



<https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-3-79-85>  
УДК 612.171.1:616.124.2]-073.43.8

## Новые возможности оценки сократимости левого желудочка методом двухмерной speckle tracking эхокардиографии

В.Э. Олейников, Ю.Г. Смирнов, В.А. Галимская, Е.А. Гундарев, Н.В. Бурко

Пензенский государственный университет,  
440026, Российская Федерация, Пенза, ул. Красная, 40

### Аннотация

Рассматриваются причины, по которым характеристики сократимости левого желудочка (ЛЖ), в частности пиковые показатели глобальной продольной деформации (GLS), полученные с помощью 2D спекл-эхокардиографии (ЭхоКГ), не получили широкого распространения в клинической практике. Проанализированы новые показатели, предложенные для оценки сократительной функции ЛЖ на основе продольной деформации, с учетом вклада отдельных сегментов. Показано, что перспективным направлением изучения контрактильной функции ЛЖ является определение показателей миокардиальной работы, характеризующей взаимосвязь между сократительной и насосной функцией. Представлен анализ постсистолического индекса деформации (Post systolic Strain Index – PSI), клиническое применение которого нашло отражение в работах по изучению жизнеспособного миокарда в условиях ишемии и для оценки эффективности ресинхронизирующей терапии (CRT).

<b>Ключевые слова:</b>	глобальная продольная деформация, сегментарная продольная деформация, 2D спекл-трекинг, эхокардиография, миокардиальная работа, постсистолическое сокращение миокарда.
<b>Конфликт интересов:</b>	авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
<b>Прозрачность финансовой деятельности:</b>	никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.
<b>Для цитирования:</b>	Олейников В.Э., Смирнов Ю.Г., Галимская В.А., Гундарев Е.А., Бурко Н.В. Новые возможности оценки сократимости левого желудочка методом двухмерной speckle tracking эхокардиографии. <i>Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины</i> . 2020;35(3):79–85. <a href="https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-3-79-85">https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-3-79-85</a> .

## New capabilities in assessing the left ventricular contractility by two-dimensional speckle tracking echocardiography

Valentin E. Oleynikov, Yuriy G. Smirnov, Vera A. Galimskaya, Evgeniy A. Gundarev, Nadezhda V. Burko

Penza State University,  
40, Krasnaya str., Penza, 440026, Russian Federation

### Abstract

This work reviews the reasons why the characteristics of left ventricular (LV) contractility, in particular, and 2D speckle echocardiography-based peak rates of global longitudinal strain (GLS), are not widely used in clinical practice. Authors present the analysis of new indicators proposed for the assessment of LV contractile function based on longitudinal strain taking into account the involvement of individual segments. The authors show that the assessment of myocardial work indicators characterizing the relationships between contractile and pump functions is a promising approach for the study of LV contractile

Олейников Валентин Эливич, e-mail: [v.oleynikov@gmail.com](mailto:v.oleynikov@gmail.com).

function. The analysis of postsystolic strain index (PSI) is presented to illustrate its clinical implementation in the studies of viable myocardium in ischemic conditions and evaluating the effectiveness of cardiac resynchronization therapy (CRT).

<b>Keywords:</b>	global longitudinal strain, segmental longitudinal strain, 2D speckle tracking, echocardiography, myocardial work, post-systolic myocardial shortening.
<b>Conflict of interest:</b>	the authors do not declare a conflict of interest.
<b>Financial disclosure:</b>	no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.
<b>For citation:</b>	Oleynikov V.E., Smirnov Y.G., Galimskaya V.A., Gundarev E.A., Burko N.V. New capabilities in assessing the left ventricular contractility by two-dimensional speckle tracking echocardiography. <i>Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine</i> . 2020;35(3):79–85. <a href="https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-3-79-85">https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-3-79-85</a> .

## Введение

Функция контрактильности имеет два аспекта, которые следует учитывать при ее оценке у больных сердечно-сосудистой патологией: это сила сокращения миокарда желудочков, обеспечивающая достаточный градиент давления для открытия клапанов сердца, и деформация, которая определяет фактический сердечный выброс [1, 2].

Очевидны ограничения использования традиционных показателей в оценке контрактильной функции сердца, в частности таких, как фракция выброса (ФВ) [3, 4], которая является глобальным индексом, не учитывающим сегментарные взаимодействия, которые вносят немаловажный вклад в насосную функцию сердца [1, 3–8].

Современная методика 2D эхокардиографии (ЭхоКГ), основанная на регистрации спеклов (пятен), позволяет получать количественные значения деформации отдельных сегментов левого желудочка (ЛЖ) в продольном, циркулярном и радиальном направлениях, что отличает ее от тканевого доплера [9].

Показатель пиковой глобальной продольной деформации (GLS), полученный с помощью 2D спекл-ЭхоКГ, обладает достаточно высокой чувствительностью в диагностике ишемических поражений, что подтверждено в ряде работ [10–12]. Также именно деформация в продольном направлении наиболее статистически значимо регистрируется с помощью 2D ЭхоКГ в отличие от других видов стрейна [13]. Однако этот показатель имеет серьезные недостатки, так как не отражает локализацию очаговых поражений и не учитывает вклад отдельных сегментов в общую сократимость сердца на протяжении сердечного цикла. Показатели глобальной деформации могут быть неточными, если слишком много значений сегментарной деформации исключаются из анализа из-за некорректных измерений [14, 15]. Существенным недостатком продольной деформации является ее зависимость от пред- и постнагрузки. Так, при увеличении постнагрузки деформационные показатели снижаются и уже не отражают истинной сократительной функции миокарда [16].

