

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

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЦЕНКА СОКРАТИМОСТИ ГРУДНОГО ОТДЕЛА АОРТЫ МЕТОДОМ 2D SPECKLE TRACKING

Я.И. Валюженич¹, А.С. Рудой², Н.Г. Хотько³

УО «Белорусский государственный медицинский университет» г. Минск¹

ГУ «Республиканский научно-практический центр «Кардиология», г. Минск²

ГУ «432 ордена Красной Звезды главный военный клинический медицинский центр Вооруженных Сил Республики Беларусь», г. Минск³

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 M55C D, 1,5–4,5 МГц) с записью DICOM петель и последующим офлайн анализом в EchoPAC PC v201. GCSao (%) рассчитывали по предложенной ранее методике. Два эксперта (Э₁ – разработчик методики; Э₂ – врач функциональной диагностики, стаж 10 лет) выполнили независимые измерения с повтором через 2 недели. Воспроизводимость

оценивали с помощью коэффициента внутриклассовой корреляции, методики Блэнда–Альмана. 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 (Э₁) и 0,913 (Э₂) – высокая. Межоператорская: ICC = 0,882 (первое измерение) и 0,897 (второе) – хорошая/высокая. По Блэнду–Альману 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. Valyuzenich¹, A.S. Rudoy², N.G. Khatsko³

Belarusian State Medical University, Minsk¹

Republican Scientific and Practical Center “Cardiology”, Minsk²

Main Military Clinical Medical Center of the Armed Forces of the Republic of Belarus, Minsk³

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 v201. GCSao (%) was calculated using a previously proposed method. Two experts (E₁ – the developer of the method; E₂ – 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 (E₁) and 0.913 (E₂) – 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»: ≈ 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]. Патологические 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, двумерная эхокардиография с отслеживанием спеклов.

Благодаря полуавтоматическому анализу кадрового отслеживания спеклов в интересующей области, двумерная 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 двумерной 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]. Требуется исследование, 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 кинопетель 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 (Θ_1) и врач функциональной диагностики (стаж 10 лет) (Θ_2).

сокой [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 ($U = 168$; $p = 0,005$).

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 (Θ_{1i} , Θ_{2i}) и спустя две недели для оценки внутриоператорской воспроизводимости. Для определения межоператорской воспроизводимости сравнили значения Θ_1 с полученными при независимом измерении Θ_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 – вы-

Результаты расчета показателей воспроизводимости представлены в таблице 2. Проверка гипотезы об однородности результатов расчетов GCSao показала их совпадение, следует отметить лишь некоторое смещение межэкспертной воспроизводимости при первом измерении, что можно объяснить тем, что Θ_2 выполнял исследование впервые. Указанная тенденция нивелировалась во втором измерении (Θ_{12} - Θ_{22}), необходимо предварительное обучение врачей правилам расчетов GCSao.

Таблица 2.
Результаты
расчета показателей
воспроизводимостиTable 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, ** – р-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-

