраста и пола значениями [64].

При отдельных измерениях оценка GLS доказала свою прогностическую значимость как наиболее важный эхокардиографический предиктор сердечно-сосудистой смерти и/или СН в исследованиях PARAMOUNT и TOPCAT у пациентов с HFrEF [65–67]. Есть мнение, что GLS является лучшим предиктором неблагоприятных событий у пациентов с HFrEF, чем ФВЛЖ [68]. По данным исследований показано, что у пациентов с $GLS \leq -15\%$ риск неблагоприятных событий в течение года (повторная госпитализация и сердечная смерть) выше, чем у пациентов с $GLS > -15\%$ [69]. Другие работы показывают, что снижение GLS миокарда предоставляет важную прогностическую информацию и для пациентов с ФВЛЖ $>35\%$, являясь предиктором смертности по кардиологическим причинам, а также госпитализации ввиду СН и желудочковых аритмий [70–72].

Некоторые исследования [73] демонстрируют высокую распространенность нарушенной GLS ЛЖ при HFrEF даже среди пациентов с ФВЛЖ $>55\%$, причем ухудшение GLS отчетливо связано с более высокими уровнями мозгового натрийуретического пептида NT-proBNP даже после

корректировки ФВЛЖ и диастолической функции. ФВЛЖ и глобальная периферическая деформация — основные определяющие компоненты желудочкового скручивания — сохранялись в популяции пациентов с HFrEF в качестве компенсаторного механизма [74].

Более того, в настоящее время 2D-STE активно используется для динамической оценки восстановления систолической и диастолической функции миокарда, нарушенной вследствие ишемии. Так, K. Wdowiak-Okrojek et al. показали восстановление систолической функции миокарда в регионе успешной реперфузии в течение 2 дней, в то время как восстановление диастолической функции занимает больше времени: наиболее значительная часть улучшения происходит в течение первых 7 дней. Кроме того, параметры STE являются значимыми для прогнозирования улучшения систолической функции в зоне реперфузии в течение 180 дней [75].

Интересно, что включение STE в клиническую практику способствовало исследованию вращательной механики ЛЖ [76–78], также отмечена очень хорошая корреляция данных STE с MPT миокарда [76, 77]. Было высказано предположение о том, что в будущем комплексный подход, в котором оцениваются и интерпретируются изменения механики вращательного движения ЛЖ и GLS, необходим для установления эталонных значений функции ЛЖ [79–81]. Вычленение скручивания желудочка отдельно от вращения и продольной деформации с помощью STE может предоставить дополнительную информацию о систолической функции желудочка помимо традиционных параметров, используемых в повседневной практике, таких как ФВЛЖ [82].

Таким образом, STE делает возможной количественную оценку глобальной и регионарной функции ЛЖ в нескольких плоскостях при помощи таких параметров, как миокардиальная деформация, модели движения ЛЖ и диссинхронизация [49]. STE обладает высоким временным и пространственным разрешением [53, 83]. Однако расчет деформации с помощью этого метода имеет свои ограничения ввиду таких факторов, как субоптимальная воспроизводимость [54], зависимость адекватного отслеживания меток от качества и скорости кадра [47], а также неоднородность толщины миокарда, вариабельность сердечного ритма, дыхания, геометрии ЛЖ, разрешения боковой стенки.

3D-STE с одновременным анализом разнонаправленной деформации, включая оценку вращательной механики, с использованием полномасштабного сбора данных о движении миокарда ЛЖ, является перспективным методом функциональной оценки систолической и диастолической функции ЛЖ [51]. Хотя у данного метода много преимуществ, он также имеет ряд ограничений. Одним из них является его зависимость от качества изображения, в частности его способности определять эндокардиальную границу [84]. Кроме того, в настоящий момент сканирование 3D обычно имеет более низкое пространственное и временное разрешение, чем 2D, что является дополнительным потенциальным ограничением [51]. Более того, результаты трехмерного эхокардиографического измерения деформаций с помощью STE могут быть занижены, потому что частота кадров в реальном времени 3D-ЭхоКГ недостаточно высока, чтобы точно фиксировать все фазы сердечного цикла [85]. Поэтому 3D-STE по-прежнему рассматривается как экспериментальный метод.