## Постсистолическое сокращение

Для более глубокого понимания физиологии сокращения миокарда и разработки диагностических критериев при различных заболеваниях сердца необходим комплексный подход к анализу деформационных показателей, в том числе зависимости сократимости сегмента от времени в течение сердечного цикла. Очевидно, что систолическая дисфункция ЛЖ может быть обусловлена как снижением абсолютного значения пиковых показателей деформации, так и несинхронным сокращением отдельных сегментов [17].

Как видно из представленных графиков, пиковые значения продольной деформации могут приходиться на период систолы, и тогда сокращение данного сегмента (peak systolic) вносит максимально возможный вклад в работу ЛЖ (рис. 1). Однако максимум деформации может приходиться и на постсистолический период, тогда потенциальная энергия сокращения такого сегмента (post systolic) лишь частично используется в сердечном выбросе.

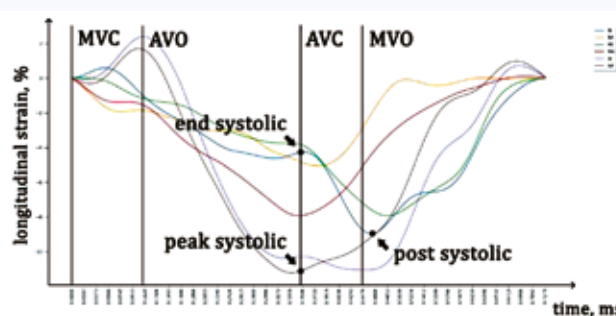


Рис. 1. График временной зависимости продольной деформации с указанием ее пиковых систолических и постсистолических значений в разных сегментах левого желудочка у больного инфарктом миокарда с подъемом сегмента ST (STEMI)

Примечание: peak systolic – пиковое систолическое значение продольной деформации отдельного сегмента; post systolic – максимальная постсистолическая деформация; end systolic – значение продольного стрейна сегмента в момент AVC, в котором максимальное значение деформации приходится на постсистолический период. AVC – момент закрытия аортального клапана; AVO – момент открытия аортального клапана; MVC – момент закрытия митрального клапана; MVO – момент открытия митрального клапана.

Fig. 1. Time dependence plot of longitudinal strain with an indication of peak systolic and post systolic values in different left ventricular segments in a STEMI patient

Note: peak systolic – peak systolic value of longitudinal strain in individual segment, post systolic – maximum post systolic strain; end systolic – the value of longitudinal strain in segment; at AVC moment at which the maximum value of deformation occurs in the post-systolic period. AVC – aortic valve closure; AVO – aortic valve opening; MVC – mitral valve closure, MVO – mitral valve opening.

Согласно классической теории механики сокращения сердца, укорочение продольных волокон миокарда может продолжаться и в диастолу [18]. У здоровых лиц имеются единичные сегменты, максимальная деформация которых приходится на постсистолический период. У пациентов с сердечно-сосудистой патологией таких сегментов значительно больше [1, 2]. Если имеет место постсистолическое сокращение большого количества сегментов, то ЛЖ укорачивается и уменьшается во время диастолы, тогда как должно происходить его расслабление

и увеличение объема. Это приводит к повышению конечного диастолического давления и снижению объема наполнения ЛЖ.

Постсистолический индекс деформации (PSI) для отдельного сегмента может быть рассчитан по формуле:

$$PSI = \frac{\epsilon_{ps} - \epsilon_{es}}{\epsilon_{ps}}$$

где  $\epsilon_{ps}$  – пиковое постсистолическое значение деформации (peak post systolic) в отдельном сегменте, а  $\epsilon_{es}$  – значение сократимости в момент конца систолы (end systolic), см. рис. 1 [14]. Глобальный постсистолический индекс деформации рассчитывается как среднее арифметическое сегментарных показателей.

Очевидно, что влияние постсистолического сокращения на внутрисердечную гемодинамику определяется количеством сегментов в которых оно наблюдается. Если таких сегментов много, что встречается при ишемии и повреждении миокарда [2], продолжающееся после закрытия аортального клапана их укорочение негативно влияет на систолу, возможно, снижая ударный объем.

Временная задержка максимального стрейна (time to peak) – это промежуток времени от AVC до момента наступления максимальной пиковой деформации сегмента (рис. 2).

