

DOI: <https://doi.org/10.51922/2616-633X.2025.9.2.2580>

# УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЦЕНКА СОКРАТИМОСТИ ГРУДНОГО ОТДЕЛА АОРТЫ МЕТОДОМ 2D SPECKLE TRACKING

Я.И. Валюженич<sup>1</sup>, А.С. Рудой<sup>2</sup>, Н.Г. Хотько<sup>3</sup>

УО «Белорусский государственный медицинский университет» г. Минск<sup>1</sup>

ГУ «Республиканский научно-практический центр «Кардиология», г. Минск<sup>2</sup>

ГУ «432 ордена Красной Звезды главный военный клинический медицинский центр Вооруженных Сил Республики Беларусь», г. Минск<sup>3</sup>

andrewrudoj@gmail.com, andrewrudoj@gmail.com

УДК [616.132:616-007.64]:616-073.43

**Ключевые слова:** аорта, деформация, спекл-трекинг, воспроизводимость, Блэнд–Альтман, аортопатии.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ.** Я.И. Валюженич, А.С. Рудой, Н.Г. Хотько. Ультразвуковая оценка сократимости грудного отдела аорты методом 2d speckle tracking. *Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски*, 2025, Т. 9, № 2, С. 2580–2586.

**Цель.** Оценить применимость двумерной спекл трекинг эхокардиографии (2D STE) для количественной оценки глобальной циркулярной деформации аорты (GCSao) и изучить внутриоператорскую и межоператорскую воспроизводимость измерений, а также диагностическую ценность показателя у пациентов с расширением/аневризмой грудного отдела аорты по сравнению со здоровыми добровольцами.

**Методы.** В исследование включены 51 здоровый доброволец (возраст 21 [20;23] лет) и 13 пациентов с диаметром аорты > 45 мм (возраст 48 [36; 49] лет). Всем выполняли стандартную трансторакальную эхокардиографию (Vivid E90, датчик M5SC D, 1,5–4,5 МГц) с записью DICOM петель и последующим онлайн анализом в EchoPAC PC v201. GCSao (%) рассчитывали по предложенной ранее методике. Два эксперта ( $\mathcal{E}_1$  – разработчик методики;  $\mathcal{E}_2$  – врач функциональной диагностики, стаж 10 лет) выполнили независимые измерения с повтором через 2 недели. Воспроизводимость

оценивали с помощью коэффициента внутриклассовой корреляции, методики Блэнда–Альтмана. Сравнение групп – U критерий Манна–Уитни.

**Результаты.** GCSao у пациентов с расширением/аневризмой был статистически меньше, чем у добровольцев ( $-5,31 [7,56; 3,01]$  % против  $-8,79 [10,18; 6,40]$  %;  $U = 168$ ;  $p = 0,005$ ). Внутриоператорская воспроизводимость:  $ICC = 0,915$  ( $\mathcal{E}_1$ ) и  $0,913$  ( $\mathcal{E}_2$ ) – высокая. Межоператорская:  $ICC = 0,882$  (первое измерение) и  $0,897$  (второе) – хорошая/высокая. По Блэнду–Альтману средняя разница близка к 0, границы согласия узкие; единичные выбросы связаны с начальным этапом освоения методики.

**Заключение.** 2D STE позволяет воспроизводимо измерять GCSao и выявлять снижение деформации у пациентов с расширением/аневризмой грудной аорты. Методика перспективна для стратификации риска и мониторинга; необходимы исследования прогностических порогов и валидация в сравнении с МРТ.

# ULTRASONIC ASSESSMENT OF THORACIC AORTIC CONTRACTILITY USING 2D SPECKLE TRACKING

Ya.I. Valyuzenich<sup>1</sup>, A.S. Rudoy<sup>2</sup>, N.G. Khatsko<sup>3</sup>

Belarusian State Medical University, Minsk<sup>1</sup>

Republican Scientific and Practical Center "Cardiology", Minsk<sup>2</sup>

Main Military Clinical Medical Center of the Armed Forces of the Republic of Belarus, Minsk<sup>3</sup>

**Key words:** aorta, strain, speckle tracking, reproducibility, Bland-Altman, aortopathy.

**FOR REFERENCES.** Ya.I. Valyuzenich, A.S. Rudoy, N.G. Khatsko. Ultrasonic assessment of thoracic aortic contractility using 2d speckle tracking. *Neotlozhnaya kardiologiya i kardiovaskulyarnye riski* [Emergency cardiology and cardiovascular risks], 2025, vol. 9, no. 2, pp. 2580–2586.