В клинических условиях 3D-STE была применена для оценки функции ЛЖ и регионарных нарушений стено-

кардии, включая уменьшенную функцию ишемического миокарда, диастолическую функцию у пациентов с СН и сердечную диссинхроничность, которая может использоваться для прогнозирования ответов на ресинхронизирующую терапию [84].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенные в данном обзоре углубленные методики позволяют: выявлять изменения сократительных и деформационных свойств миокарда, определять ранние нарушения систолической и диастолической функции, оценивать риски как госпитализации, так и смерти по кардиальным причинам, а также рассчитывать прогноз для пациентов с НФрЕФ.

Литература

- Go A.S., Mozaffarian D., Roger V.L. et al. Executive summary: heart disease and stroke statistics-2014 update: a report from the American Heart Association. *Circulation*. 2014;129:399–410. DOI: 10.1161/01.cir.0000442015.53336.12.
- Owan T.E., Hodge D.O., Herges R.M. et al. Trends in prevalence and outcome of heart failure with preserved ejection fraction. *N Engl J Med*. 2006;355:251–259. DOI: 10.1056/NEJMoa052256.
- Van Heerebeek I., Borbely A., Niessen H.W. et al. Myocardial structure and function differ in systolic and diastolic HF. *Circulation*. 2006;113:1966–1973. DOI: 10.1161/01.cir.0000442015.53336.12.
- Baicu C.F., Zile M.R., Aurigemma G.P., Gaasch W.H. Left ventricular systolic performance, function, and contractility in patients with diastolic heart failure. *Circulation*. 2005;111:2306–2312.
- Yip G., Wang M., Zhang Y. et al. Left ventricular long axis function in diastolic heart failure is reduced in both diastole and systole: time for a redefinition? *Heart*. 2002;87:121–125.
- Brutsaert D.L., De Keulenaer G.W. Diastolic heart failure: a myth. *Curr Opin Cardiol*. 2006;21(3):240–248.
- Ponikowski P., Voors A.A., Anker S.D. et al. 2016 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure: The Task Force for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure of the European Society of Cardiology (ESC) Developed with the special contribution of the Heart Failure Association (HFA) of the ESC. *Eur Heart J*. 2016;37(27):2129–2200.
- Pieske B. Diagnosing heart failure with preserved ejection fraction: The new HFA consensus. (Electronic resource). URL: <https://www.escardio.org/Congresses-&-Events/Heart-Failure/Congress-resources/News/diagnosing-heart-failure-with-preserved-ejection-fraction-the-new-hfa-consensus> (access date 01.02.2019).
- Flachskampf F.A. *Praxis der Echokardiographie*. 2nd ed. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag KG; 2007.
- Rademakers F.E., Bogaret J. Left Ventricular Myocardial Tagging. *Int J Cardiac Imaging*. 1997;13:233–245.
- Kheradvar A., Assadi R., Falahatpisheh A., Sengupta P.P. Assessment of transmitral vortex formation in patients with diastolic dysfunction. *J Am Soc Echocardiogr*. 2012;25(2):220–227. DOI: 10.1016/j.echo.2011.10.003.
- Mora V., Roldán I., Romero E. et al. Comprehensive assessment of left ventricular myocardial function by two-dimensional speckle-tracking echocardiography. *Cardiovasc Ultrasound*. 2018;16:16. DOI: 10.1186/s12947-018-0135-x.
- Wang J., Khoury D.S., Yue Y. et al. Preserved left ventricular twist and circumferential deformation, but depressed longitudinal and radial deformation in patients with diastolic heart failure. *Eur Heart J*. 2008;29:1283–1289. DOI: 10.1093/eurheartj/ehn141.
- Russel I.K., Götte M.J.W., Bronzwaer J.G. et al. Left ventricular torsion. An expanding role in the analysis of myocardial dysfunction. *J Am Coll Cardiol Img*. 2009;2:648–655. DOI: 10.1016/j.jcmg.2009.03.001.
- Cutri E., Serrani M., Bagnoli P. et al. The cardiac torsion as a sensitive index of heart pathology: a model study. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2010;55:104–119. DOI: 10.1016/j.jmbm.2015.10.009.
- Marcellini E., Cercenelli L., Musaico M. et al. Assessment of cardiac rotation by means of gyroscopic sensors. *Comput Int Cardiol*. 2008;35:389–392.
- Esch B.T., Warburton D.E.R. Left ventricular torsion and recoil: implications for exercise performance and cardiovascular disease. *J Appl Physiol*. 2009;106(2):362–369. DOI: 10.1152/jappphysiol.00144.2008.
- Cutri E., Bagnoli P., Marcelli E. et al. A mechanical simulator of cardiac wall kinematics. *ASAIO J*. 2010;56(3):164–171. DOI: 10.1097/MAT.0b013e3181d7db0c.
- Paulus W.J., Tschöpe C., Sanderson J.E. et al. How to diagnose diastolic heart failure: a consensus statement on the diagnosis of heart failure with normal left ventricular ejection fraction by the Heart Failure and Echocardiography Associations of the European Society of Cardiology. *Eur Heart J*. 2007;28:2539–2550.
- Westermann D., Kasner M., Steendijk P. et al. Role of left ventricular stiffness in heart failure with normal ejection fraction. *Circulation*. 2008;117(16):2051–2060.
- Lester S.J., Tajik A.J., Nishimura R.A. et al. Unlocking the mysteries of diastolic function deciphering the rosetta stone 10 years later. *J Am Coll Cardiol*. 2008;51:679–689.