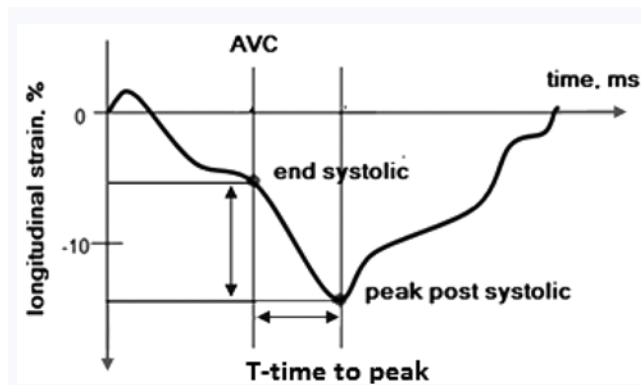


Рис. 2. График временной зависимости продольной деформации с указанием амплитудной и временной задержки ее максимального значения в отдельном сегменте левого желудочка

Примечание: end systolic – значение продольного стрейна сегмента в момент AVC, в котором максимальное значение деформации приходится на постсистолический период; peak post systolic – максимальная постсистолическая деформация; T-time to peak – время до пика продольной деформации.

Fig. 2. Time dependence plot of longitudinal strain with an indication of amplitude and time delay of its maximum value in a separate left ventricular segment

Note: end systolic – the value of the longitudinal strain of the segment at the time of AVC at which the maximum strain value occurs in the post-systolic period; peak post systolic – maximum postsystolic strain; T-time to peak – time to peak longitudinal strain.

Временная задержка деформации может рассматриваться как один из механизмов нарушения диастолической функции ЛЖ, влияющих на расслабление миокарда, так как релаксация отдельных сегментов продолжается после MVO в течение всей фазы раннего наполнения ЛЖ. Поскольку диастолическая релаксация происходит в энергозависимую фазу сердечного цикла, постсистолическое сокращение усугубляет нарушенные метаболические процессы в ишемизированном миокарде. По мнению ряда авторов, диастолическая дисфункция ЛЖ является патофизиологическим механизмом, лежащим

в основе синдрома сердечной недостаточности с сохраненной ФВ [19], поэтому дальнейшее изучение влияния постсистолических сокращений на диастолу заслуживает внимания при различных сердечно-сосудистых заболеваниях, осложняющихся хронической сердечной недостаточностью (ХСН). Единичные исследования указывают на то, что этот показатель лучше предсказывает реакцию на ресинхронизирующую терапию (CRT), чем время (SD) до пиковой скорости миокарда, определяемое с помощью тканевой доплерографии [20].

В небольших исследованиях PSI и время до пика продольной деформации рассматривались как предикторы диагностики ишемизированных сегментов у пациентов с коронарной патологией [21, 22]. Несколько клинических исследований показали превосходство PSI над стресс-ЭхоКГ с добутамином в диагностике острой ишемии миокарда [23, 24].

С другой стороны, постсистолическое сокращение волокон миокарда может указывать на жизнеспособный миокард и возможность восстановления систолической функции ЛЖ после реперфузии миокарда [25–27]. В исследовании Н. Skulstad и соавт., где у экспериментальных животных индуцировали разную степень ишемии миокарда путем стеноза и окклюзии передней нисходящей коронарной артерии (ПНА), определяли наличие активного компонента в постсистолическом сокращении методом сономикрометрии и тканевой доплерографии. Стеноз ПНА сопровождался гипокинезом миокарда и увеличением постсистолического укорочения с  $1,1 \pm 0,3\%$  до  $4,2 \pm 0,7\%$  ( $p < 0,05$ ). Окклюзия ПНА приводила к дискинезу, но в первые 1–3 мин постсистолическое укорочение увеличивалось дополнительно до  $8,2 \pm 1,0\%$  ( $p < 0,05$ ). Укорочение akinетического сегмента при падении давления во время изоволюмического расслабления свидетельствовало о пассивном компоненте сокращения, в то время как кривая «давление – длина сегмента ЛЖ» в первые 1–3 мин смещалась вверх на  $14,0 \pm 2,4$  мм рт. ст. относительно полностью расслабленного сегмента, что подтверждало существенный вклад активного компонента [28].

Результаты исследований [29, 30] показывают, что PSI, определяемый у пациентов в раннем периоде острого коронарного синдрома (ОКС) после успешной реваскуляризации, является сильным и независимым фактором риска развития ХСН. По результатам наблюдения в течение 3,7 лет после ОКС у 155 человек (36%) из 428 регистрировали развитие ХСН. PSI в этой группе пациентов составлял 22% против 12% ( $p < 0,001$ ), увеличивая в 1,61 раза (95% ДИ: 1,21–2,12;  $p = 0,001$ ) риск развития ХСН [29].

Работы Р. Lim и соавт. показали высокое прогностическое значение PSI для оценки эффективности CRT у пациентов с ХСН. У 100 пациентов с ХСН (ФВ =  $26 \pm 9\%$ ) значение  $PSI \geq 25\%$  предсказывало положительную реакцию на CRT, сопровождающуюся обратным ремоделированием ЛЖ [14, 30]. Однако в многоцентровом исследовании показатель PSI и другие ЭхоКГ параметры не продемонстрировали статистически значимой предикторной способности предсказывать клинический ответ на CRT [31].

### Миокардиальная работа (Myocardial work)

Остается малоизученным вопрос зависимости деформационных характеристик ЛЖ от его объемных значений, так как показатели деформации миокарда не отражают

изменения пред- и постнагрузки [16, 32]. В частности, предложен показатель миокардиальной работы, основанный на анализе зависимости «давление – деформация» для характеристики взаимосвязи между сократительной и насосной функцией ЛЖ [17, 32, 33]. Миокардиальная работа представляет собой новый инструмент для более точной оценки систолической функции ЛЖ при недостаточной информативности ФВ и GLS. Это важно, так как во многих исследованиях было показано, что площадь кривой «давление – объем» линейно коррелирует с потреблением миокардом кислорода [34–36].