**Aim.** To evaluate the applicability of two-dimensional speckle tracking echocardiography (2D STE) for quantitative assessment of global aortic circumferential strain (GCSao) and to study the intra- and inter-operator reproducibility of measurements, as well as the diagnostic value of this indicator in patients with thoracic aortic dilation/aneurysm compared with healthy volunteers.

**Methods.** The study included 51 healthy volunteers (aged 21 [20; 23] years) and 13 patients with an aortic diameter > 45 mm (aged 48 [36; 49] years). All subjects underwent standard transthoracic echocardiography (Vivid E90, M5SC D transducer, 1.5–4.5 MHz) with DICOM loop recording and subsequent offline analysis in EchoPAC PC v201. GCSao (%) was calculated using a previously proposed method. Two experts ( $E_1$  – the developer of the method;  $E_2$  – a physician specializing in functional diagnostics with 10-year work experience) performed independent measurements and repeated them 2 weeks later. Reproducibility

was assessed using the intraclass correlation coefficient, the Bland–Altman test. Group comparisons were performed using the Mann–Whitney U test.

**Results.** GCSao in patients with dilation/aneurysm was statistically lower than in volunteers ( $-5.31 [7.56; 3.01] \%$  versus  $-8.79 [10.18; 6.40] \%$ ;  $U = 168$ ;  $p = 0.005$ ). Intra-operator reproducibility:  $ICC = 0.915 (E_1)$  and  $0.913 (E_2)$  – high. Inter-operator reproducibility:  $ICC = 0.882$  (first measurement) and  $0.897$  (second) – good/high. According to Bland–Altman, the mean difference is close to 0, the limits of agreement are narrow; isolated outliers are associated with the initial stage of mastering the technique.

**Conclusion.** 2D STE allows for reproducible measurement of GCSao and detection of strain reduction in patients with thoracic aortic dilation/aneurysm. The technique is promising for risk stratification and monitoring; studies of prognostic thresholds and validation against MRI are needed.

## Введение

Диаметр грудной аорты остаётся основным параметром для планирования вмешательств и прогноза осложнений, однако он слабо отражает «тканевую патологию»:  $\approx 40\%$  пациентов с расслоением имеют диаметр ниже хирургических порогов. Это обуславливает поиск функциональных биомаркеров стенки – жёсткости/растяжимости и деформации. Двумерная спекл-трекинг эхокардиография обеспечивает полуавтоматическое отслеживание спеклов и позволяет количественно оценивать деформацию аорты при доступности и низкой стоимости.

Эхокардиография – это широко используемый метод визуализации аорты, оценки ее структуры и кровотока [1]. Кроме того, эхокардиография является частью комплексного обследования пациентов с аортопатиями и заболеванием аортального клапана, особенно в периоперационном периоде.

Текущие международные клинические руководства принимают диаметр грудной аорты в качестве предиктора осложнений и параметра для проведения плановых оперативных вмешательств [2, 3]. Патофизиологические изменения в стенке аорты не всегда могут проявляться формированием аневризмы, так и размер аневризмы не в полной мере отражает тяжесть «тканевой патологии» – приблизительно 40 % пациентов с расслоением имеют диаметр аорты ниже критериев, рекомендованных для хирургического вмешательства [4, 5, 6]. Следовательно, необходимы новые параметры для принятия хирургических решений по стратификации риска расслоения или разрыва, с учетом индивидуальных свойств ткани аорты пациента. Биомеханическая оценка сосудистой стенки может выявить новые физиологические свойства аорты [7].

Деформация аорты – изменение размеров ткани аорты после приложения силы или напряжения, является параметром, представляющим особый интерес. Для оценки

деформации аорты в настоящее время применяется ряд методик: расчетный метод (учитывающий диаметр аорты и показатели артериального давления), КТ, МРТ, УЗИ, двухмерная эхокардиография с отслеживанием спеклов.

Благодаря полуавтоматическому анализу покадрового отслеживания спеклов в интересующей области, двухмерная эхокардиография с отслеживанием спеклов (2D-STE) является перспективным недорогим портативным неинвазивным методом визуализации аорты.

