

Васюк Ю. А., Несветов В. В., Ющук Е. Н., Щербак М. М.

ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова»  
Минздрава России, Москва, Россия

## КЛИНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ В ПРИМЕНЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЭХОКАРДИОГРАФИИ

Ключевые слова: эхокардиография, систолическая функция, speckle tracking, продольная глобальная деформация левого желудочка.

Ссылка для цитирования: Васюк Ю. А., Несветов В. В., Ющук Е. Н., Щербак М. М. Клинические возможности и ограничения в применении современных технологий в эхокардиографии. Кардиология. 2019;59(7):68–75.

### РЕЗЮМЕ

Трансторакальная эхокардиография (ЭхоКГ) – наиболее часто используемый метод для выявления нарушений сократимости левого желудочка (ЛЖ). В большинстве случаев оценка сократимости проводится визуально, «на глаз», что увеличивает ее субъективность, зависит от опыта и квалификации исследователя и требует высокого уровня его клинической подготовки. В настоящее время в арсенале специалиста по ЭхоКГ для количественной оценки сократимости ЛЖ иногда используется тканевая доплер-ЭхоКГ, однако этот метод требует специальных настроек изображения (высокая частота смены кадров, выделение зон интереса), зависит от угла сканирования, квалификации исследователя, обладает высокой внутри- и межисследовательской вариабельностью, а также существенно увеличивает продолжительность исследования, поэтому данный метод не получил широкого клинического применения. В 2000-х годах появилась инновационная технология speckle tracking (оценка деформации по двумерному изображению), которая в отличие от тканевой доплер-ЭхоКГ не обременяет исследователя временными затратами, обладает низкой внутри- и межисследовательской вариабельностью, не зависит от угла сканирования и позволяет оценивать показатели сократимости миокарда. В последние годы эта технология активно внедряется в клиническую практику для выявления субклинических нарушений функционального состояния миокарда при различных заболеваниях и синдромах: артериальной гипертензии, ишемической болезни сердца, клапанных пороках и врожденных заболеваниях сердца, хронической сердечной недостаточности, кардиомиопатиях различной этиологии.

Vasyuk Yu. A., Nesvetov V. V., Yushuk E. N., Scherbak M. M.

A. I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Moscow, Russia

## CLINICAL CAPABILITIES AND LIMITATIONS IN THE USE OF MODERN TECHNOLOGIES IN ECHOCARDIOGRAPHY

Keywords: echocardiography; systolic function; speckle tracking; global left ventricular longitudinal strain.

For citation: Vasyuk Yu. A., Nesvetov V. V., Yushuk E. N., Scherbak M. M. *Clinical Capabilities and Limitations in the Use of Modern Technologies in Echocardiography*. 2019;59(7):68–75.

### SUMMARY

Transthoracic echocardiography is the most frequently used method for detection of impaired contractility of the left ventricle. In most cases, assessment of contractility is carried out visually “by eye”, what increases its subjectivity, is operator-dependent in nature and requires a high level of clinical training and experience of the researcher. Currently in the arsenal of a specialist in echocardiography for quantification of left ventricular contractility sometimes is used tissue Doppler echocardiography, however, this method requires special settings of the image (high frame rate, the allocation of zones of interest), depends on the scanning angle and on operator qualification, has high intra – and inter-operator variability, and significantly increases the duration of the study. Therefore, this method has not received wide clinical application. In the 2000s years an innovative technique of speckle tracking emerged, which, unlike tissue Doppler echocardiography is efficient, does not burden a researcher with time costs, has a low intra – and inter- operator variability, does not depend on scan angle. In recent years, this technology is actively implemented in clinical practice for detection of subclinical impairment of the functional state of the myocardium in different diseases and syndromes: arterial hypertension, ischemic heart disease, valvular defects, and congenital heart disease, heart failure, cardiomyopathy of different etiology.

Information about the corresponding author: Nesvetov Valeriy V. – PhD, assistant. E-mail: mr.nesvetov@mail.ru

Как известно, сердце осуществляет непрерывную циклическую механическую работу для обеспечения циркуляции крови в сердечно-сосудистой системе. Насосная

функция сердца зависит главным образом от эффективности сокращения кардиомиоцитов, однако геометрическая форма желудочков, состояние клапанного аппарата сердца

и сосудистая резистентность, а также величина преднагрузки на сердце очень важны, и являются взаимозависимыми факторами, определяющими эффективность его работы. При полноценном сокращении миокарда основные его функциональные элементы – кардиомиоциты, сокращаются почти на 15% от их начальной длины, в результате чего происходит утолщение стенок левого желудочка (ЛЖ) на 35–40% и уменьшение их объема на 55–65% [1].

Сокращение кардиомиоцитов приводит к изменению формы камер сердца и возникновению механической силы, обеспечивающей изгнание крови из желудочков в магистральные сосуды, несмотря на периферическое сопротивление в них. Ультразвуковое исследование сердца позволяет неинвазивно получить информацию о функциональном состоянии миокарда, в том числе сформировать представление об изменении формы желудочков сердца, внутрисердечной гемодинамике, величине фракции выброса (ФВ) ЛЖ и других параметрах локальной систолической функции, а также о направлении, скорости и характере внутрисердечного кровотока. В настоящее время «золотым стандартом» диагностики, а также количественной оценки глобальной и сегментарной сократимости желудочков на всех уровнях и выявления систолической дисфункции миокарда является магнитно-резонансная томография (МРТ) [2, 3].

Появление новых ультразвуковых технологий, таких как speckle tracking, позволило не только расширить возможности эхокардиографии (ЭхоКГ) в оценке структурных изменений, но и анализировать механику миокарда. Это дало возможность получить новые параметры, позволяющие гораздо более точно оценивать функциональное состояние миокарда, учитывая его сложное строение, разнонаправленную ориентацию мышечных волокон в разных слоях миокарда. Технология speckle tracking позволяет определять скорость движения миокарда при помощи отслеживания перемещения во время систолы так называемых пятнистых структур, или пикселей, представляющих собой естественные акустические маркеры, расположенные в миокарде. Усовершенствованная методика расчета позволяет проводить одновременный контроль как скорости, так и направления движения всех сегментов ЛЖ, а также оценивать изменения в процессе этого движения во время всех фаз сердечного цикла [2, 3].