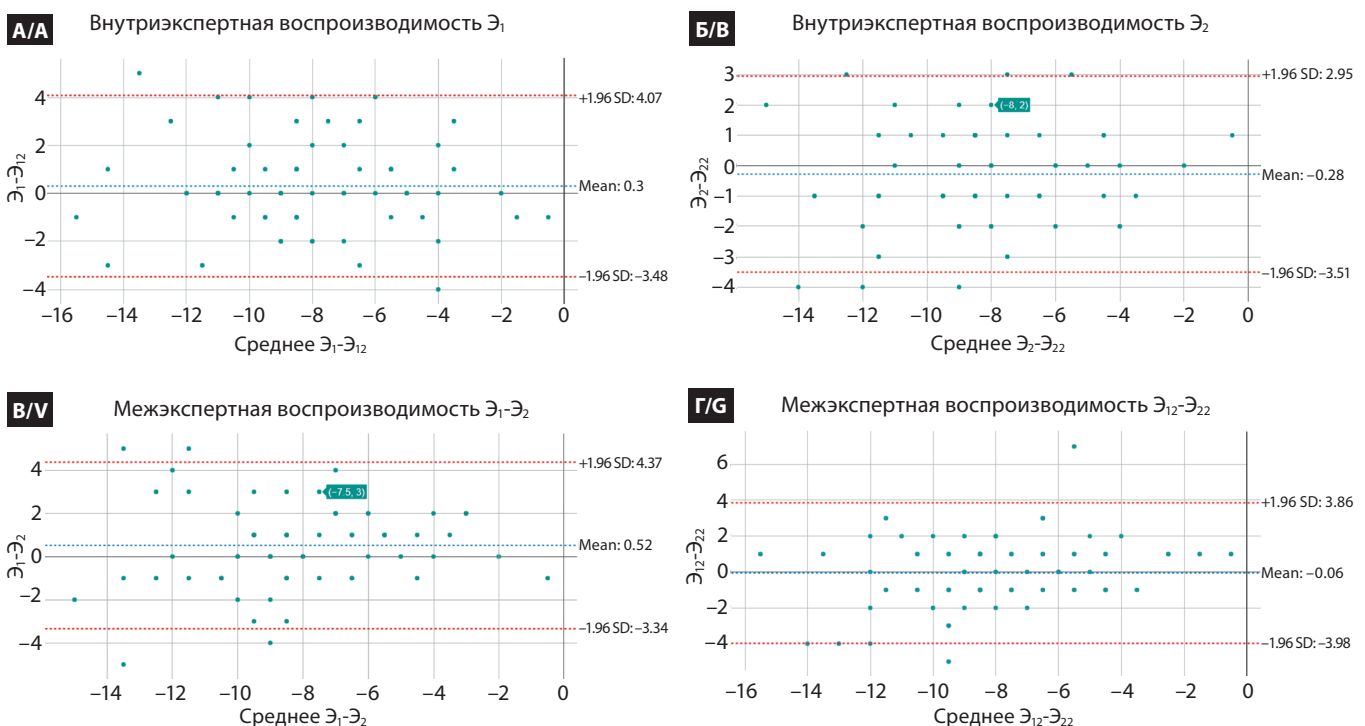
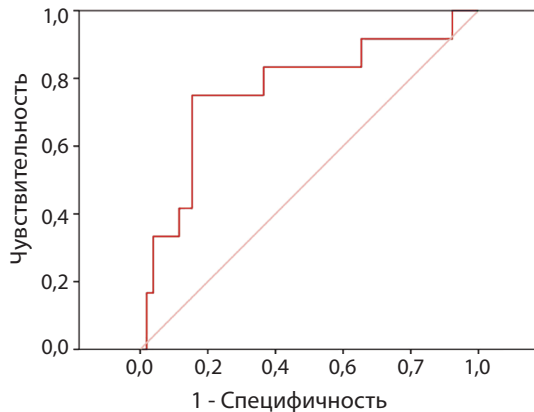


Рисунок 1. График Блэнда-Альтмана: А – внутриэкспертная воспроизводимость Э1, Б – внутриэкспертная воспроизводимость Э2, В – межэкспертная воспроизводимость первое измерение Э1-Э2, Г – межэкспертная воспроизводимость второе измерение Э12-Э22

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/жесткость) 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 жесткости и деформации аорты могут служить дополнительными биомаркерами, позволяющими дифференцировать различные типы аневризм и оценивать риск осложнений.

Жесткость 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, измеренной 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 ≈ 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

- Ohyama Y., Redheuil 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.
- 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.
- Hiratzka L.F., Bakris G.L., Beckman J.A. et al. 2010 ACCF/AHA/AAA/ASA/SCA/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
- Pape L.A., Tsai T.T., Isselbacher E.M. et al. Aortic Diameter ≥ 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Petrini J., Eriksson, M.J., Caidahl, 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.
- Rudoy 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. *Meditsinskie novosti* [Medical news]. 2019, vol. 4, pp. 42–45. (in Russian).
- Kotz S., Read C.B., Balakrishnan N., Vidakovic, B. eds. Encyclopedia of Statistical Sciences. *Encyclopedia of Statistical Sciences*. 2004. doi: 10.1002/0471667196.
- 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.
- Baumgartner D., Baumgartner C., Mátyás 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.2004.07.011.
- 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.
- 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.
- Prakash A., Adlakhia 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.
- Moaref, A., Khavanin, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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/fcvm.2018.00124.
- Phillippi 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.