В работах К. Russell и соавт. [17] предложены новые характеристики региональной и глобальной работы сердца для оценки вклада отдельных сегментов в насосную функцию ЛЖ. Расчет работы основывается на анализе площади петли силы – длины сегмента и отражает региональную работу миокарда и потребление кислорода. Вместо показателя силы использовали значения давления, полученные неинвазивным методом Короткова, ранее подтвержденные высокими корреляционными связями в экспериментах с помощью инвазивной сонометрии у беспородных собак [17]. Миокардиальная работа оценивалась на временном промежутке сердечного цикла от закрытия митрального клапана (MVC) до его открытия (MVO). Кривые деформации и давления были синхронизированы по точкам (моментам) сердечного цикла, соответствующим клапанным событиям. Площадь

контура служила индексом региональной и глобальной миокардиальной работы (GWI), который рассчитывается, как и другие показатели работы, с помощью программного обеспечения Echopac (GE, USA), рисунок 3.

Различают положительную работу ( $W_{pos}$ ), которая представляет собой сумму всех работ, выполненных во время сокращения сегмента; представлена положительным числом, и отрицательную работу ( $W_{neg}$ ) – сумму всех работ, выполненных при удлинении сегмента. Несмотря на то, что  $W_{neg}$  имеет отрицательное значение, этот показатель представлен положительным числом, чтобы облегчить понимание относительных различий между отрицательной и положительной работой. С другой стороны, миокардиальную работу можно определить как конструктивную и потерянную. Конструктивную работу характеризует показатель global constructive work (GCW, mmHg %), который рассчитывается как сумма работ всех сегментов, выполненных во время укорочения волокон в систолу и отрицательной работы во время удлинения в фазу изоволюметрического расслабления.

Потерянную работу характеризует показатель global wasted work (GWW, mmHg %), который рассчитывается как сумма отрицательной работы всех сегментов во время удлинения в систолу и положительной работы всех сегментов во время укорочения в диастолу. Показатель эффективности глобальной работы (global work ejection – GWE) рассчитывается как  $GCW/(GCW + GWW)$ , % (см. рис. 3).

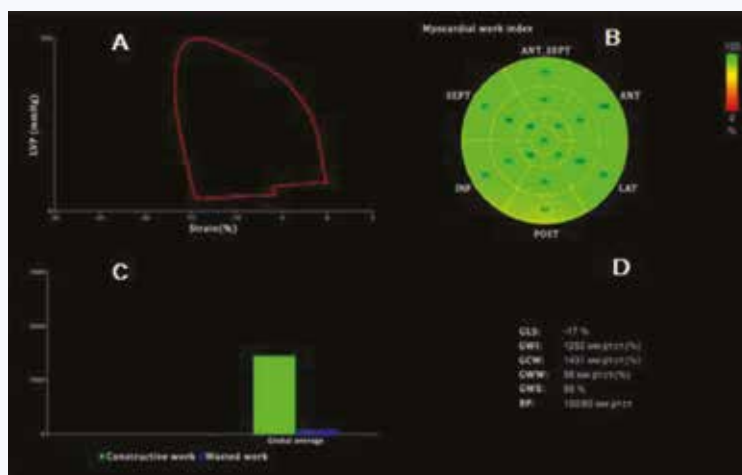


Рис. 3. Параметры работы миокарда методом 2D эхокардиографии в интерфейсе Echopack у пациента Р., перенесшего инфаркт миокарда  
Примечание: А – петля давления-деформации ЛЖ; В – бычий глаз GWI; С – гистограмма, представляющая GCW и GWW; D – результаты анализа работы миокарда; GCW – глобальная конструктивная работа; GWE – эффективность глобальной работы; GWI – глобальный индекс работы; GWW – глобальная потерянная работа (собственное наблюдение).

Fig. 3. Parameters of myocardial work by 2D echocardiography in the Echopack interface in patient P. after myocardial infarction  
Note. A – LV pressure-strain loop; B – bovine eye GWI; C – a histogram representing GCW and GWW; D – myocardial work analysis. GCW – global constructive work; GWE – global work efficiency; GWI – Global Work Index; GWW is a global wasted work (own observation)

Крупное европейское проспективное многоцентровое исследование NORRE было посвящено выявлению референсных значений показателей работы миокарда у здоровых взрослых лиц и изучению влияния возраста и пола среди 226 здоровых добровольцев. Самые низкие значения GWI у мужчин и женщин составили 1650 и 1544 mmHg (%), а для показателя GWE – 90 и 91% соответственно. Наибольшее значение GWW – 238 у мужчин и 239 mmHg у женщин. У мужчин регистрировались более низкие значения GWE и более высокие значения GWW,

а показатели GWI и GCW значительно увеличивались с возрастом у женщин [37].