### **Проведение анализа деформации миокарда по двумерному изображению**

Для анализа функции ЛЖ с помощью технологии speckle tracking необходимы оптимальные двумерные изображения, включающие апикальные двух-, трех- и четырехкамерные позиции. Для наиболее точного и плавного отслеживания движения отдельных пикселей следует использовать максимально возможную частоту кадров

(большинство авторов рекомендуют частоту кадров более 60 кадров/с, а в случае тахикардии – еще более высокую частоту, что требует использования минимального сектора локации зоны интереса – всего лишь немного шире исследуемой структуры [4–7]). Для оптимальной визуализации эпикарда и эндокарда требуется также устранение всех артефактов изображения, которые могут имитировать реальные пятнистые структуры (пиксели) и мешать анализу их движения [8, 9]. Наконец, следует достичь максимальной устойчивости положения исследуемой структуры внутри сектора локации, чтобы избежать «потери» ее фрагментов из-за смещения сердца относительно стенок грудной клетки. Область интереса выбирается на зарегистрированном изображении с помощью специального курсора, которым максимально точно очерчиваются границы эндокарда и эпикарда, стенки ЛЖ и межжелудочковой перегородки, исключая перикард из исследуемой области. После утверждения выбранных границ исследуемого участка система автоматически делит участок на 6 сегментов, соответствующих сегментам ЛЖ, и проводит их автоматический анализ. Полученные результаты обычно представлены в виде линейных графиков, отражающих параметры движения отдельных сегментов (график для каждого сегмента представлен разным цветом), и двумерных цветных карт движения, наложенных на основное изображение, двумерных диаграмм, отражающих движение всех сегментов ЛЖ, и, наконец, многочисленных числовых значений отдельных оцениваемых параметров [8–11].

При суммарном анализе отдельных сегментов ЛЖ эту методику также можно использовать для расчета его ФВ и ударного объема. Сегменты, движение которых не удалось полноценно проследить, исключаются из анализа, результаты которого отображаются в виде соответствующих графиков. Это позволяет вручную корректировать границы интересующего региона или отклонять неадекватно визуализируемые его фрагменты и пересматривать ту же зону интереса в случае невозможности достичь надлежащего качества результатов. Продолжая дальнейшую обработку полученных результатов, можно оценить пространственные различия в кинетике отдельных зон миокарда, которые используются в диагностике сегментарной систолической дисфункции или систолической асинхронии при различных заболеваниях, не связанных с очаговым повреждением миокарда, например, у пациентов после операций при врожденных пороках сердца. ЭхоКГ с использованием методики speckle tracking является относительно новым способом визуализации, используемым в кардиологии для оценки деформации (strain) миокарда, под которой понимается изменение длины изучаемого сегмента, либо всего ЛЖ (глобальная деформация) в процентах от исходного значения. Кроме того, данная технология позволяет определить скорость

деформации (strain rate) – т. е. время, в течение которого происходит деформация [12].

Интерпретация данного исследования практически не зависит от угла, под которым лоцируется тот или иной сегмент ЛЖ. Технология speckle tracking лишена ограничений, возникающих при измерении деформации миокарда с помощью тканевой доплерографии [13].

Развитие указанной методики и ее внедрение в клиническую практику обеспечили возможность комплексной количественной оценки систолической функции ЛЖ при различных заболеваниях миокарда [12]. Наличие характерных изменений кривых на графиках в динамике, в процессе повторного анализа с использованием технологии speckle tracking при различных заболеваниях, таких как ишемическая болезнь сердца (ИБС), артериальная и системная легочная гипертензия, кардиомиопатии (КМП), хроническая сердечная недостаточность (ХСН) и др., позволяет оценивать эффективность лечения [12]. Однако наибольшее клиническое применение глобальная продольная деформация (ПД) ЛЖ по данным технологии speckle tracking получила при оценке его систолической функции, количественные значения которой можно использовать как альтернативу ФВ ЛЖ.

Так, в исследовании К. Takigiku и соавт. были обследованы 817 здоровых лиц на ультразвуковых диагностических системах трех разных производителей с установленным на них программным обеспечением, позволяющим проводить оценку глобальной ПД ЛЖ по двумерному изображению. Нормальные значения для показателя глобальной ПД ЛЖ составили  $-18,9 \pm 2,5\%$  [14].

### **Клиническое применение инновационной технологии speckle tracking**

Использование инновационной технологии speckle tracking позволяет получить многогранное представление о систолической и диастолической функции миокарда при различных физиологических и патологических состояниях, значительно расширяя диагностические возможности используемых до сих пор методов. Например, ФВ ЛЖ, рассчитанная на основе анализа продольных деформационных компонентов, продемонстрировала хорошую корреляцию с другими методами. Использование технологии speckle tracking позволяет провести количественный анализ сократимости отдельных сегментов ЛЖ для выявления ранней систолической дисфункции ЛЖ в доклинической стадии заболевания, когда ФВ ЛЖ еще сохранена [15].

### **Артериальная гипертензия**

Постепенное ухудшение продольных и радиальных деформационных компонентов с сохранением нормальных циркулярных и скручивающих показателей ЛЖ, кото-

рые позволяют компенсировать и поддерживать его нормальную глобальную систолическую функцию, наблюдается при артериальной гипертензии и прогрессирующей концентрической гипертрофии ЛЖ. Использование технологии speckle tracking позволяет зафиксировать последовательность этих изменений в нарушении механической функции ЛЖ в период, предшествующий возникновению значительной систолической дисфункции [16, 17].

