



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1228>

Особенности эластических свойств дилатированной и аневризматически расширенной грудной аорты по данным ЭКГ-синхронизированной КТ-ангиографии

© Сазонова С.И.*, Саушкин В.В., Панфилов Д.С., Варламова Ю.В., Шипулин В.В., Базарбекова Б.А., Завадовский К.В., Козлов Б.Н.

НИИ кардиологии Томского Национального исследовательского медицинского центра РАН; 634012 Томск, ул. Киевская, 111А, Российская Федерация

Цель исследования: сопоставить показатели эластичности грудной аорты, определенные по данным ЭКГ-синхронизированной КТ-ангиографии, у пациентов с аневризмой и дилатацией восходящего отдела.

Материал и методы. В исследование было включено 20 пациентов с дилатацией восходящей аорты ($40 \text{ мм} \leq \text{максимальный диаметр аорты } (D_{\text{max}}) < 50 \text{ мм}$) (подгруппа 1а), 30 больных с несиндромными аневризмами восходящей аорты ($n = 30, D_{\text{max}} \geq 50 \text{ мм}$) (подгруппа 1б), а также 19 больных с нормальными размерами сосуда ($D_{\text{max}} < 40 \text{ мм}$) в качестве контроля (группа 2). Всем пациентам была выполнена мультиспиральная компьютерно-томографическая ангиография аорты в ЭКГ-синхронизированном режиме (ЭКГ_{синхр.}-КТ). На различных уровнях грудной аорты измеряли максимальный систолический и диастолический диаметр сосуда (D_{max}) с последующим расчетом разницы между ними и индексов циркулярной деформации (CS), комплаенса, жесткости (Stiff), растяжимости стенки (для всех уровней), продольной деформации (LS).

Результаты. По результатам анализа была выявлена умеренная отрицательная корреляционная взаимосвязь между возрастом пациентов и CS на всех уровнях грудной аорты ($r_{\text{max}} = -0,33, r_{\text{min}} = -0,41$). Подгруппы 1а и 1б по всем показателям значимо не различались. От группы контроля подгруппа 1а отличалась ($p < 0,05$) по Stiff на уровне фиброзного кольца (ФК) аортального клапана ($0,07 [-0,14; 0,15]$ vs $-0,04 [-0,1; 0,06]$), а также CS на уровне ФК и синусов Вальсальвы (СВ) ($0,49 [-2,94; 3,36]$ vs $-1,18 [-4,51; 3,87]$), а подгруппа 1б – по CS на уровне СВ ($3,73 [0,24; 6,56]$ vs $0,13 [-1,42; 3,04]$) и проксимального отдела нисходящей аорты (дистальнее устья левой подключичной артерии) ($5,48 [1,27; 8,40]$ vs $1,97 [-0,32; 6,08]$), также по LS ($5,96 [-8,98; 9,25]$ vs $-2,58 [-7,75; 1,89]$) на уровне дуги аорты.

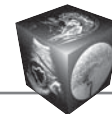
Заключение. По данным ЭКГ_{синхр.}-КТ-ангиографии показатели эластичности грудной аорты у пациентов с аневризмой и дилатацией восходящего отдела не различаются. По сравнению с группой контроля у больных с аневризмой восходящего отдела аорты отмечается увеличение пульсовой деформации в недилатированной зоне (дуге аорты).

Ключевые слова: грудная аорта, аневризма, ЭКГ-синхронизированная КТ-ангиография, эластичность

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Сазонова С.И., Саушкин В.В., Панфилов Д.С., Варламова Ю.В., Шипулин В.В., Базарбекова Б.А., Завадовский К.В., Козлов Б.Н. Особенности эластических свойств дилатированной и аневризматически расширенной грудной аорты по данным ЭКГ-синхронизированной КТ-ангиографии. *Медицинская визуализация*. 2023. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1228>

Поступила в редакцию: 01.07.2022. Принята к печати: 03.10.2022. Опубликовано online: 15.06.2023.