Эффективная работа ЛЖ у больных с диссинхронией сокращения миокарда снижается из-за растяжения поврежденных сегментов в фазу изоволюметрического сокращения, в результате чего энергия миокарда тратится на удлинение поврежденных сегментов. Это приводит к прогрессирующему истощению тканевого обмена сердца и, как следствие, снижению эффективности сердечного выброса. J. Chan и соавт. установили, что пациенты



с артериальной гипертензией имели статистически значимо более низкий GWI ЛЖ по сравнению с контрольной группой при нормальных значениях ФВ и GLS [16]. В ряде исследований показатели миокардиальной работы являлись дополнительными важными критериями отбора и контроля при проведении CRT [38–40]. К. Russel и соавт. в качестве критерия эффективности CRT и положительного влияния на сократимость миокарда у пациентов с ХСН и блокадой левой ножки пучка Гиса предложили использование коэффициента потерянной работы [17]. E. Galli и соавт. по результатам 4-летнего наблюдения 166 пациентов с ХСН после перенесенной CRT установили, что значение показателя  $CW \leq 888$  mmHg увеличивает риск сердечной смерти в 4,23 раза (95% ДИ: 1,08–16,5;  $p = 0,03$ ) [38]. Оптимистические результаты по использованию различных показателей работы в качестве маркеров эффективности CRT в многочисленных небольших исследовательских проектах должны быть подтверждены в многоцентровом исследовании по тестированию этих параметров.

В работе R. Manganaro и соавт. выявлена статистически значимая корреляция между показателями работы и деформационными характеристиками миокарда у 226 здоровых субъектов (45 ± 13 лет). Наибольшая корреляция наблюдалась между GCW и GLS (–0,55;  $p < 0,001$ ) [41]. Интересные результаты представлены в исследовании E. Voe, где была продемонстрирована большая чувствительность и специфичность индекса регионарной работы миокарда (81 и 82%) против GLS (78 и 65% соответственно) в способности выявлять коронарную окклюзию у больных инфарктом миокарда без подъема сегмента ST [42]. M. El Mahdiui и соавт. исследовали 4 группы пациентов ( $n = 120$ ): 1 – здоровые без факторов риска, 2 – без структурных изменений сердца, но с факторами риска, 3 – постинфарктные пациенты без ХСН, 4 – пациенты с ХСН со сниженной ФВ ( $\leq 40\%$ ). GWE среди здоровых лиц статистически значимо не отличались (96,0% против 96,0%;  $p = 0,589$ ). Эффективность глобальной работы миокарда ЛЖ была статистически значи-

мо меньше у постинфарктных пациентов (96,0% против 93,0%;  $p < 0,001$ ) и значительно снижена у пациентов с ХСН (96,0% против 69,0%;  $p < 0,001$ ) [43]. Таким образом, показатель GWE отражал состояние систолической функции ЛЖ при ХСН с различными уровнями ФВ, а GWI показал преимущество перед GLS в неинвазивной диагностике состояния коронарного русла.

## Заключение

В последние два десятилетия 2D спекл-эхокардиография стремительно развивается, благодаря чему клиницисты получают дополнительную важную информацию о контактильности миокарда. Новые перспективы более полной характеристики сократительной функции ЛЖ при различных заболеваниях открывают исследования, посвященные детальной оценке работы миокарда. Вместе с тем в настоящее время ограничения этой методики состоят в том, что показатели миокардиальной работы ЛЖ рассчитываются только на основании продольной деформации без учета других компонентов биомеханики сокращения сердца. Появление трехмерной (3D) эхокардиографии, вероятно, позволит получать более полное представление о работе ЛЖ вследствие комплексного анализа всех видов деформации – продольной, циркулярной, радиальной, а также ротации и скручивания.

В обзоре представлены подходы к анализу сократимости миокарда ЛЖ с учетом вклада в нее отдельных сегментов. Предложенные характеристики, с одной стороны, описывают сократимость каждого сегмента в отдельности, с другой стороны, дают возможность судить о контрактильной функции миокарда ЛЖ в целом. Эти показатели, позволяющие изучать механизмы контрактильности миокарда, требуют дальнейшего тестирования у больных с сердечно-сосудистой патологией. Концепция использования совокупности показателей сократительной функции миокарда открывает интересные перспективы изучения компенсаторных возможностей сердца и персонализации лечебно-диагностической тактики.