### **Ишемическая болезнь сердца**

Снижение глобальной ПД ЛЖ наблюдается у пациентов с ИБС еще до сегментарных нарушений сократимости миокарда; при этом снижение глобальной ПД ЛЖ является неблагоприятным прогностическим фактором развития ишемической КМП. Показана также корреляция между снижением глобальной ПД ЛЖ, уровнем индикаторных ферментов и размером некроза у больных в острой фазе инфаркта миокарда (ИМ). Снижение глобальной ПД ЛЖ в начале и после реперфузии миокарда также оказалось неблагоприятным прогностическим фактором постинфарктного ремоделирования, развития ХСН и смерти. Наконец, было показано, что глобальная ПД ЛЖ коррелирует с размером некроза (при нетрансмуральном ИМ – с количеством вовлеченных сегментов, протяженностью постинфарктного рубца), оцениваемым с помощью МРТ. Определены значения отдельных компонентов деформации миокарда, указывающие на улучшение функции миокарда после его реваскуляризации. Кроме того, выявлены типы постсистолического движения миокарда (после закрытия аортального клапана), характеризующиеся ишемической региональной систолической дисфункцией миокарда [18–22].

### **Клапанные пороки сердца**

Незначительное увеличение глобальной ПД сегментов ЛЖ при проведении нагрузочной ЭхоКГ у пациентов с бессимптомной митральной регургитацией оказалось неблагоприятным прогностическим фактором, ассоциированным с развитием послеоперационной дисфункции миокарда [23, 24].

В исследовании E. Salaun и соавт. при использовании технологии speckle tracking продемонстрирована ее прогностическая ценность и возможности стратификации риска у больных с аортальным стенозом (АС). Было показано, что снижение глобальной деформации из четырехкамерной апикальной позиции является прогностически неблагоприятным фактором [25].

На фоне АС происходят ранние доклинические изменения миокарда, влияющие на систолическую функцию ЛЖ, при этом ФВ как интегральный показатель систолической функции ЛЖ может оставаться в пределах нормы. Ng АСТ и соавт. продемонстрировали возможность применения

технологии speckle tracking в оценке риска смерти больных, а также для определения оптимального времени замены аортального клапана с учетом показателей глобальной ПД [26].

### **ХСН**

Показано постепенное снижение глобальной ПД ЛЖ наряду с нарастанием тяжести ХСН. Нарушение циркулярной и радиальной деформации ЛЖ обычно наблюдается на более поздних стадиях ее развития – у пациентов с ХСН III–IV функционального класса по классификации NYHA [27, 28]. Кроме того, отмечается значительное нарушение показателей, характеризующих скручивание ЛЖ при ХСН.

Несмотря на то что в начальной стадии ХСН не наблюдается снижения диапазона скручивания, задержка в начале раскручивания происходит уже на самом раннем этапе ее развития, что наиболее выражено проявляется при физической нагрузке [29, 30]. Не вполне понятно, является ли увеличение параметров скручивания на начальных стадиях диастолической ХСН механизмом, компенсирующим нарушение релаксации, или следствием снижения наполнения желудочков при ранней стадии диастолической дисфункции. Показано, что глобальный круговой компонент служит прогностическим фактором риска развития сердечно-сосудистых осложнений у пациентов с ХСН и сниженной ФВ ЛЖ [31]. Кроме того, было отмечено, что снижение глобальной ПД ЛЖ является более ранним неблагоприятным прогностическим маркером ХСН в сравнении с ФВ ЛЖ [32].

Согласно данным литературы, существуют различные мнения относительно возможностей оценки диастолической функции ЛЖ при ХСН с сохраненной ФВ ЛЖ с помощью технологии speckle-tracking. Однако большинство авторов сходятся во мнении, что методика позволяет выявлять ранние, субклинические нарушения диастолической функции ЛЖ, но данный вопрос требует дальнейшего изучения [33, 34].

### **Желудочковая диссинхрония**

Явление, связанное с потерей соответствующей последовательности сокращения желудочков, а также отдельных их зон, называемое диссинхронией, часто возникает у пациентов с ХСН и считается индикатором выраженного прогрессирования заболевания и плохого прогноза. В случае стимуляции левой ножки пучка Гиса, правожелудочковой стимуляции или стимуляции межжелудочковой перегородки в результате одновременного вытягивания свободных, нестимулированных стенок ЛЖ, снижается как продолжительность диастолы, так и пиковая скорость нарастания давления в нем ( $DP/dt_{max}$ ) в фазу изоволюмического сокращения. Замедленное расслабление боковой стенки ЛЖ распределяет напряжение, генериру-

емое в пределах расслабленной перегородки, тем самым уменьшая сердечный выброс. Несинхронное сокращение сосочковых мышц может дополнительно увеличить дисфункцию ЛЖ за счет развития митральной регургитации. Диссинхронное расслабление увеличивает изоволюмическое сокращение, и, следовательно, дополнительно уменьшает наполнение ЛЖ. Существует несколько методов ЭхоКГ-визуализации диссинхронии ЛЖ (м-режим, speckle tracking, тканевая доплерография и использование трехмерной ЭхоКГ) [8, 35].

Одной из основных диагностических задач является установление показаний к проведению ресинхронизирующей терапии (РТ) и прогнозирование ее эффективности. В настоящее время показания к РТ основаны на наличии выраженной систолической дисфункции ЛЖ (ФВ ЛЖ <35%), блокады левой ножки пучка Гиса и продолжительности QRS на электрокардиограмме >130 мс. Однако, несмотря на применение перечисленных показаний к РТ, нередко пациенты, получившие РТ, не реагируют на проводимое лечение, т.е. у них отсутствует улучшение систолической функции ЛЖ, что указывает на необходимость разработки более качественных квалификационных критериев. Технология speckle tracking позволяет оценить отдельные периоды сердечного цикла и их дифференциацию в различных регионах желудочков, и это, в частности, позволяет продемонстрировать, что существует значительная разница между активацией базального сегмента свободной правой стенки желудочка и последним стимулированным правым сегментом желудочка [35–37].

### **Кардиомиопатии**

У пациентов с гипертрофической КМП с сохраненной ФВ ЛЖ наблюдается характерное нарушение всех компонентов сократимости ЛЖ. Поэтому метод используется для дифференциации между КМП и «спортивным сердцем», а также для мониторинга течения заболевания [38, 39]. Характерные изменения наблюдаются также у больных с другими формами КМП [40] и некомпактного миокарда [41].