Elastic properties of aorta with respect to its dilatation vs aneurysm according to ECG-synchronized CT-angiography

© Svetlana I. Sazonova*, Viktor V. Saushkin, Dmitry S. Panfilov, Yuliya V. Varlamova, Vladimir V. Shipulin, Botazhan A. Bazarbekova, Konstantin V. Zavadovsky, Boris N. Kozlov

Cardiology research Institute, Tomsk National medical research Center of the Russian Academy of Sciences; 111A, Kievskaya str., Tomsk 634012, Russian Federation

Purpose: to compare the indicators of elasticity of the thoracic aorta, determined by ECG-Gated-CT angiography, in patients with ascending aortic aneurysm and dilatation.

Materials and methods. The study included 20 patients with dilatation of the ascending aorta (40 mm < maximum aortic diameter (D_{max}) < 50 mm) (group 1a), 30 patients with non-syndromic aneurysms of the ascending aorta ($n = 30$, $D_{max} \geq 50$ mm) (group 1b), as well as 19 patients with normal aortic sizes ($D_{max} < 40$ mm) as controls (group 2). All patients underwent multispiral computed tomography angiography of the aorta in ECG-Gated mode (ECG-Gated -CT). Maximum systolic and diastolic aortic diameters (D_{max}) were measured at different levels of the thoracic aorta, followed by calculation of the difference between them and calculation of the circular deformation (CS), compliance, stiffness (Stiff), wall distensibility, longitudinal deformation (LS).

Results. Moderate negative correlation between the age of the patients and CS at all levels of the thoracic aorta ($r_{maximum} = -0.33$, $r_{minimum} = -0.41$) was revealed. Groups 1a and 1b did not differ significantly in all parameters. Group 1a differed from the control group ($p < 0.05$) in Stiff at the level of the aortic annulus (AA) (0.07 [-0.14; 0.15] vs -0.04 [-0.1; 0.06]), as well as CS at the level of AA and sinuses of Valsalva (SV) (0.49 [-2.94; 3.36] vs -1.18 [-4.51; 3.87]), and group 1b – in CS at the level of SV (3.73 [0.24; 6.56] vs 0.13 [-1.42; 3.04]) and proximal part of the descending aorta (distal to the left subclavian artery) (5.48 [1.27; 8.40] vs 1.97 [-0.32; 6.08]), also in LS (5.96 [-8.98; 9.25] vs -2.58 [-7.75; 1.89]) at the level of the aortic arch.

Conclusion. According to ECG-Gated-CT angiography, the indicators of elasticity of the thoracic aorta in patients with ascending aortic aneurysm and dilatation did not differ. Compared with the control group, patients with aneurysm of the ascending aorta showed an increased pulse deformity of the non-dilated aortic arch.

Keywords: thoracic aorta, aneurysm, ECG-Gated CT angiography, elasticity

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Sazonova S.I., Saushkin V.V., Panfilov D.S., Varlamova Yu.V., Shipulin V.V., Bazarbekova B.A., Zavadovsky K.V., Kozlov B.N. Elastic properties of aorta with respect to its dilatation vs aneurysm according to ECG-synchronized CT-angiography. *Medical Visualization*. 2023. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1228>

Received: 01.07.2022.

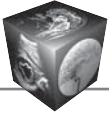
Accepted for publication: 03.10.2022.

Published online: 15.06.2023.

Введение

Аневризма является распространенной патологией аорты и занимает 13-е место среди причин смертности населения в развитых странах [1]. Более чем в 60% случаев патологическое расширение затрагивает восходящий отдел сосуда и начальный отдел его дуги. На сегодняшний день опубликовано достаточно большое количество исследований, направленных на изучение этиологии аневризмы грудной аорты (АГА), а также на поиск причин, приводящих к прогрессированию заболевания и возникновению ассоциированных с ним жизнеугрожающих осложнений, таких как диссекция и разрыв [2–5].

В настоящее время оперативное вмешательство у пациентов с несиндромными АГА показано при достижении диаметра аорты 55 мм и более или если скорость его увеличения превышает 0,5 см/год [6, 7]. В то же время установлено, что большое количество случаев аортоассоциированных событий возникает у больных с диаметром аорты менее 55 мм [8, 9]. Несмотря на большое количество исследований, посвященных вопросам лечения АГА, до сих пор не достигнут консенсус, регламентирующий тактику ведения пациентов, имеющих погранично расширенные сегменты аорты (менее 50 мм). В связи с этим актуальным является выявление новых маркеров, позволяю-



щих улучшить стратификацию риска больных с АГА и оптимизировать выбор между хирургической и терапевтической стратегиями их лечения.