- Yu C.M., Lin H., Ho P.C., Yang H. Assessment of left and right ventricular systolic and diastolic synchronicity in normal subjects by tissue Doppler echocardiography and the effects of age and heart rate. *Echocardiography*. 2003;20:19–27.
- Sanderson J.E., Wang M., Yu C.M. Tissue Doppler imaging for predicting outcome in patients with cardiovascular disease. *Curr Opin Cardiol*. 2004;19:458–463.
- Correale M., Totaro A., Riccardo I. et al. Tissue Doppler Imaging in Coronary Artery Diseases and Heart Failure. *Curr Cardiol Rev*. 2012;8(1):43–53.
- Henein M.Y., Gibson D.G. Long axis function in disease. *Heart*. 1999;81:229–231.
- Alam M., Wardell J., Andersson E., Samad B.A., Nordlander R. Effects of first myocardial infarction on left ventricular systolic and diastolic function with the use of mitral annular velocity determined by pulsed wave Doppler tissue imaging. *J Am Soc Echocardiogr*. 2000;13:343–352.
- Sanderson J.E. Heart failure with a normal ejection fraction. *Heart*. 2007;93:155–158.
- Nagueh S.F., Bachinski L.L., Meyer D. et al. Tissue Doppler imaging consistently detects myocardial abnormalities in patients with hypertrophic cardiomyopathy and provides a novel means for an early diagnosis before and independently of hypertrophy. *Circulation*. 2001;104:128–130.
- Van de Veire N.R., Yu C.M., Ajmone-Marsan N. et al. Triplane tissue Doppler imaging: a novel three-dimensional imaging modality that predicts reverse left ventricular remodelling after cardiac resynchronisation therapy. *Heart*. 2008;94(3):9.
- Kjaergaard J., Hassager C., Oh J.K. et al. Measurement of cardiac time intervals by Doppler tissue M-mode imaging of the anterior mitral leaflet. *J Am Soc Echocardiogr*. 2005;18(10):1058–1065.
- Biering-Sørensen T., Mogelvang R., Pedersen S. et al. Usefulness of the myocardial performance index determined by tissue Doppler imaging m-mode for predicting mortality in the general population. *Am J Cardiol*. 2011;107(3):478–483. DOI: 10.1016/j.amjcard.2010.09.044.
- Biering-Sørensen T., Mogelvang R., Chantal de Knecht M. et al. Cardiac Time Intervals by Tissue Doppler Imaging M-Mode: Normal Values and Association with Established Echocardiographic and Invasive Measures of Systolic and Diastolic Function. *PLoS One*. 2016;11(4):e.0153636. DOI:10.1371/journal.pone.0153636.
- Weidemann F., Jamal F., Sutherland G.R. et al. Myocardial function defined by strain rate and strain during alterations in inotropic states and heart rate. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2002;283(2):792–799. DOI: 10.1152/ajpheart.00025.2002.
- Lang R.M., Bierig M., Devereux R.B. et al. Recommendations for chamber quantification: a report from the American Society of Echocardiography's Guidelines and Standards Committee and the Chamber Quantification Writing Group, developed in conjunction with the European Association of Echocardiography, a branch of the European Society of Cardiology. *J Am Soc Echocardiogr*. 2005;18(12):1440–1463. DOI: 10.1016/j.echo.2005.10.005.