Первоначально разработанный метод ультразвукового исследования, предназначенный для оценки функции желудочков (помимо фракции выброса и визуальной оценки), нашел свое применение при оценке других структур, включая аорту. Спекл-деформация, индекс смещения, отражает растяжение или деформацию. В 1997 году был представлен новый метод двухмерной эхокардиографии – speckle tracking эхокардиография (STE), который позволил оценить деформацию миокарда путем отслеживания локализованных акустических маркеров, в 2005 году продемонстрирована хорошая общая корреляция и степень согласия значений *in vitro* и *in vivo* [8]. В 2008 году выполнена попытка оценить возрастные изменения жесткости брюшного отдела аорты при помощи STE [9]. В экспериментальном исследовании, установлена сильная корреляция между значениями глобальной циркулярной деформации, полученными с помощью STE и значениями, полученными с помощью ультразвука на фантомах, имитирующих нисходящую аорту [10]. Нами предложен способ оценки сократимости грудной аорты при помощи STE [11]. Требуются исследования, подтверждающие «надежность» метода (воспроизводимость, чувствительность, специфичность) для различных групп, ведь высокая воспроизводимость измерений особенно важна, если предполагается использование значений показателя для прогноза, а также оценки динамики патологического процесса.

**Цель исследования.** 1) Сравнить GCSao у добровольцев и пациентов с расширением/аневризмой; 2) Оценить внутри и межоператорскую воспроизводимость GCSao; 3) Предварительно оценить диагностическую полезность GCSao.

### Методы

Обследован 51 доброволец, средний возраст которых составил 21 [20; 23] лет с нормальными показателями диаметра аорты 13 пациентов с диаметром аорты > 45 мм, средний возраст 48 [36; 49] лет. Всем пациентам выполнялось ультразвуковое исследование сердца (эхокардиографии) с синхронизированной регистрацией электрокардиограммы (на аппарате Vivid E90 GE (General Electric) с секторным фазированным датчиком M5SC-D (частота: 1,5–4,5 МГц) согласно протоколу, утвержденному приказом Министерства Здравоохранения Республики Беларусь «Об утверждении форм протоколов функциональных и ультразвуковых исследований пациентов кардиологического профиля» № 206 от 03.03.2009. Выполнение двумерной эхокардиографии с отслеживанием спекл-трекинга (2D-STE) для оценки глобальной циркулярной деформации аорты (GCSao, %) выполнялась по предложенной нами ранее методике [11]. Записи кино петель в формате DICOM сохранялись и обрабатывались на рабочей станции EchoPAC PC Version 201 (GE Healthcare, США). Расчет глобальной циркулярной деформации аорты выполняли два врача: автор способа ( $\mathcal{E}_1$ ) и врач функциональной диагностики (стаж 10 лет) ( $\mathcal{E}_2$ ).

Таблица 1.  
Характеристики  
исследуемых групп

Table 1.  
Characteristics  
of the study groups

Показатель / Indicator	Здоровые добровольцы / Healthy volunteers	Пациенты с расширением/аневризмой грудного отдела аорты / Patients with thoracic aortic dilation/aneurysm
пол м/ж / sex m/f	51	11/2
Возраст / age	21 [20: 23]	48 [36: 49]
диаметр аорты на уровне синусов Вальсальвы, мм / aortic diameter at the level of the Valsalva sinuses, mm	31 [30: 33]	49 [47: 53]
GCSao, %	-8,79 [10,18; 6,40]	-5,31 [7,56; 3,01]

Два эксперта провели измерения сначала одновременно по времени ( $\mathcal{E}_1\mathcal{I}_1$ ,  $\mathcal{E}_2\mathcal{I}_1$ ) и спустя две недели для оценки внутриоператорской воспроизводимости. Для определения межоператорской воспроизводимости сравнили значения  $\mathcal{E}_1$  с полученными при независимом измерении  $\mathcal{E}_2$ .