Известно, что ранними проявлениями морфологической перестройки стенки аорты в ответ на увеличение механической нагрузки является повышение ее жесткости и снижение эластичности [10]. Эти характеристики могут быть оценены *in vivo* различными лучевыми методами исследования, к числу которых относится мультиспиральная компьютерно-томографическая ангиография (МСКТ-ангиография), выполненная с применением ЭКГ-синхронизации изображений [11, 12].

Мы предположили, что КТ-показатели, отражающие эластико-тоническое состояние стенки аорты, различаются у больных с аневризматически расширенной, дилатированной и неизменной восходящей аортой. В то же время в доступной литературе нами не найдено исследований, выполненных в данном направлении.

Цель исследования

Сопоставление показателей эластичности грудной аорты по данным ЭКГ-синхронизированной МСКТ-ангиографии у пациентов с аневризмой и дилатацией восходящего отдела, а также у лиц с неизменной аортой.

Материал и методы

В исследование проспективно было включено 50 пациентов с несиндромными аневризмами и дилатацией восходящей аорты (33 мужчины, медиана возраста 62,0 [53,5; 69,0] года, максимальный диаметр восходящего отдела сосуда по данным трансторакальной эхокардиографии (D_{Ao}) ≥ 40 мм) (группа 1), находившихся на обследовании и лечении в НИИ кардиологии Томского НИМЦ с 2020–2022 гг. Клиническая характеристика пациентов представлена в табл. 1.

Критерии включения: возраст 45–70 лет, максимальный диаметр восходящего отдела аорты по данным трансторакальной эхокардиографии (ТТ-ЭхоКГ) ≥ 40 мм, несиндромные заболевания аорты (идиопатические, семейные), нормальная глобальная сократительная функция левого желудочка (ЛЖ), согласие на участие в исследовании.

Критерии исключения: сердечная недостаточность выше III функционального класса (ФК) по NYHA, перенесенные инфаркт миокарда или инсульт, нарушения ритма сердца, дилатация ЛЖ, предшествующие операции на сердце и аорте, резистентная к медикаментозной терапии артериальная гипертензия, врожденные пороки сердца, синдромные заболевания аорты (синдромы:

Тернера, Марфана, Элерса–Данло, Лойеса–Дитца, другие генетические аномалии), аллергия на йодсодержащие лекарственные средства, отказ от участия в исследовании.

Кроме того, в исследовании была использована группа контроля ($n = 19$, 15 мужчин, медиана возраста 65,5 [62,0; 70,0] года) (группа 2), в которую вошли пациенты без расширения аорты, проходившие КТ-коронарографию с целью исключения обструктивного атеросклеротического поражения коронарных артерий. При регистрации изображений в контрастную фазу верхнюю границу области сканирования устанавливали на уровне верхушек легких.

Критериями включения в исследование для пациентов группы контроля являлись: возраст 45–70 лет, максимальный диаметр восходящего отдела грудной аорты менее 40 мм по данным ТТ-ЭхоКГ, нормальная глобальная сократительная функция ЛЖ, согласие на участие в исследовании.

Критериями исключения из исследования для данных пациентов были: обструктивное и необструктивное атеросклеротическое поражение коронарных артерий, сердечная недостаточность выше III ФК по NYHA, перенесенные инфаркт миокарда или инсульт, нарушения ритма сердца, бicuspidальный аортальный клапан, врожденные пороки сердца, предшествующие операции на сердце и аорте, сахарный диабет, резистентная к медикаментозной терапии артериальная гипертензия, отказ от участия в исследовании.

Исследование было одобрено локальным этическим комитетом НИИ кардиологии Томского НИМЦ (протокол № 213 от 12.05.2021) и проведено в соответствии с этическими нормами, изложенными в Хельсинкской декларации с пересмотром 2008 г.