## Литература / References

- Codreanu I., Pegg T., Selvanayagam J.B., Robson M., Rider O.J., Dasanu C.A. et al. Normal values of regional and global myocardial wall motion in young and elderly individuals using navigator gated tissue phase mapping. *Age (Dordr.)*. 2014;36(1):231–241. DOI: 10.1007/s11357-013-9535-x.
- Fabiani I., Pugliese N.R., Santini V., Conte L., Bello V. Speckle-tracking imaging, principles and clinical applications: A review for clinical cardiologists. *Intech. Open*. 2016:104. DOI: 10.5772/64261.
- 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. DOI: 10.1161/01.CIR.0000164273.57823.26.
- Owan T.E., Hodge D.O., Herges R.M., Jacobsen S.J., Roger V.L., Redfield M.M. Trends in prevalence and outcome of heart failure with preserved ejection fraction. *N. Engl. J. Med.* 2006;355:251–259. DOI: 10.1056/NEJMoa052256.
- Redfield M.M., Jacobsen S.J., Burnett J.C. Jr., Mahoney D.W., Bailey K.R., Rodeheffer R.J. Burden of systolic and diastolic ventricular dysfunction in the community: Appreciating the scope of the heart failure epidemic. *JAMA*. 2003;289(2):194–202. DOI: 10.1001/jama.289.2.194.
- Borlaug B.A., Paulus W.J. Heart failure with preserved ejection fraction: pathophysiology, diagnosis, and treatment. *Eur. Heart J.* 2011;32(6):670–679. DOI: 10.1093/eurheartj/ehq426.
- Oleinikov V., Galimskaya V., Golubeva A., Kupriyanova S. Global strain of left ventricular myocardium and ejection fraction in STEMI patients. *Eur. J. Heart Failure*. 2018;20(S1):40.
- Galimskaya V., Kupriyanova S., Dolgarev I., Golubeva A., Oleinikov V. The heart contractile function and left ventricular ejection fraction in patients with ST-segment elevation myocardial infarction. *Eur. J. Prevent. Cardiol.* 2018;25(2):s19.
- Mor-Avi V., Lang R.M., Badano L.P., Belohlavek M., Cardim N.M., 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. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2011;24(3):277–313. DOI: 10.1016/j.echo.2011.01.015.
- Kvisvik B., Aagaard E.N., Mørkrid L., Røsjø H., Lyngbakken M., Smedsrud M.K. et al. Mechanical dispersion as a marker of left ventricular dysfunction and prognosis in stable coronary artery disease. *Int. J. Cardiovasc. Imaging*. 2019;35(7):1265–1275. DOI: 10.1007/s10554-019-01583-z.
- Al Saikhan L., Park C., Hardy R., Hughes A. Prognostic implications of left ventricular strain by speckle-tracking echocardiography in the general population: A meta-analysis. *Vasc. Health Risk Manag.* 2019;15:229–251. DOI: 10.2147/VHRM.S206747.
- Voigt J.U., Pedrizzetti G., Lysyansky P., Marwick T.H., 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. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging*. 2015;16(1):1–11. DOI: 10.1016/j.echo.2014.11.003.
- Chimura M., Yamada S., Yasaka Y., Kawai H. Improvement of left ventricular function assessment by global longitudinal strain after successful percutaneous coronary intervention for chronic total occlusion. *PLoS One*. 2019;14(6):e0217092. DOI: 10.1371/journal.pone.0217092.