Рассчитывали коэффициент внутригрупповой корреляции (англ. intraclass correlation coefficient, ICC). Значение  $ICC \leq 0,69$  соответствует низкой воспроизводимости,  $0,70–0,79$  – средней,  $0,80–0,89$  – хорошей,  $0,90–0,99$  – высокой [12]. Для визуализации оценки воспроизводимости использовали метод Блэнда-Альтмана [13]. Критерий Колмогорова-Смирнова использовался для оценки распределения непрерывных переменных. Переменные с ненормальным распределением выражали как медиану и межквартильный размах, а группы сравнивали с помощью критерия Манна-Уитни. Для оценки силы связи показателей применяли коэффициент корреляции Пирсона. Для определения статистической значимости различий парных (повторных) измерений применяли парный t-критерий Стьюдента.

Оценка чувствительности (SE) и специфичности (SP) УЗИ методов проводилась на основе ROC анализа. Производилась визуальная оценка ROC-кривых, расчет показателей чувствительности и специфичности, а также определение площади под ROC-кривыми. Значение  $p < 0,05$  в двусторонних тестах считалось статистически значимым. Все расчеты и анализ данных проводились с использованием пакетов статистического программного обеспечения.

### Результаты

Характеристика выборок. Клиническая характеристика пациентов представлена в таблице 1. Между исследуемыми группами выявлены статистически значимые различия по основным параметрам ( $p < 0,05$ ). Значения GCSao у пациентов с расширением/аневризмой грудного отдела аорты были достоверно ниже по сравнению со здоровыми добровольцами ( $U = 168$ ;  $p = 0,005$ ).

Результаты расчета показателей воспроизводимости представлены в таблице 2. Проверка гипотезы об однородности результатов расчетов GCSao показала их совпадения, следует отметить лишь некоторое смещение межэкспертной воспроизводимости при первом измерении, что можно объяснить тем, что  $\mathcal{E}_2$  выполнял исследование впервые. Указанная тенденция нивелировалась во втором измерении ( $\mathcal{E}_{12}–\mathcal{E}_{22}$ ), необходимо предварительное обучение врачей правилам расчетов GCSao.

Таблица 2.  
Результаты  
расчета показателей  
воспроизводимости

Table 2.  
Results of reproducibility  
calculation

	Внутриэкспертная воспроизводимость / Intra-operator reproducibility		Межэкспертная воспроизводимость / Inter-operator reproducibility	
	Первый эксперт / Expert One	Второй эксперт / Expert Two	Первое измерение / Measure One	Второе измерение / Measure Two
ICC	0,915	0,913	0,882	0,897
r*	0,844	0,842	0,790	0,825
p**	0,206	0,271	0,107	0,649

Примечание: \* значения парного коэффициента корреляции Пирсона, \*\* – p-значения t-критерия Стьюдента.

Note: \* are the values of the paired Pearson correlation coefficient, \*\* are the p-values of the Student's t-test.

Коэффициент внутриэкспертной воспроизводимости для Э1 и Э2 составил 0,915 и 0,913 соответственно, что указывает на высокую согласованность измерений. Межэкспертная воспроизводимость показала хорошие значения: ICC = 0,882 при первом измерении и ICC = 0,897 при втором.

Для визуальной оценки согласия между измерениями использован метод Блэнда-Альтмана (рисунок 1).

Большинство точек данных расположено в пределах границ согласованности, а средняя разница близка к нулю, что свидетельствует о хорошем согласии между измерениями. Узкие границы согласованности указывают на отсутствие систематического смещения. Единичные значения, выходящие за пределы границ, вероятно отражают выбросы или ошибки измерений, что может быть связано с начальным этапом освоения методики.

Для оценки диагностической возможности GCSao в оценке нормальной сократимости аорты выполнен ROC-анализ с построением ROC кривой (рисунок 2). Площадь под кривой составила 0,768 (хорошее качество модели), чувствительность GCSao составила 86%, а специфичность – 67% (значения порога отсечения 0,45).

## Обсуждение

В настоящем исследовании оценены внутри- и межоператорская воспроизводимость измерений глобальной циркулярной деформации аорты (GCSao) методом 2D speckle tracking, а также межгрупповые различия между пациентами с расширением/аневризмой грудной аорты и здоровыми добровольцами. Полученные значения ICC указывают на высокую внутриоператорскую и хорошую/вы-