ЭКГ-синхронизированная МСКТ-ангиография аорты

Для вычисления показателей деформации и размеров грудной аорты всем пациентам была выполнена МСКТ органов грудной клетки с контрастированием. Запись исследования проводилась на кардиологической гибридной системе Discovery NM/CT 570C (GE Healthcare), оснащенной рентгеновским компьютерным томографом с 64 рядами детекторов. Для контрастирования грудной аорты использовали йодсодержащее рентгеноконтрастное средство с концентрацией йода 370–400 мг йода/мл в дозе 1 мл/кг со скоростью 4–5,5 мл/с. Сканирование проводилось в ретроспективном режиме ЭКГ-синхронизации для последующего реформирования изображений в 10 фазах сердечного цикла. Параметры

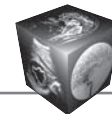


Таблица 1. Клинико-инструментальная характеристика пациентов, включенных в исследование
Table 1. Baseline characteristics of included patients

Характеристика Parameter	Группа 1 ($D_{Ao} \geq 40$ мм) Group 1 ($D_{Ao} \geq 40$ mm) n = 50	Группа 2 ($D_{Ao} < 40$ мм) Group 2 ($D_{Ao} < 40$ mm) n = 19	Уровень статистической значимости, p p-value
Возраст, годы Me [Q1; Q3] Age, years Me [Q1; Q3]	62.0 [53.5; 69.0]	65.5 [62.0; 70.0]	NS
Пол, % мужчин, n (%) Gender, male, n (%)	33 (66)	15 (78.9)	NS
ИМТ, кг/м ² Me [Q1; Q3] BMI, kg/m ² Me [Q1; Q3]	28.1 [25.0; 33.0]	24.2 [25.0; 33.0]	NS
Сахарный диабет, n (%) Diabetes mellitus, n (%)	2 (4)	0	Не сопоставляли Didn't compare
Гипертоническая болезнь, n (%) Arterial hypertension, n (%)	38 (76)	12 (63.2)	NS
I	35	12	NS
II	3	0	NS
III	0	0	NS
ФК ХСН по NYHA, n (%) Functional class of CHF, n (%):			Не сопоставляли Didn't compare
0	4 (10)	5 (26.3)	
I	3 (6.6)	10 (52.6)	
II	38 (70)	4 (21.1)	
III	5 (14.4)	0 (0)	
Дислипидемия, n (%) Dyslipidemia, n (%)	28 (46.7)	16 (84.2)	p < 0.05
Двустворчатый АК Bicuspid aortic valve	13 (26)	0	p < 0.05
Трехстворчатый АК Tricuspid aortic valve	37 (74)	19 (100)	p < 0.05
D_{Ao} (M ± SD)	49,7 ± 5,8	35,6 ± 3,7	p < 0.05
ФВ ЛЖ, % (M ± SD) LV EF, % (M ± SD)	63,7 ± 8,9	65,3 ± 6,8	NS
КДО, мл (M ± SD) LV EDV, ml (M ± SD)	122,6 ± 52,6	105,2 ± 42,8	NS
КСО, мл (M ± SD) ESV, ml (M ± SD)	45,6 ± 24,6	43,2 ± 22,3	NS

Примечание. D_{Ao} – максимальный диаметр аорты по данным трансторакальной эхокардиографии, ИМТ – индекс массы тела, ХСН – хроническая сердечная недостаточность, АК – аортальный клапан, КДО – конечный диастолический объем, КСО – конечный систолический объем.

Note. D_{Ao} – maximum aortic diameter according to transthoracic echocardiography; BMI – body mass index; CHF – chronic heart failure; LV EF – left ventricular ejection fraction; LV EDV – left ventricular end diastolic volume; LV ESV – left ventricular end systolic volume; NS – not significant.

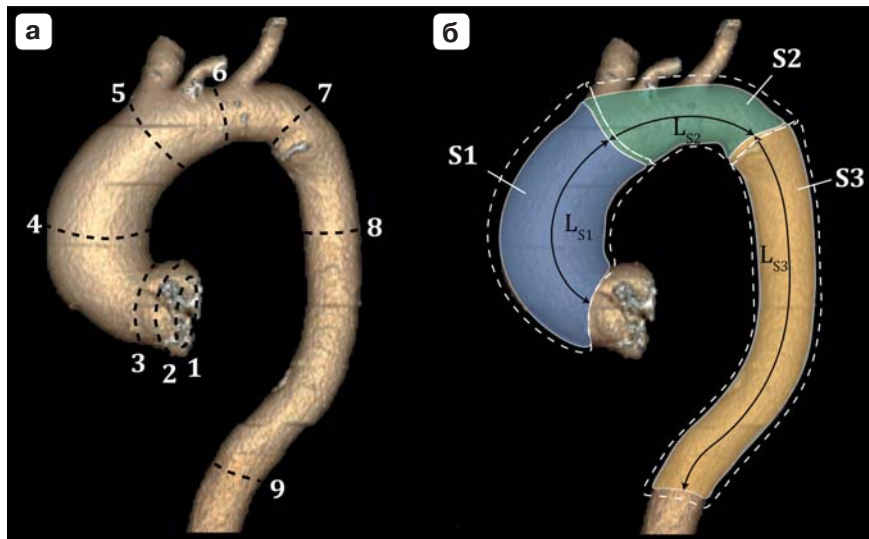
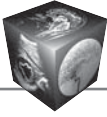