13. Oleynikov V.E., Galimskaya V.A., Kupriyanova S.N., Burko N.V. Use of the Speckle tracking method for determining global parameters of heart contractility in healthy individuals. *Methods X*. 2018;5:125–135. DOI: 10.1016/j.mex.2018.01.011.
14. Lim P., Buakhamsri A., Popovic Z.B., Greenberg N.L., Patel D., Thomas J.D. et al. Longitudinal strain delay index by speckle tracking imaging a new marker of response to cardiac resynchronization therapy. *Circulation*. 2008;118(11):1130–1137. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.750190.
15. Aurigemma G.P., Zile M.R., Gaasch W.H. Contractile behavior of the left ventricle in diastolic heart failure: with emphasis on regional systolic function. *Circulation*. 2006;113(2):296–304. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.104.481465.
16. Chan J., Edwards N.F.A., Khandheria B.K., Shiino K., Sabapathy S., Anderson B. et al. A new approach to assess myocardial work by non-invasive left ventricular pressure-strain relations in hypertension and dilated cardiomyopathy. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging*. 2019;20(1):31–39. DOI: 10.1093/ehjci/eyj131.
17. Russell K., Eriksen M., Aaberge L., Wilhelmsen N., Skulstad H., Gjesdal O. et al. Assessment of wasted myocardial work: A novel method to quantify energy loss due to uncoordinated left ventricular contractions. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol*. 2013;305(7): H996–1003. DOI: 10.1152/ajpheart.00191.2013.
18. Chung C.S., Shmuylovich L., Kovács S.J. What global diastolic function is, what it is not, and how to measure it. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol*. 2015;30(9):H1392–406. DOI: 10.1152/ajpheart.00436.2015.
19. Ponikowski P., Voors A.A., Anker S.D., Bueno H., Cleland J.G.F., Coats A.J.S. 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. DOI: 10.1093/eurheartj/ehw128.
20. Scheffer M.G., van Dessel P.F., van Gelder B.M., Sutherland G.R., van Hemel N.M. Peak longitudinal strain delay is superior to TDI in the selection of patients for resynchronisation therapy. *Neth. Heart J*. 2010;18(12):574–582. DOI: 10.1007/s12471-010-0838-6.
21. Ozawa K., Funabashi N., Nishi T., Takahara M., Fujimoto Y., Kamata T. et al. Differentiation of infarcted, ischemic, and non-ischemic LV myocardium using post-systolic strain index assessed by resting two-dimensional speckle tracking transthoracic echocardiography. *Int. J. Cardiol*. 2016;219:308–311. DOI: 10.1016/j.ijcard.2016.06.007.
22. Ozawa K., Funabashi N., Nishi T., Takahara M., Fujimoto Y., Kamata T. et al. Resting multilayer 2D speckle-tracking TTE for detection of ischemic segments confirmed by invasive FFR part-2, using post-systolic-strain-index and time from aortic-valve-closure to regional peak longitudinal-strain. *Int. J. Cardiol*. 2016;217:149–155. DOI: 10.1016/j.ijcard.2016.04.153.
23. Celutkienė J., Sutherland G.R., Laucevicius A., Zakarkaitė D., Rudys A., Grabauskiene V. Is post-systolic motion the optimal ultrasound parameter to detect induced ischaemia during dobutamine stress echocardiography? *Eur. Heart J*. 2004;25(11):932–942. DOI: 10.1016/j.ehj.2004.04.005.
24. Kukulski T., Jamal F., Herbots L., D'hooge J., Bijnsens B., Hatle L. et al. Identification of acutely ischemic myocardium using ultrasonic strain measurements: A clinical study in patients undergoing coronary angioplasty. *J. Am. Coll. Cardiol*. 2003;41(5):810–819. DOI:10.1016/s0735-1097(02)02934-0.
25. Hosokawa H., Sheehan F.H., Suzuki T. Measurement of postsystolic shortening to assess viability and predict recovery of left ventricular function after acute myocardial infarction. *J. Am. Coll. Cardiol*. 2000;35(7):1842–1849. DOI: 10.1016/s0735-1097(00)00634-3.
26. Eek C., Grenne B., Brunvand H., Aakhus S., Endresen K., Smiseth O.A. et al. Postsystolic shortening is a strong predictor of recovery of systolic function in patients with non-ST-elevation myocardial infarction. *Eur. J. Echocardiogr*. 2011;12(7):483–489. DOI: 10.1093/ejehocardi/jev055.
27. Takayama M., Norris R.M., Brown M.A., Armiger L.C., Rivers J.T., White H.D. Postsystolic shortening of acutely ischemic canine myocardium predicts early and late recovery of function after coronary artery reperfusion. *Circulation*. 1988;78(4):994–1007. DOI: 10.1161/01.cir.78.4.994.
28. Skulstad H., Edvardsen T., Urheim S., Rabben S.I., Stugaard M., Lyseggen E. et al. Postsystolic shortening in ischemic myocardium. Active contraction or passive recoil? *Circulation*. 2002;106(6):718–724. DOI: 10.1161/01.CIR.0000024102.55150.
29. Brainin P., Skaarup K.G., Iversen A.Z., Jorgensen P.G., Platz E., Jensen J.S. et al. Post-systolic shortening predicts heart failure following acute coronary syndrome. *Int. J. Cardiology*. 2019;276:191–197. DOI: 10.1016/j.ijcard.2018.11.106.
30. Lim P., Mitchell-Heggs L., Buakhamsri A., Thomas J.D., Grimm R.A. Impact of left ventricular size on tissue Doppler and longitudinal strain by speckle tracking for assessing wall motion and mechanical dyssynchrony in candidates for cardiac resynchronization therapy. *J. Am. Soc. Echocardiogr*. 2009;22(6):695–701. DOI: 10.1016/j.echo.2009.04.015.
31. Chung E.S., Leon A.R., 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):2608–2616. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.743120.
32. Boe E., Skulstad H., Smiseth O.A. Myocardial work by echocardiography: a novel method ready for clinical testing. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging*. 2019;20(1):18–20. DOI: 10.1093/ehjci/jev156.
33. Boe E., Smiseth O.A., Storsten P., Andersen O.S., Aalen J., Eriksen M. et al. Left ventricular end-systolic volume is a more sensitive marker of acute response to cardiac resynchronization therapy than contractility indices: insights from an experimental study. *Europace*. 2019;21(2):347–355. DOI: 10.1093/europace/euy221.
34. Suga H., Sagawa K. Instantaneous pressure-volume relationships and their ratio in the excised, supported canine left ventricle. *Cir. Res*. 1974;35(1):117–126. DOI: 10.1161/01.res.35.1.117.
35. Foëx P., Leone B.J. Pressure-volume loops: A dynamic approach to the assessment of ventricular function. *J. Cardiothorac. Vasc. Anesth*. 1994;8(1):84–96. DOI: 10.1016/1053-0770(94)90020-5.
36. Russell K., Eriksen M., Aaberge L., Wilhelmsen N., Skulstad H., Remme E.W. et al. A novel clinical method for quantification of regional left ventricular pressure–strain loop area: A non-invasive index of myocardial work. *Eur. Heart J*. 2012;33(6):724–733. DOI: 10.1093/eurheartj/ehs016.
37. Manganaro R., Marchetta S., Dulgheru R., Ilardi F., Sugimoto T., Robinet S. et al. Echocardiographic reference ranges for normal non-invasive myocardial work indices: results from the EACVI NORRE study. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging*. 2018;20(5):582–590. DOI: 10.1093/ehjci/jev188.
38. Galli E., Hubert A., Le Rolle V., Hernandez A., Smiseth O.A., Mabo P. et al. Myocardial constructive work and cardiac mortality in resynchronization therapy candidates. *Am. Heart J*. 2019;212:53–63. DOI: 10.1016/j.ahj.2019.02.008.
39. Galli E., Leclercq C., Fournet M., Hubert A., Bernard A., Smiseth O.A. et al. Value of myocardial work estimation in the prediction of response to cardiac resynchronization therapy. *J. Am. Soc. Echocardiogr*. 2018;31(2):220–230. DOI:10.1016/j.echo.2017.10.009.
40. Van der Bijl P., Vo N.M., Kostyukevich M.V., Mertens B., Marsan N.A., Delgado V. et al. Prognostic implications of global, left ventricular myocardial work efficiency before cardiac resynchronization therapy. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging*. 2019;20(12):1388–1394. DOI: 10.1093/ehjci/jev095.
41. Manganaro R., Marchetta S., Dulgheru R., Sugimoto T., Tsugu T., Ilardi F. et al. Correlation between non-invasive myocardial work indices and main parameters of systolic and diastolic function: results from the EACVI NORRE study. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging*. 2020;21(5):533–541. DOI: 10.1093/ehjci/jev203.
42. Boe E., Russell K., Eek C., Eriksen M., Remme E.W., Smiseth O.A. et al. Non-invasive myocardial work index identifies acute coronary occlusion in patients with non-ST-segment elevation-acute coronary syndrome. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging*. 2015;16(1):1247–1255. DOI: 10.1093/ehjci/jev078.
43. Mahdiui E.M., van der Bij P., Abou R., Ajmone M.N., Delgado V., Bax J.J. Global left ventricular myocardial work efficiency in healthy individuals and patients with cardiovascular disease. *J. Am. Soc. Echocardiogr*. 2019;32(9):1120–1127. DOI: 10.1016/j.echo.2019.05.002.