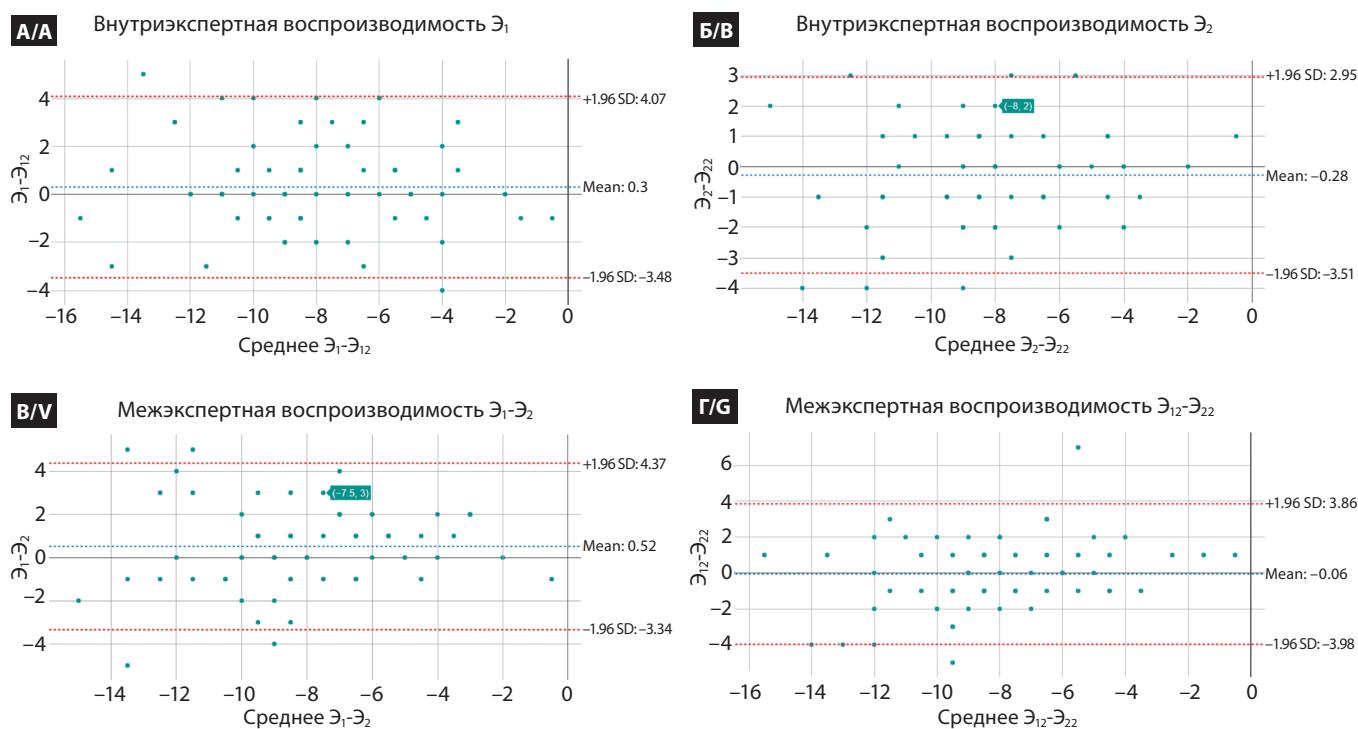
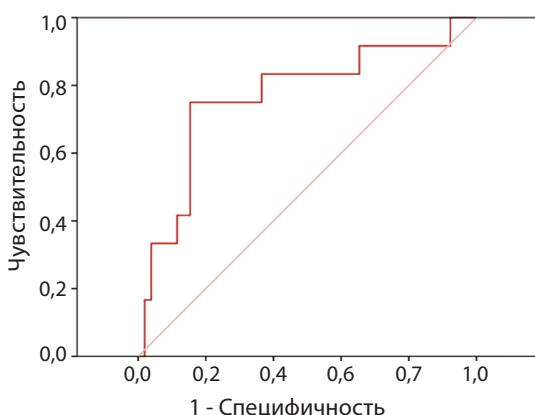


Рисунок 1. График Блэнда-Альтмана: А – внутриэкспертная воспроизводимость Э1, Б – внутриэкспертная воспроизводимость Э2, В – межэкспертная воспроизводимость первого измерение Э1-Э2, Г – межэкспертная воспроизводимость второе измерение Э12-Э22

Figure 1. Bland-Altman plot: A – intra-operator reproducibility of E1, B – intra-operator reproducibility of E2, V – inter-operator reproducibility of the first measurement E1-E2, G – inter-operator reproducibility of the second measurement E12-E22