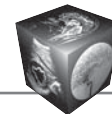
Рис. 1. Морфометрическая обработка компьютерно-томографических изображений грудной аорты. **а** – уровни измерения диаметров аорты: 1 – фиброзное кольцо аортального клапана; 2 – середина синусов Вальсальвы; 3 – синотубулярное соединение; 4 – восходящая аорта; 5 – 1 см проксимальнее брахиоцефального ствола; 6 – дуга аорты (проксимальнее левой подключичной артерии); 7 – начальный отдел нисходящей аорты (дистальнее левой подключичной артерии); 8 – уровень левого предсердия; 9 – уровень диафрагмы; **б** – схема разделения грудного отдела аорты на сегменты для вычисления их длин и объемов: S1 – восходящий отдел аорты; S2 – дуга аорты; S3 – нисходящий отдел аорты. Пунктирными линиями обозначены размеры аорты в конечно-систолическую фазу сердечного цикла. *Примечание.* L_{S1-3} – длины сегментов грудной аорты.

Fig. 1. Morphometric processing of computed tomography images of the thoracic aorta. **a** – levels of measurement of aortic diameters: 1 – aortic annulus; 2 – middle of the sinuses of Valsalva; 3 – sinotubular junction; 4 – ascending aorta; 5 – 1 cm proximal to the brachiocephalic trunk; 6 – aortic arch (proximal to the left subclavian artery); 7 – proximal part of the descending aorta (distal to the left subclavian artery); 8 – level of the left atrium; 9 – aperture level; **b** – scheme of dividing the thoracic aorta into segments for calculating their lengths and volumes: S1 – ascending aorta; S2 – aortic arch; S3 – descending aorta. Dashed lines indicate aortic diameter in the end-systolic phase of the cardiac cycle. *Note.* L_{S1-3} – lengths of segments of the thoracic aorta.

записи исследования: напряжение на трубке 120 кВ, сила тока 300–600 мА с ЭКГ-модуляцией, скорость вращения трубки 0,4 с, питч 0,20–0,22 (в зависимости от ЧСС). Изображения были реконструированы по стандартным протоколам с толщиной срезов 0,625 мм. Обработка полученных изображений проводилась на рабочей станции Advantage Workstations 4.3 (GE Healthcare) с последующим измерением размеров всех отделов грудной аорты и построением объемных реконструкций. До и после введения рентгеноконтрастного средства пациентам измеряли артериальное давление методом Короткова.

Для расширенной постпроцессинговой обработки использовали данные систолической (40% фаза сердечного цикла) и диастолической (90% фаза сердечного цикла) фаз. Морфометрическую обработку проводили на уровне фиброзного кольца аортального клапана, синусов Вальсальвы, синотубулярного соединения (СТС), восходящей аорты проксимальнее устья брахио-

цефального ствола (БЦС), дуги аорты (проксимальнее устья левой подключичной артерии (ЛПКА)), начального отдела нисходящей аорты (дистальнее устья ЛПКА), на уровне левого предсердия и диафрагмы (рис. 1). На каждом уровне в систолу и диастолу по внутреннему контуру сосуда вручную измеряли его максимальный диаметр. Кроме того, измеряли длину восходящей аорты, ее дуги и нисходящей аорты. Затем вычисляли разницу (дельты) между диаметрами и длинами на всех уровнях и для всех сегментов грудной аорты. В дальнейшем с использованием перечисленных показателей дополнительно проводили вычисление циркулярной деформации (1), комплаенса (2), жесткости (3) и растяжимости (4) стенки (для всех уровней), а также продольной деформации (5) для 3 сегментов (S) грудной аорты (S1 – от синотубулярного соединения до БЦС, S2 – от БЦС до уровня 1 см дистальнее ЛПКА, S3 – от уровня 1 см дистальнее ЛПКА до диафрагмы) по следующим формулам [13]:



$$\text{Комплаенс} \left(\frac{\text{мм}^2}{\text{мм рт.ст.}} \right) = \frac{\pi \times D_{\text{сис}}^2 - D_{\text{диас}}^2}{4 \times \text{АД}_{\text{пульс}}} \quad (1)$$

$$\text{Растяжимость} \left(\frac{\%}{\text{мм рт.ст.}} \right) = \frac{100 \times (D_{\text{сис}}^2 - D_{\text{диас}}^2)}{\text{АД}_{\text{пульс}} \times D_{\text{диас}}^2} \quad (2)$$

$$\text{Индекс жесткости} = \frac{\ln(\text{САД}/\text{ДАД}) \times D_{\text{диас}}}{(D_{\text{сис}} - D_{\text{диас}})} \quad (3)$$

$$\text{Циркулярная деформация} (\%) = \frac{D_{\text{сис}} - D_{\text{диас}}}{D_{\text{диас}}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{Продольная деформация} (\%) = \frac{L_{\text{сис}} - L_{\text{диас}}}{L_{\text{диас}}} \times 100\% \quad (5)$$

где $D_{\text{сис}}$ – максимальный диаметр в систолу; $D_{\text{диас}}$ – максимальный диаметр в диастолу; САД – систолическое артериальное давление до введения рентгеноконтрастного средства; ДАД – диастолическое артериальное давление до введения рентгеноконтрастного средства; АД_{пульс} – пульсовое давление; $L_{\text{сис}}$ – длина сегмента грудной аорты в систолу; $L_{\text{диас}}$ – длина сегмента грудной аорты в диастолу.

Исследования выполнены с применением оборудования Центра коллективного пользования “Медицинская геномика”.

Лучевая нагрузка

При проведении исследования лучевая нагрузка составила от 10 до 22 мЗв.

Статистическая обработка

Статистический анализ материалов был проведен с использованием пакета прикладных программ SPSS 20.0 for Windows (SPSS Inc., Chicago IL, USA), Statistica 10. Проверку на соответствие выборок нормальному закону распределения проводили согласно критерию Шапиро–Уилка. Данные представлены в виде $M \pm SD$ при нормальном законе распределении переменных; $Me [Q1; Q3]$ при других вариантах распределения переменных; $n (\%)$ в процентах от числа. Проверку достоверности различий количественных данных осуществляли при помощи непараметрического критерия Манна–Уитни, поскольку нормальный закон распределения для основных данных не подтвердился. Оценку взаимосвязей между величинами выполняли при помощи расчета коэффициента корреляции Спирмена. Изменения считали достоверными при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты

По результатам ЭКГ-синхронизированной КТ-ангиографии максимальный диаметр восходящей аорты (D_{max}) в группе 1 составил в диастолу $50,2 \pm 6,1$ мм, в группе 2 (контроль) – $34,15 \pm 4,2$ мм. В группе 1 дилатация восходящей аорты сочеталась с расширением ее корня на уровне синусов Вальсальвы у 26 (52 %) больных (максимальный диаметр: в систолу $44,2 \pm 8,5$ мм). Диаметр аорты, рассчитанный по данным КТ-ангиографии, тесно коррелировал с результатами ТТ-ЭхоКГ ($r = 0,948$ для D_{max}).

По результатам статистического анализа была также выявлена умеренная отрицательная корреляционная взаимосвязь между возрастом пациентов и циркулярной деформацией на уровнях от синотубулярного соединения до диафрагмы ($r = -0,37$ для уровня СТС, $r = -0,35$ для уровня восходящей аорты, $r = -0,41$ для уровня БЦС, $r = -0,36$ для уровня дуги аорты, $r = -0,30$ для начальной части нисходящей аорты, $r = -0,40$ для уровня левого предсердия, $r = -0,36$ для уровня диафрагмы).