В ряде исследований показано, что данная технология позволяет диагностировать раннюю субклиническую систолическую дисфункцию ЛЖ [42–47], в том числе непосредственно на фоне противоопухолевой терапии [46, 48, 49].

Так, в исследовании Н. Sawaya и соавт. (2012 г.), в которое были включены больные раком молочной железы, было показано, что снижение глобальной ПД ЛЖ менее –19% после терапии антрациклинами является независимым предиктором развития систолической дисфункции у пациенток, которым был назначен трастузумаб [49]. Той же группой исследователей была показана

высокая прогностическая ценность глобальной ПД ЛЖ в развитии антрациклиновой кардиотоксичности у больных раком молочной железы, которые получали антрациклины в комбинации с трастузумабом. Снижение глобальной ПД ЛЖ более чем на 10% от исходного уровня обладало 93% негативной прогностической ценностью, а в сочетании с оценкой уровня высокочувствительного тропонина I прогностическая ценность отрицательного результата теста увеличивалась до 97%. При этом ранние проявления кардиотоксичности не отражались на ФВ ЛЖ [50]. По мнению ряда авторов, выявление субклинической систолической дисфункции миокарда ассоциируется с уменьшением глобальной ПД ЛЖ более чем на 11% в сравнении с исходной величиной [51, 52]. В исследовании M. Toufan и соавт. (2017 г.) у 13% пациентов, больных раком молочной железы, произошло достоверное уменьшение глобальной ПД на 15% от исходной, в то время как ФВ ЛЖ достоверно не менялась [53].

A. Boyd и соавт. опубликовали результаты анализа данных 140 пациенток, которым проводили полихимиотерапию, включающую антрациклины. Авторами было показано, что субклиническая систолическая дисфункция ЛЖ развилась у 22% пациенток (снижение показателя на 11% и более от исходного уровня), в то время как ФВ ЛЖ снизилась всего лишь на 1% от исходной [54].

Q. Tang и соавт. в 2017 г. опубликовали результаты исследования, в котором участвовали 86 пациенток, больных раком молочной железы, получавших лечение антрациклинами. Критериями кардиотоксичности служили снижение ФВ ЛЖ менее 53%, либо снижение глобальной ПД ЛЖ на 10% от исходных значений. В исследовании было показано, что снижение глобальной ПД на 13,8% от исходной величины было самым сильным индикатором развития кардиотоксичности (чувствительность 93%, специфичность 84%) [55].

### **Миокардиты**

Среди всей популяции пациентов с миокардитами около 30% имеют сохраненную ФВ ЛЖ. «Золотым стандартом» в диагностике миокардита является МРТ сердца, однако с появлением современных технологий ЭхоКГ (speckle tracking) при оценке деформации ЛЖ по двумерному изображению появилась возможность диагностировать повреждение сердца у больных миокардитом, несмотря на сохраненную ФВ ЛЖ. Так, в исследовании M. Kasner и соавт., в котором приняли участие 67 больных хроническим миокардитом с сохраненной ФВ ЛЖ, продемонстрированы высокая чувствительность – 82% и специфичность – 70% данной технологии [56].

В другом исследовании M. Leitman и соавт. была продемонстрирована диагностическая ценность технологии speckle tracking у больных острым миокардитом, показа-

но, что данная технология не уступает по чувствительности и специфичности в диагностике этого заболевания МРТ сердца [57]. Кроме того, продемонстрированы возможности технологии speckle tracking в диагностике волчаночного миокардита [58].

### **Фибрилляция предсердий (ФП)**

Самая распространенная форма нарушений ритма [59, 60]. Наличие ФП у пациентов ассоциировано с ухудшением качества жизни, развитием симптомов ХСН и высоким риском развития тромбоэмболических осложнений, включая инсульт или транзиторную ишемическую атаку [61, 62].

ФП приводит к фиброзу и ремоделированию предсердий. Структурное ремоделирование предсердий при ФП проявляется более низкими скоростными показателями движения миокарда и снижением его сократимости, а также увеличением полостей сердца [63, 64]. Сократительная дисфункция предсердий при аритмии приводит к снижению скорости кровотока и способствует образованию тромбов [65]. Чаще всего тромбы формируются в ушке левого предсердия (ЛП) [61].

В ряде исследований показаны эффективность и клиническая значимость применения технологии speckle tracking для оценки функционального состояния ЛП у пациентов с синусовым ритмом [66, 67] и ФП [68]. Показано, что оценка деформации ЛП имеет дополнительное значение для стратификации риска эмболии и смерти после инсульта [68]. В исследовании K. Kurczynska также показана прогностическая ценность технологии speckle tracking в образовании тромбов в ушке ЛП [69].

Бессимптомная пароксизмальная ФП часто считается причиной криптогенных ишемических инсультов и ТИА. Технология speckle tracking в диагностике пароксизмальной ФП у пациентов с ишемическим инсультом и ТИА имеет высокую прогностическую ценность [70].

### **Ограничения метода**

Наличие диагностических систем для проведения ультразвукового исследования сердца с помощью технологии speckle tracking, изготовленных различными производителями, и невозможность прямого сравнения результатов, полученных на различных приборах, представляет существенное ограничение метода. Это также является одним из ограничений в разработке стандартов для оценки различных физиологических состояний миокарда.

Кроме того, такие артефакты, как акустические тени или реверберации, могут имитировать или искажать изображение акустических пятен (пикселей) и, таким образом, приводить к недооценке фактической степени деформации.

Алгоритмы трассировки, используемые диагностической системой, могут сглаживать изображения, и используемые при этом по умолчанию параметры могут быть расценены как проявление нормальной функции желудочков, что также может привести к ошибочной оценке региональной систолической функции или повлиять на изменение в соседних сегментах анализируемой камеры сердца.