Рисунок 2.  
Чувствительность  
и специфичность GCSao  
в оценке нормальной  
сократимости аорты

Figure 2.  
Sensitivity  
and specificity of GCSao  
in assessing normal  
aortic contractility



сокую межоператорскую согласованность, что подтверждается анализом Блэнда–Альтмана (средняя разность близка к нулю, узкие границы согласия, единичные выбросы на этапе освоения методики). Как и ожидалось, внутриоператорская воспроизводимость превысила межоператорскую, подчёркивая важность стандартизированного обучения и унификации трассировки контура. Клинически значимо, что GCSao был ниже у пациентов с расширением/аневризмой, что отражает снижение циркулярной деформации стенки и дополняет геометрический критерий диаметра как функциональный биомаркер «тканевой патологии». Учитывая доступность и портативность СТЭ по сравнению с МРТ, методика представляется перспективной для стратификации риска и динамического наблюдения; вместе с тем требуются многоцентровая валидация, согласование с МРТ-показателями (feature-tracking, растяжимость/жёсткость) и определение прогностических порогов GCSao.

В настоящее время показания к плановому вмешательству на аорте в основном определяются максимальным диаметром сосуда, морфологией аортального клапана и наличием патологии соединительной ткани. Однако многочисленные исследования показали, что диаметр не всегда является адекватным предиктором катастрофических событий: расслоение может развиваться и при меньших размерах аорты. В связи с этим актуален поиск новых прогностических маркеров на основе неинвазивных методов визуализации. Уже опубликованные данные свидетельствуют о том, что показатели жёсткости и деформации аорты могут служить дополнительными биомаркерами, позволяющими дифференцировать различные типы аневризм и оценивать риск осложнений.

Жёсткость аорты ранее рассматривалась как потенциальный фактор риска расслоения, особенно у пациентов с двустворчатым аортальным клапаном (ДАК) или наследственной патологией соединительной ткани, традиционно относимых к группе повышенного риска [14, 15, 16, 17].

Пациенты с ДАК демонстрировали повышенную жесткость по сравнению с контрольной группой соответствующего возраста и диаметра аорты [18]. Положительную корреляцию между диаметром аорты и индексом жесткости у пациентов с ДАК выявил Nistri с соавт [2]. Значительное повышение продольной жесткости установлено для пациентов с ДАК [19].

Пациенты с синдромом Марфана (СМ), синдромом Лойса–Дитца, синдромом Элерса–Данлоса и недифференцированными заболеваниями соединительной ткани с повышенной жесткостью корня аорты, изменившейся при помощи МРТ, чаще подвергались хирургическому вмешательству на аорте и имели более высокие показатели дилатации корня аорты [4]. Исследование, в котором изучались 116 взрослых пациентов СМ и 144 пациента контрольной группы выявило отчетливую разницу в жесткости аорты, полученную на основе измерений скорости пульсовой волны, между этими двумя группами [20]. Более высокая жесткость корня была связана с повышенным риском неблагоприятных клинических исходов у пациентов с СМ (от 6 месяцев до 25 лет) [21]. Мы предполагаем, что повышение жесткости аорты может играть важную роль в прогнозировании расслоения аорты у пациентов с расширенной восходящей аортой из группы риска наследственных аортопатий.

Повышенная жесткость аорты определяется у пациентов с расслоением аорты, но не повышена у пациентов без расслоения, при одинаковых диаметрах аорты независимо от морфотипа клапана [22].

Большой интерес представляет то, как специфическая для слоев клеточная биоактивность, матричная микроархитектура и напряжение кислорода предположительно оказывают различное влияние на жесткость аорты и остаются в центре внимания текущей работы нашей команды [23, 24].

Дальнейшие исследования в этом направлении необходимы для установления механизмов, связанных со структурой и функцией аорты, лежащих в основе аортальной биомеханики.

## Заключение

1. Впервые изучены внутриоператорская и межоператорская воспроизводимость измерений глобальной циркулярной деформации аорты (GCSao) методом 2D speckle tracking.

2. У пациентов с расширением/аневризмой грудного отдела аорты значения GCSao были достоверно ниже по сравнению со здоровыми добровольцами ( $p = 0,005$ ), что отражает снижение циркулярной сократимости стенки.