Статистически значимые различия между группой 1 и 2 выявлены лишь по циркулярной деформации, % на уровне синусов Вальсальвы ($3,96 [0,00; 101,00]$ vs $0,13 [-1,42; 3,04]$, $p = 0,004$), начальной части нисходящей аорты ($5,30 [1,27; 101,0]$ vs $1,97 [-0,32; 6,08]$, $p = 0,028$) и на уровне левого предсердия ($5,61 [2,24; 101,0]$ vs $2,84 [0,76; 7,86]$, $p = 0,049$).

В дальнейшем пациенты группы 1 были разделены на 2 подгруппы в зависимости от значения D_{max} восходящей аорты по данным КТ-ангиографии: в подгруппу 1а ($n = 20$) вошли больные с дилатацией сосуда, у которых D_{max} был больше или равен 40 мм, но меньше 50 мм, а в подгруппу 1б ($n = 30$) – больные с аневризматически расширенной аортой и $D_{\text{max}} \geq 50$ мм. Подгруппа 1а включала 4 (20%) нормотензивных пациента, 12 (60%) больных с артериальной гипертензией (АГ) I степени, 3 (15%) – с АГ II степени, 1 (5%) – с АГ III степени. В подгруппу 1б вошли 4 (13,3%) нормотензивных пациента ($p = 1,00$), 20 (66,7%) больных с АГ I степени ($p = 0,77$), 5 (16,7%) – с АГ II степени ($p = 1,00$), 1 (3,3%) – с АГ III степени ($p = 1,00$). Таким образом, выделенные подгруппы не различались по степени АГ обследованных лиц.

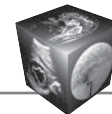
Далее мы провели сравнение КТ-показателей эластичности в указанных подгруппах и группе контроля (табл. 2). По результатам данного анализа каких-либо значимых различий между подгруппами 1а и 1б выявлено не было. В то же время пациенты с дилатированной восходящей аортой (подгруппа 1а) отличались от группы контроля по индексу жесткости на уровне фиброзного кольца



Таблица 2. Показатели эластичности грудной аорты по данным ЭКГ-синхронизированной МСКТ-ангиографии у больных с умеренной дилатацией (подгруппа 1а), аневризматическим расширением (подгруппа 1б) сосуда, а также в группе контроля

Table 2. Indicators of the thoracic aorta elasticity according to ECG-synchronized CT-angiography in patients with dilatation (group 1a) of the ascending aorta, aneurysm of the ascending aorta (group 1b), as well as in the control group

Показатель Parameter	Подгруппа 1а (40 мм < D _{max} < 50 мм) Group 1a (40 mm < D _{max} < 50 mm) n = 20 Me [Q1; Q3]	Подгруппа 1б (D _{max} ≥ 50 мм) Group 1b (D _{max} ≥ 50 mm) n = 30 Me [Q1; Q3]	Группа 2 (контроль) (D _{max} < 40 мм) Group 2 (control) (D _{max} < 40 mm) n=19 Me [Q1; Q3]
Комплаенс, мм²/мм рт.ст. / Compliance, mm²/mm Hg:			
уровень фиброзного кольца аортального клапана the level of the aortic annulus	0.44 [-1.25; 1.00]	-1.66 [-4.34; 0.87]	-0.35 [-1.44; 1.02]
уровень синусов Вальсальвы level of the sinuses of Valsalva	1.92 [-0.51; 4.90]	1.18 [0.11; 4.45]	0.00 [-0.56; 0.64]
уровень синотубулярного соединения level of the sinotubular junction	-0.61 [-1.36; 1.35]	1.15 [-0.72; 3.64]	0.00 [-0.77; 0.85]
на уровне восходящей аорты ascending aorta	3.04 [0.97; 3.54]	1.18 [0.19; 4.34]	0.69 [-0.10; 1.64]
на уровне проксимальнее устья БЦС level of 1 cm proximal to the brachiocephalic trunk	1.14 [0.73; 2.04]	1.61 [0.23; 2.69]	1.18 [-0.32; 1.32]
на уровне дуги аорты level of an aortic arch	1.87 [0.74; 2.18]	1.15 [0.23; 2.74]	0.77 [0.21; 1.26]
на уровне начальной части нисходящей аорты proximal part of the descending aorta	1.37 [0.01; 1.58]	1.61 [0.50; 2.45]	0.44 [-0.08; 0.95]
на уровне левого предсердия level of the left atrium	1.09 [0.61; 1.60]	1.09 [0.55; 1.62]	0.53 [-0.86; 0.84]
на уровне диафрагмы aperture level	0.96 [0.00; 1.69]	0.38 [-0.19; 1.61]	0.52 [-0.20; 0.92]
Растяжимость, %/мм рт.ст. / Distensibility, %/mm Hg:			
уровень фиброзного кольца аортального клапана the level of the aortic annulus	-0.31 [-2.50; 1.78]	0.75 [-1.43; 0.49]	0.05 [-0.51; 0.45]
уровень синусов Вальсальвы level of the sinuses of Valsalva	-0.35 [-2.5; 0.75]	-1.15 [-1.43; 1.45]	0.22 [-0.50; 1.04]
уровень синотубулярного соединения level of the sinotubular junction	0.89 [-0.22; 2.00]	0.25 [-0.57; 1.43;]	0.28 [-0.22; 1.55]
на уровне восходящей аорты ascending aorta	0.40 [-0.26; 0.77]	0.11 [-0.45; 0.46]	0.72 [-0.02; 1.00]
на уровне проксимальнее устья БЦС level of 1 cm proximal to the brachiocephalic trunk	-0.45 [-2.00; 0.1]	-0.47 [-1.43; -0.06]	0.58 [-0.16; 1.01]
на уровне дуги аорты level of an aortic arch	0.52 [-2.00; -0.05]	0.8 [-0.21; -2.5]	0.45 [0.04; 1.13]
на уровне начальной части нисходящей аорты proximal part of the descending aorta	0.83 [-2.00; -0.08]	0.76 [0.10; 2.5]	0.46 [-0.04; 1.24]
на уровне левого предсердия level of the left atrium	0.65 [-2.00; 0.70]	0.37 [-2.5; 0.10]	0.45 [0.05; 1.65]
на уровне диафрагмы aperture level	1.29 [-0.2; 2.25]	0.49 [-0.13; 2.50]	0.6 [-0.28; 1.97]