Еще одно из ограничений метода связано с движением изображения в плоскости ультразвукового сигнала. Оценка глобальной ПД соответствующей камеры сердца может оказаться некорректной, если из анализа исключить слишком много сегментов из-за недостаточного качества изображения. Это особенно важно в случае нарушения локальной сократимости [13].

## Заключение

Технология speckle tracking является современным высокоинформативным инновационным методом коли-

чественной оценки функции миокарда, позволяющим выявлять ранние доклинические нарушения функционального состояния миокарда, а также объективизировать оценку эффективности терапии и определять прогноз при различных сердечно-сосудистых заболеваниях. Простота применения и низкая вариабельность полученных данных способствовали широкому применению данной технологии за рубежом.

Вместе с тем по сравнению с двухмерной (2D) трехмерная (3D) эхокардиография и оценка деформации миокарда с использованием технологии speckle tracking дают возможность провести оценку систолической и диастолической функции миокарда с более высокой точностью и лучшей воспроизводимостью, в меньшей степени зависящей от квалификации исследователя, что позволяет рассматривать ее как следующую ступень развития speckle tracking-эхокардиографии и избежать ряда ограничений двухмерного сканирования [71].

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Buckberg GD, Hoffman JIE, Coghlan HC, Nanda NC. Ventricular structure–function relations in health and disease: Part I. The normal heart. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2015;47(4):587–601. DOI: 10.1093/ejcts/ezu278
- Mor-Avi V, Lang RM, Badano LP, Belohlavek M, Cardim NM, Derumeaux G et al. Current and evolving echocardiographic techniques for the quantitative evaluation of cardiac mechanics: ASE/EAE consensus statement on methodology and indications endorsed by the Japanese Society of Echocardiography. *Journal of the American Society of Echocardiography: Official Publication of the American Society of Echocardiography*. 2011;24(3):277–313. DOI: 10.1016/j.echo.2011.01.015
- Voigt J-U, Pedrizzetti G, Lysyansky P, Marwick TH, Houle H, Baumann R et al. Definitions for a Common Standard for 2D Speckle Tracking Echocardiography: Consensus Document of the EACVI/ASE/Industry Task Force to Standardize Deformation Imaging. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2015;28(2):183–93. DOI: 10.1016/j.echo.2014.11.003
- Pirat B, Khoury DS, Hartley CJ, Tiller L, Rao L, Schulz DG et al. A Novel Feature-Tracking Echocardiographic Method for the Quantitation of Regional Myocardial Function. *Journal of the American College of Cardiology*. 2008;51(6):651–9. DOI: 10.1016/j.jacc.2007.10.029
- Marwick TH, Leano RL, Brown J, Sun J-P, Hoffmann R, Lysyansky P et al. Myocardial strain measurement with 2-dimensional speckle-tracking echocardiography: definition of normal range. *JACC. Cardiovascular imaging*. 2009;2(1):80–4. DOI: 10.1016/j.jcmg.2007.12.007
- Manoel A, Dawson D, Smith B, Nihoyannopoulos P. Assessment of left ventricular function by different speckle-tracking software. *European Journal of Echocardiography*. 2010;11(5):417–21. DOI: 10.1093/ejehocardi/jep226
- Brown J, Jenkins C, Marwick TH. Use of myocardial strain to assess global left ventricular function: A comparison with cardiac magnetic resonance and 3-dimensional echocardiography. *American Heart Journal*. 2009;157(1):102.e1–102.e5. DOI: 10.1016/j.ahj.2008.08.032
- Collier P, Phelan D, Klein A. A Test in Context: Myocardial Strain Measured by Speckle-Tracking Echocardiography. *Journal of the American College of Cardiology*. 2017;69(8):1043–56. DOI: 10.1016/j.jacc.2016.12.012
- Korinek J, Kjaergaard J, Sengupta PP, Yoshifuku S, McMahon EM, Cha SS et al. High Spatial Resolution Speckle Tracking Improves Accuracy of 2-Dimensional Strain Measurements: An Update on a New Method in Functional Echocardiography. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2007;20(2):165–70. DOI: 10.1016/j.echo.2006.08.031
- Leitman M, Lysyansky P, Sidenko S, Shir V, Peleg E, Binenbaum M et al. Two-dimensional strain—a novel software for real-time quantitative echocardiographic assessment of myocardial function. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2004;17(10):1021–9. DOI: 10.1016/j.echo.2004.06.019
- Amzulescu MS, De Craene M, Langet H, Pasquet A, Vancraeynest D, Pouleur AC et al. Myocardial strain imaging: review of general principles, validation, and sources of discrepancies. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*. 2019;pii: jez041. DOI: 10.1093/ehjci/jez041
- Mądry W, Karolczak MA. Physiological basis in the assessment of myocardial mechanics using speckle-tracking echocardiography 2D. Part II. *Journal of Ultrasonography*. 2016;16(66):304–16. DOI: 10.15557/JoU.2016.0031
- Mądry W, Karolczak MA. Physiological basis in the assessment of myocardial mechanics using speckle-tracking echocardiography 2D. Part I. *Journal of Ultrasonography*. 2016;16(65):135–44. DOI: 10.15557/JoU.2016.0015
- Takigiku K, Takeuchi M, Izumi C, Yuda S, Sakata K, Ohte N et al. Normal range of left ventricular 2-dimensional strain: Japanese Ultrasound Speckle Tracking of the Left Ventricle (JUSTICE) study. *Circulation Journal: Official Journal of the Japanese Circulation Society*. 2012;76(11):2623–32. PMID: 22813873
- Edwardsen T, Helle-Valle T, Smiseth OA. Systolic Dysfunction in Heart Failure with Normal Ejection Fraction: Speckle-Tracking Echocardiography. *Progress in Cardiovascular Diseases*. 2006;49(3):207–14. DOI: 10.1016/j.pcad.2006.08.008
- de Simone G, Devereux RB, Roman MJ, Ganau A, Saba PS, Alderman MH et al. Assessment of left ventricular function by the midwall fractional shortening/end-systolic stress relation in human hypertension. *Journal of the American College of Cardiology*. 1994;23(6):1444–51. PMID: 8176105
- Wang J, Khoury DS, Yue Y, Torre-Amione G, Nagueh SF. Preserved left ventricular twist and circumferential deformation, but depressed longitudinal and radial deformation in patients with diastolic heart