3. Показатели межоператорской воспроизводимости при первом исследовании были несколько ниже, но не имели статистически значимых различий.

4. Внутриоператорская воспроизводимость оказалась высокой ( $ICC > 0,90$ ), межоператорская – хорошей/высокой ( $ICC \approx 0,88 - 0,90$ ); систематического смещения между экспертами не выявлено.

5. Согласно данным ROC-анализа, площадь под кривой составила 0,768 (хорошее качество модели), чувствительность GCSao составила 86%, а специфичность – 67% (значения порога отсечения 0,45).

6. Высокая воспроизводимость показателя GCSao важна для применения его в качестве предиктора последующего расслоения грудной аорты.

7. Снижение GCSao может рассматриваться как дополнительный функциональный биомаркер «тканевой патологии» аорты

и использоваться наряду с диаметром для стратификации риска и выбора сроков хирургического вмешательства.

8. Полученные данные являются шагом к созданию многопараметрического инструмента прогнозирования риска осложнений при аортопатиях, включающего морфометрические и функциональные показатели стенки аорты.

#### Источник финансирования

Работа выполнена в рамках подпрограммы «Кардиология и кардиохирургия» ГНТП «Научно-техническое обеспечение качества и доступности медицинских услуг», 2021–2025 годы. Задание 01.02. «Разработать и внедрить методы диагностики, лечения и медицинской профилактики разрыва (расслоения) наследственных аневризм грудной аорты».

#### Конфликт интересов

Коллектив авторов заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### REFERENCES