## Информация о вкладе авторов

Олейников В.Э. – разработка концепции, проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение рукописи для публикации.

Смирнов Ю.Г. – разработка концепции физико-математической со-

## Information on author contributions

Oleynikov V.E. – concept development, verification of essential intellectual content, and final approval of the manuscript for publication.

Smirnov Yu.G. – development of physical and mathematical concepts of the manuscript, and revision of essential intellectual content.

ставляющей работы, проверка критически важного интеллектуального содержания.

Галимская В.А. – разработка концепции, анализ литературы, написание текста рукописи.

Гундарев Е.А. – подбор литературы для анализа физико-математической составляющей работы, анализ литературы.

Бурко Н.В. – подборка и анализ литературы, оформление работы, перевод на английский язык фрагментов рукописи.

Galimskaya V.A. – concept development, literature analysis, and writing the text of manuscript.

Gundarev E.A. – selection of literature for analysis of physical and mathematical elements of the manuscript, and literature analysis.

Burko N.V. – selection and analysis of literature, research design, and translation of relevant parts of the manuscript into English.

## Сведения об авторах

**Олейников Валентин Эливич**, д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой «Терапия», Пензенский государственный университет. ORCID 0000-0002-7463-9259.

E-mail: [v.oleynikov@gmail.com](mailto:v.oleynikov@gmail.com).

**Смирнов Юрий Геннадьевич**, д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и суперкомпьютерное моделирование», Пензенский государственный университет. ORCID 0000-0001-9040-628X.

E-mail: [smirnovyug@mail.ru](mailto:smirnovyug@mail.ru).

**Галимская Вера Александровна**, канд. мед. наук, доцент кафедры «Терапия», Пензенский государственный университет. ORCID 0000-0001-7545-8196.

E-mail: [vera-budanova@mail.ru](mailto:vera-budanova@mail.ru).

**Гундарев Евгений Андреевич**, аспирант кафедры «Математика и суперкомпьютерное моделирование», Пензенский государственный университет.

E-mail: [psu.gun@mail.ru](mailto:psu.gun@mail.ru).

**Бурко Надежда Валерьевна**, канд. мед. наук, доцент кафедры «Терапия», Пензенский государственный университет. ORCID 0000-0002-4932-0000.

E-mail: [hopeful.n@mail.ru](mailto:hopeful.n@mail.ru).

 **Олейников Валентин Эливич**, e-mail: [v.oleynikov@gmail.com](mailto:v.oleynikov@gmail.com).

## Information about the authors

**Valentin E. Oleynikov**, Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Therapy, Penza State University. ORCID 0000-0002-7463-9259.

Email: [v.oleynikov@gmail.com](mailto:v.oleynikov@gmail.com).

**Yuriy G. Smirnov**, Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Mathematics and Supercomputer Modeling, Penza State University. ORCID 0000-0001-9040-628X.

E-mail: [smirnovyug@mail.ru](mailto:smirnovyug@mail.ru).

**Vera A. Galimskaya**, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, Therapy Department, Penza State University. ORCID 0000-0001-7545-8196.

E-mail: [vera-budanova@mail.ru](mailto:vera-budanova@mail.ru).

**Evgeniy A. Gundarev**, Post-Graduate Student, Department of Mathematics and Supercomputer Modeling, Penza State University.

E-mail: [psu.gun@mail.ru](mailto:psu.gun@mail.ru).

**Nadezhda V. Burko**, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, Therapy Department, Penza State University. ORCID 0000-0002-4932-0000.

E-mail: [hopeful.n@mail.ru](mailto:hopeful.n@mail.ru).

 **Valentin E. Oleynikov**, e-mail: [v.oleynikov@gmail.com](mailto:v.oleynikov@gmail.com).

Received May 25, 2020

Поступила 25.05.2020