- failure. *European Heart Journal*. 2008;29(10):1283–9. DOI: 10.1093/eurheartj/ehn141
18. Choi J-O, Cho SW, Song YB, Cho SJ, Song BG, Lee S-C et al. Longitudinal 2D strain at rest predicts the presence of left main and three vessel coronary artery disease in patients without regional wall motion abnormality. *European Journal of Echocardiography*. 2009;10(5):695–701. DOI: 10.1093/ejehocardiography/epj041
  19. Sjøli B, Ørn S, Grenne B, Ihlen H, Edvardsen T, Brunvand H. Diagnostic Capability and Reproducibility of Strain by Doppler and by Speckle Tracking in Patients With Acute Myocardial Infarction. *JACC: Cardiovascular Imaging*. 2009;2(1):24–33. DOI: 10.1016/j.jcmg.2008.10.007
  20. Park YH, Kang S-J, Song J-K, Lee EY, Song J-M, Kang D-H et al. Prognostic Value of Longitudinal Strain After Primary Reperfusion Therapy in Patients with Anterior-wall Acute Myocardial Infarction. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2008;21(3):262–7. DOI: 10.1016/j.echo.2007.08.026
  21. Becker M, Lenzen A, Ocklenburg C, Stempel K, Kühl H, Neizel M et al. Myocardial Deformation Imaging Based on Ultrasonic Pixel Tracking to Identify Reversible Myocardial Dysfunction. *Journal of the American College of Cardiology*. 2008;51(15):1473–81. DOI: 10.1016/j.jacc.2007.10.066
  22. Voigt J. Comparison of deformation imaging and velocity imaging for detecting regional inducible ischaemia during dobutamine stress echocardiography. *European Heart Journal*. 2004;25(17):1517–25. DOI: 10.1016/j.ehj.2004.05.014
  23. Moonen M, Lancellotti P, Zacharakis D, Pierard L. The Value of 2D Strain Imaging during Stress Testing. *Echocardiography*. 2009;26(3):307–14. DOI: 10.1111/j.1540-8175.2008.00864.x
  24. Lancellotti P, Cosyns B, Zacharakis D, Attena E, Van Camp G, Gach O et al. Importance of Left Ventricular Longitudinal Function and Functional Reserve in Patients With Degenerative Mitral Regurgitation: Assessment by Two-Dimensional Speckle Tracking. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2008;21(12):1331–6. DOI: 10.1016/j.echo.2008.09.023
  25. Salaun E, Casalta A-C, Donal E, Bohbot Y, Galli E, Tribouilloy C et al. Apical four-chamber longitudinal left ventricular strain in patients with aortic stenosis and preserved left ventricular ejection fraction: analysis related with flow/gradient pattern and association with outcome. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*. 2018;19(8):868–78. DOI: 10.1093/ehjci/jex203
  26. Ng ACT, Prihadi EA, Antoni ML, Bertini M, Ewe SH, Ajmone Marsan N et al. Left ventricular global longitudinal strain is predictive of all-cause mortality independent of aortic stenosis severity and ejection fraction. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*. 2018;19(8):859–67. DOI: 10.1093/ehjci/jex189
  27. Kosmala W, Plaksej R, Strotmann JM, Weigel C, Herrmann S, Niemann M et al. Progression of Left Ventricular Functional Abnormalities in Hypertensive Patients with Heart Failure: An Ultrasonic Two-Dimensional Speckle Tracking Study. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2008;21(12):1309–17. DOI: 10.1016/j.echo.2008.10.006
  28. Liu Y-W, Tsai W-C, Su C-T, Lin C-C, Chen J-H. Evidence of Left Ventricular Systolic Dysfunction Detected by Automated Function Imaging in Patients With Heart Failure and Preserved Left Ventricular Ejection Fraction. *Journal of Cardiac Failure*. 2009;15(9):782–9. DOI: 10.1016/j.cardfail.2009.05.006
  29. Park S-J, Miyazaki C, Bruce CJ, Ommen S, Miller FA, Oh JK. Left Ventricular Torsion by Two-Dimensional Speckle Tracking Echocardiography in Patients with Diastolic Dysfunction and Normal Ejection Fraction. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2008;21(10):1129–37. DOI: 10.1016/j.echo.2008.04.002
  30. Wang J, Khoury DS, Yue Y, Torre-Amione G, Nagueh SF. Left Ventricular Untwisting Rate by Speckle Tracking Echocardiography. *Circulation*. 2007;116(22):2580–6. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.706770