1. Ohyama Y., Redheul A., Kachenoura N. et al. Imaging Insights on the Aorta in Aging. *Circulation Cardiovascular Imaging*. 2018, vol. 11(4), e005617. doi: 10.1161/circimaging.117.005617.
2. Boodhwani M., Andelfinger G., Leipsic J. et al. Canadian Cardiovascular Society Position Statement on the Management of Thoracic Aortic Disease. *Canadian Journal of Cardiology*. 2014, vol. 30(6), pp. 577–589. doi: 10.1016/j.cjca.2014.02.018.
3. Hiratzka L.F., Bakris G.L., Beckman J.A. et al. 2010 ACCF/AHA/AATS/ACR/ASA/SCAI/SIR/STS/SVM Guidelines for the Diagnosis and Management of Patients with Thoracic Aortic Disease. *Circulation*. 2010, vol. 121(13), E43. doi: 10.1161/cir.0b013e3181d4739e
4. Pape L.A., Tsai T.T., Isselbacher E.M. et al. Aortic Diameter  $\geq 5.5$  cm Is Not a Good Predictor of Type A Aortic Dissection. *Circulation*. 2007, vol. 116(10), pp. 1120–1127. doi: 10.1161/circulationaha.107.702720.
5. Chau K.H., Elefteriades J.A. Natural History of Thoracic Aortic Aneurysms: Size Matters, Plus Moving Beyond Size. *Progress in Cardiovascular Diseases*. 2013, vol. 56(1), pp. 74–80. doi: 10.1016/j.pcad.2013.05.007.
6. Martufi G., Forneris A., Appoo J.J., Di Martino E.S. Is There a Role for Biomechanical Engineering in Helping to Elucidate the Risk Profile of the Thoracic Aorta? *The Annals of Thoracic Surgery*. 2016, vol. 101(1), pp. 390–398. doi: 10.1016/j.athoracsur.2015.07.028.
7. Choudhury N., Bouchot O., Rouleau L. et al. Local mechanical and structural properties of healthy and diseased human ascending aorta tissue. *Cardiovascular Pathology*. 2009, vol. 18(2), pp. 83–91. doi: 10.1016/j.carpath.2008.01.001.
8. Korinek J., Wang J., Sengupta P.P. et al. Two-Dimensional Strain-A Doppler-Independent Ultrasound Method for Quantitation of Regional Deformation: Validation In Vitro and In Vivo. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2005, 18(12), pp. 1247–1253. doi: 10.1016/j.echo.2005.03.024.
9. Oishi Y., Mizuguchi Y., Miyoshi H. et al. A novel approach to assess aortic stiffness related to changes in aging using a two-dimensional strain imaging. *Echocardiography*. 2008, vol. 25(9), pp. 941–945. doi: 10.1111/j.1540-8175.2008.00725.x.
10. Petrini J., Eriksson M.J., Caiahl K., Larsson M. Circumferential strain by velocity vector imaging and speckle-tracking echocardiography: validation against sonomicrometry in an aortic phantom. *Clinical Physiology and Functional Imaging*. 2017, vol. 38(2), pp. 269–277. doi: 10.1111/cpf.12410.
11. Rudy A.S., Bova A.A., Valyuzhenich Ya.I. et al. The first experience of applying 2D speckle-tracking echocardiography to assess the contractility of the thoracic aorta in the Republic of Belarus. *Meditinskie novosti* [Medical news]. 2019, vol. 4, pp. 42–45. (in Russian).
12. Kotz S., Read C.B., Balakrishnan N., Vidakovic, B. eds. Encyclopedia of Statistical Sciences. *Encyclopedia of Statistical Sciences*. 2004. doi: 10.1002/0471667196.
13. Bland J.M., Altman D.G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*. 1986, vol. 327(8476), pp. 307–310. doi: 10.1016/s0140-6736(86)90837-8.
14. Baumgartner D., Baumgartner C., Mátýás G. et al. Diagnostic power of aortic elastic properties in young patients with Marfan syndrome. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2005, vol. 129(4), pp. 730–739. doi: 10.1016/j.jtcvs.2004.07.01.
15. Nistri S., Grande-Allen J., Noale M. et al. Aortic elasticity and size in bicuspid aortic valve syndrome. *European Heart Journal*. 2008, vol. 29(4), pp. 472–479. doi: 10.1093/eurheartj/ehm528.
16. Jeremy R.W., Huang H., Hwa J. et al. Relation between age, arterial distensibility, and aortic dilatation in the Marfan syndrome. *The American Journal of Cardiology*. 1994, vol. 74(4), pp. 369–373. doi: 10.1016/0002-9149(94)90405-7.
17. Prakash A., Adlakha H., Rabideau, N. et al. Segmental Aortic Stiffness in Children and Young Adults with Connective Tissue Disorders. *Circulation*. 2015, vol. 132(7), pp. 595–602. doi: 10.1161/circulationaha.114.014934.
18. Moaref A., Khavani M., Shekarforoush, S. Aortic distensibility in bicuspid aortic valve patients with normal aortic diameter. *Therapeutic Advances in Cardiovascular Disease*. 2014, vol. 8(4), pp. 128–132. doi: 10.1177/1753944714531062.
19. Chung J.C.-Y., Wong E., Tang M. et al. Biomechanics of Aortic Dissection: A Comparison of Aortas Associated With Bicuspid and Tricuspid Aortic Valves. *Journal of the American Heart Association*. 2020, vol. 9(15), e016715. doi: 10.1161/jaha.120.016715.
20. Selamet Tierney E.S., Levine J.C., Sleeper L.A. et al. Influence of Aortic Stiffness on Aortic-Root Growth Rate and Outcome in Patients With the Marfan Syndrome. *The American Journal of Cardiology*. 2018, vol. 121(9), pp. 1094–1101. doi: 10.1016/j.amjcard.2018.01.016.
21. Selamet Tierney E.S., Levine J.C., Sleeper L.A. et al. Influence of Aortic Stiffness on Aortic-Root Growth Rate and Outcome in Patients With the Marfan Syndrome. *The American Journal of Cardiology*. 2018, vol. 121(9), pp. 1094–1101. doi: 10.1016/j.amjcard.2018.01.016.
22. Fortunato R.N., Huckaby L.V., Emerel L.V. et al. (2024). The predictive capability of aortic stiffness index for aortic dissection among dilated ascending aortas. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2024, vol. 167(6), pp. 2015–2024. doi: 10.1016/j.jtcvs.2022.09.003.
23. Billaud M., Hill J.C., Richards T.D. et al. Medial Hypoxia and Adventitial Vasa Vasorum Remodeling in Human Ascending Aortic Aneurysm. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2018, vol. 5, pp. 124. doi: 10.3389/fcm.2018.00124.
24. Phillipi J.A., Green B.R., Eskay M.A. et al. Mechanism of aortic medial matrix remodeling is distinct in patients with bicuspid aortic valve. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2014, vol. 147(3), pp. 1056–1064. doi: 10.1016/j.jtcvs.2013.04.028.

Поступила 25.08.2025