- Mogelvang R., Sogaard P., Pedersen S.A. et al. Tissue Doppler echocardiography in persons with hypertension, diabetes, or ischaemic heart disease: the Copenhagen City Heart Study. *Eur Heart J*. 2009;30(6):731–739. DOI: 10.1093/eurheartj/ehn596.
- Tekten T., Onbasili A.O., Ceyhan C. et al. Novel approach to measure myocardial performance index: pulsed-wave tissue Doppler echocardiography. *Echocardiography*. 2003;20:503–510.
- Rojo E.C., Rodrigo J.L., de Isla L.P. et al. Disagreement between tissue Doppler imaging and conventional pulsed wave Doppler in the measurement of myocardial performance index. *Eur J Echocardiogr*. 2006;7(5):356–364.
- Abuomara H.Z.A., Hassan O.M., Rashid T. Myocardial performance index as an echocardiographic predictor of early in-hospital heart failure during first acute anterior ST-elevation myocardial infarction. *Egypt Heart J*. 2018;70(2):71–75.
- Souza L.P., Campos O. Echocardiographic predictors of early in-hospital heart failure during first ST-elevation acute myocardial infarction: does myocardial performance index and left atrial volume improve diagnosis over conventional parameters of left ventricular function? *Cardiovasc Ultrasound*. 2011;9:17.
- Yuasa T., Otsuji Y., Kuwahara E. Noninvasive prediction of complications with anteroseptal acute myocardial infarction by left ventricular Tei index. *J Am Soc Echocardiogr*. 2005;18:20–25.
- Xie G.Y., Berk M.R., Smith M.D. et al. Prognostic value of Doppler transmitral flow patterns in patients with congestive heart failure. *J Am Coll Cardiol*. 1994;24:132–139.
- Wang M., Yip G., Yu C.M. et al. Independent and incremental prognostic value of early mitral annular velocity in patients with impaired left ventricular systolic function. *J Am Coll Cardiol*. 2005;45:272–277.
- Richartz B.M., Werner G.S., Ferrari M., Figulla H.R. Comparison of left ventricular systolic and diastolic function in patients with idiopathic dilated cardiomyopathy and mild heart failure versus those with severe heart failure. *Am J Cardiol*. 2002;90:390–394.
- Paulus W.J., Tschöpe C., Sanderson J.E. et al. How to diagnose diastolic heart failure: a consensus statement on the diagnosis of heart failure with normal left ventricular ejection fraction by the Heart Failure and Echocardiography Associations of the European Society of Cardiology. *Eur Heart J*. 2007;28:2539–2550.
- Yu C.M., Sanderson J.E., Marwick T.H., Oh J.K. Tissue Doppler imaging: a new prognosticator for cardiovascular diseases. *J Am Coll Cardiol*. 2007;49:1903–1914.
- Wang M., Yip G.W., Wang A.Y. et al. Peak early diastolic mitral annulus velocity by tissue Doppler imaging adds independent and incremental prognostic value. *J Am Coll Cardiol*. 2003;41:820–826.
- Yamamoto T., Oki T., Yamada H. et al. Prognostic value of the atrial systolic mitral annular motion velocity in patients with left ventricular systolic dysfunction. *J Am Soc Echocardiogr*. 2003;16:333–339.
- Mondillo S., Galderisi M., Mele D. et al. Echocardiography study group of the Italian society of C. Speckle tracking echocardiography: a new technique for assessing myocardial function. *J Ultrasound Med*. 2011;30:71–83. DOI: 10.7863/jum.2011.30.1.71.

Полный список литературы Вы можете найти на сайте <http://www.rmj.ru>