  31. Cho G-Y, Marwick TH, Kim H-S, Kim M-K, Hong K-S, Oh D-J. Global 2-dimensional strain as a new prognosticator in patients with heart failure. *Journal of the American College of Cardiology*. 2009;54(7):618–24. DOI: 10.1016/j.jacc.2009.04.061
  32. Stanton T, Leano R, Marwick TH. Prediction of all-cause mortality from global longitudinal speckle strain: comparison with ejection fraction and wall motion scoring. *Circulation: Cardiovascular Imaging*. 2009;2(5):356–64. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.109.862334
  33. Wang J, Khoury DS, Thohan V, Torre-Amione G, Nagueh SF. Global Diastolic Strain Rate for the Assessment of Left Ventricular Relaxation and Filling Pressures. *Circulation*. 2007;115(11):1376–83. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.106.662882
  34. Sakurai D, Asanuma T, Masuda K, Koriyama H, Nakatani S. New Parameter Derived from Three-Dimensional Speckle-Tracking Echocardiography for the Estimation of Left Ventricular Filling Pressure in Nondilated Hearts. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2017;30(5):522–31. DOI: 10.1016/j.echo.2017.01.015
  35. Chung ES, Leon AR, Tavazzi L, Sun J-P, Nihoyannopoulos P, Merlino J et al. Results of the Predictors of Response to CRT (PROSPECT) Trial. *Circulation*. 2008;117(20):2608–16. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.743120
  36. Tanaka H, Hara H, Saba S, Gorcsan J. Prediction of Response to Cardiac Resynchronization Therapy by Speckle Tracking Echocardiography Using Different Software Approaches. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2009;22(6):677–84. DOI: 10.1016/j.echo.2009.03.007
  37. Nesser H-J, Winter S. Speckle Tracking in the Evaluation of Left Ventricular Dyssynchrony. *Echocardiography*. 2009;26(3):324–36. DOI: 10.1111/j.1540-8175.2008.00866.x
  38. Stefani L, Pedrizzetti G, De Luca A, Mercuri R, Innocenti G, Galanti G. Real-time evaluation of longitudinal peak systolic strain (speckle tracking measurement) in left and right ventricles of athletes. *Cardiovascular Ultrasound*. 2009;7(1):17. DOI: 10.1186/1476-7120-7-17
  39. Richand V, Lafitte S, Reant P, Serri K, Lafitte M, Brette S et al. An Ultrasound Speckle Tracking (Two-Dimensional Strain) Analysis of Myocardial Deformation in Professional Soccer Players Compared With Healthy Subjects and Hypertrophic Cardiomyopathy. *The American Journal of Cardiology*. 2007;100(1):128–32. DOI: 10.1016/j.amjcard.2007.02.063
  40. Friedberg MK, Slorach C. Relation Between Left Ventricular Regional Radial Function and Radial Wall Motion Abnormalities Using Two-Dimensional Speckle Tracking in Children With Idiopathic Dilated Cardiomyopathy. *The American Journal of Cardiology*. 2008;102(3):335–9. DOI: 10.1016/j.amjcard.2008.03.064
  41. van Dalen BM, Caliskan K, Soliman OII, Nemes A, Vletter WB, ten Cate FJ et al. Left ventricular solid body rotation in non-compaction cardiomyopathy: A potential new objective and quantitative functional diagnostic criterion? *European Journal of Heart Failure*. 2008;10(11):1088–93. DOI: 10.1016/j.ejheart.2008.08.006
  42. Nesvetov V.V., Shkolnik E.L., Vasyuk Yu.A. The significance of global longitudinal systolic deformation in a two-dimensional image for early diagnosis of the cardiotoxic effect of chemotherapeutic agents (preliminary results). *Russian Heart Failure Journal*. 2013;14(3):127–30. [Russian: Несветов В.В., Школьник Е.Л., Васюк Ю.А. Значение глобальной продольной систолической деформации по двумерному изображению для ранней диагностики кардиотоксического действия химиопрепаратов (предварительные результаты). *Журнал Сердечная Недостаточность*. 2013;14(3):127-30]
  43. Biswas M, Sudhakar S, Nanda NC, Buckberg G, Pradhan M, Roomi AU et al. Two- and three-dimensional speckle tracking echocardiography: clinical applications and future directions. *Echocardiography (Mount Kisco, N.Y.)*. 2013;30(1):88–105. DOI: 10.1111/echo.12079
  44. Tan TC, Scherrer-Crosbie M. Cardiac complications of chemotherapy: role of imaging. *Current Treatment Options in Cardiovascular Medicine*. 2014;16(4):296. DOI: 10.1007/s11936-014-0296-3

45. Tarr A, Stoebe S, Tuennemann J, Baka Z, Pfeiffer D, Varga A et al. Early detection of cardiotoxicity by 2D and 3D deformation imaging in patients receiving chemotherapy. *Echo Research and Practice*. 2015;2(3):81–8. DOI: 10.1530/ERP-14-0084
46. Thavendiranathan P, Poulin F, Lim K-D, Plana JC, Woo A, Marwick TH. Use of myocardial strain imaging by echocardiography for the early detection of cardiotoxicity in patients during and after cancer chemotherapy: a systematic review. *Journal of the American College of Cardiology*. 2014;63(25 Pt A):2751–68. DOI: 10.1016/j.jacc.2014.01.073
47. Siegel R, Ward E, Brawley O, Jemal A. Cancer statistics, 2011: the impact of eliminating socioeconomic and racial disparities on premature cancer deaths. *CA: a cancer journal for clinicians*. 2011;61(4):212–36. DOI: 10.3322/caac.20121
48. Stoodley PW, Richards DAB, Meikle SR, Clarke J, Hui R, Thomas L. The potential role of echocardiographic strain imaging for evaluating cardiotoxicity due to cancer therapy. *Heart, Lung & Circulation*. 2011;20(1):3–9. DOI: 10.1016/j.hlc.2010.09.007
49. Sawaya H, Sebag IA, Plana JC, Januzzi JL, Ky B, Tan TC et al. Assessment of echocardiography and biomarkers for the extended prediction of cardiotoxicity in patients treated with anthracyclines, taxanes, and trastuzumab. *Circulation. Cardiovascular Imaging*. 2012;5(5):596–603. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.112.973321
50. Sawaya H, Sebag IA, Plana JC, Januzzi JL, Ky B, Cohen V et al. Early detection and prediction of cardiotoxicity in chemotherapy-treated patients. *The American Journal of Cardiology*. 2011;107(9):1375–80. DOI: 10.1016/j.amjcard.2011.01.006
51. Negishi K, Negishi T, Hare JL, Haluska BA, Plana JC, Marwick TH. Independent and incremental value of deformation indices for prediction of trastuzumab-induced cardiotoxicity. *Journal of the American Society of Echocardiography: Official Publication of the American Society of Echocardiography*. 2013;26(5):493–8. DOI: 10.1016/j.echo.2013.02.008
52. Unitt C, Montazeri K, Tolaney S, Moslehi J. Cardiology patient page. Breast cancer chemotherapy and your heart. *Circulation*. 2014;129(25):e680-682. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.113.007181
53. Toufan M, Pourafkari L, Ghahremani Nasab L, Esfahani A, Sanaat Z, Nikanfar A et al. Two-dimensional strain echocardiography for detection of cardiotoxicity in breast cancer patients undergoing chemotherapy. *Journal of Cardiovascular and Thoracic Research*. 2017;9(1):29–34. DOI: 10.15171/jcvtr.2017.04
54. Boyd A, Stoodley P, Richards D, Hui R, Harnett P, Vo K et al. Anthracyclines induce early changes in left ventricular systolic and diastolic function: A single centre study. *PloS One*. 2017;12(4):e0175544. DOI: 10.1371/journal.pone.0175544
55. TArciniegas Calle MC, Sandhu NP, Xia H, Cha SS, Pellikka PA, Ye Z et al. Two-dimensional speckle tracking echocardiography predicts early subclinical cardiotoxicity associated with anthracycline-trastuzumab chemotherapy in patients with breast cancer. *BMC Cancer*. 2018 Oct 25;18(1):1037. doi: 10.1186/s12885-018-4935-z
56. Kasner M, Aleksandrov A, Escher F, Al-Saadi N, Makowski M, Spillmann F et al. Multimodality imaging approach in the diagnosis of chronic myocarditis with preserved left ventricular ejection fraction (MCpEF): The role of 2D speckle-tracking echocardiography. *International Journal of Cardiology*. 2017;243:374–8. DOI: 10.1016/j.ijcard.2017.05.038
57. Leitman M, Vered Z, Tyomkin V, Macogon B, Moravsky G, Peleg E et al. Speckle tracking imaging in inflammatory heart diseases. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*. 2018;34(5):787–92. DOI: 10.1007/s10554-017-1284-y
58. Du Toit R, Herbst PG, van Rensburg A, Snyman HW, Reuter H, Doubell AF. Speckle tracking echocardiography in acute lupus myocarditis: comparison to conventional echocardiography. *Echo Research and Practice*. 2017;4(2):9–19. DOI: 10.1530/ERP-17-0005
59. Camm AJ, Kirchhof P, Lip GYH, Schotten U, Savelieva I, Ernst S et al. Guidelines for the management of atrial fibrillation: The Task Force for the Management of Atrial Fibrillation of the European Society of Cardiology (ESC). *European Heart Journal*. 2010;31(19):2369–429. DOI: 10.1093/eurheartj/ehq278
60. Romero J, Cao JJ, Garcia MJ, Taub CC. Cardiac imaging for assessment of left atrial appendage stasis and thrombosis. *Nature Reviews Cardiology*. 2014;11(8):470–80. DOI: 10.1038/nrcardio.2014.77
61. Kirchhof P, Auricchio A, Bax J, Crijns H, Camm J, Diener H-C et al. Outcome parameters for trials in atrial fibrillation: Recommendations from a consensus conference organized by the German Atrial Fibrillation Competence NETwork and the European Heart Rhythm Association. *Europace*. 2007;9(11):1006–23. DOI: 10.1093/europace/eum191
62. Cianciulli TF. Two-dimensional speckle tracking echocardiography for the assessment of atrial function. *World Journal of Cardiology*. 2010;2(7):163–70. DOI: 10.4330/wjc.v2.i7.163
63. Kallergis EM, Goudis CA, Vardas PE. Atrial fibrillation: A progressive atrial myopathy or a distinct disease? *International Journal of Cardiology*. 2014;171(2):126–33. DOI: 10.1016/j.ijcard.2013.12.009
64. Nattel S, Harada M. Atrial Remodeling and Atrial Fibrillation: recent advances and translational perspectives. *Journal of the American College of Cardiology*. 2014;63(22):2335–45. DOI: 10.1016/j.jacc.2014.02.555
65. Karabay CY, Zehir R, Güler A, Oduncu V, Kalayci A, Aung SM et al. Left Atrial Deformation Parameters Predict Left Atrial Appendage Function and Thrombus in Sinus Rhythm with Suspected Cardioembolic Stroke: A Speckle Tracking and Transesophageal Echocardiography Study. *Echocardiography*. 2013;30(5):572–81. DOI: 10.1111/echo.12089
66. Miśkowiec D, Karolina K, Michalski BW, Uznańska-Loch B, Kurpesa M, Kasprzak JD et al. Left Atrial Dysfunction Assessed by Two-Dimensional Speckle Tracking Echocardiography in Patients with Impaired Left Ventricular Ejection Fraction and Sleep-Disordered Breathing. *Echocardiography*. 2016;33(1):38–45. DOI: 10.1111/echo.12987
67. Dell’Era G, Rondano E, Franchi E, Marino PN, on behalf of the Novara Atrial Fibrillation (NAIF) Study Group. Atrial asynchrony and function before and after electrical cardioversion for persistent atrial fibrillation. *European Journal of Echocardiography*. 2010;11(7):577–83. DOI: 10.1093/ejechocard/jeq010
68. Obokata M, Negishi K, Kurosawa K, Tateno R, Tange S, Arai M et al. Left Atrial Strain Provides Incremental Value for Embolism Risk Stratification over CHA2DS2-VASc Score and Indicates Prognostic Impact in Patients with Atrial Fibrillation. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2014;27(7):709–716.e4. DOI: 10.1016/j.echo.2014.03.010
69. Kupczynska K. Association between left atrial function assessed by speckle-tracking echocardiography and the presence of left atrial appendage thrombus in patients with atrial fibrillation. *The Anatolian Journal of Cardiology*. 2017;18(1):15–22. DOI: 10.14744/AnatolJCardiol.2017.7613
70. Skaarup KG, Christensen H, Høst N, Mahmoud MM, Ovesen C, Olsen FJ et al. Usefulness of left ventricular speckle tracking echocardiography and novel measures of left atrial structure and function in diagnosing paroxysmal atrial fibrillation in ischemic stroke and transient ischemic attack patients. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*. 2017;33(12):1921–9. DOI: 10.1007/s10554-017-1204-1
71. Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V, Afilalo J, Armstrong A, Ernande L et al. Recommendations for Cardiac Chamber Quantification by Echocardiography in Adults: An Update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2015;28(1):1-39.e14. DOI: 10.1016/j.echo.2014.10.003

Поступила 29.11.18 (Received 29.11.18)