Показатель Parameter	Подгруппа 1а (40 мм < D _{max} < 50 мм) Group 1a (40 mm < D _{max} < 50 mm) n = 20 Me [Q1; Q3]	Подгруппа 1б (D _{max} ≥ 50 мм) Group 1b (D _{max} ≥ 50 mm) n = 30 Me [Q1; Q3]	Группа 2 (контроль) (D _{max} < 40 мм) Group 2 (control) (D _{max} < 40 mm) n=19 Me [Q1; Q3]
Индекс жесткости / Stiffness:			
уровень фиброзного кольца аортального клапана the level of the aortic annulus	0.07 [-0.14; 0.15]*	0.04 [-0.01; 0.06]	-0.04 [-0.1; 0.06]*
уровень синусов Вальсальвы level of the sinuses of Valsalva	0.05 [-0.14; 0.09]	0.10 [0.03; 0.39]	0.06 [-0.22; 0.15]
уровень синотубулярного соединения level of the sinotubular junction	-0.1 [-0.16; 0.10]	0.05 [-0.04; 0.17]	0.05 [-0.16; 3.73]
на уровне восходящей аорты ascending aorta	0.08 [0.07; 0.13]	0.11 [0.08; 0.27]	0.06 [-0.01; 0.14]
на уровне проксимальнее устья БЦС level of 1 cm proximal to the brachiocephalic trunk	0.08 [0.05; 0.17]	0.11 [0.04; 0.25]	0.11 [0.05; 0.14]
на уровне дуги аорты level of an aortic arch	0.06 [0.05; 0.11]	0.07 [0.03; 0.15]	0.08 [-0.01; 0.25]
на уровне начальной части нисходящей аорты proximal part of the descending aorta	0.08 [-0.05; 0.09]	0.06 [0.03; 0.09]	0.12 [0.05; 0.17]
на уровне левого предсердия level of the left atrium	0.11 [0.07; 0.18]	0.06 [0.04; 0.09]	0.11 [0.05; 0.23]
на уровне диафрагмы aperture level	0.05 [0.04; 0.10]	0.04 [-0.16; 0.1]	0.04 [-0.1; 0.09]
Циркулярная деформация, % / Circular strain, %:			
фиброзного кольца аортального клапана the level of the aortic annulus	0.49 [-2.94; 3.36]*	-5.52 [-10.45; 1.63]	-1.18 [-4.51; 3.87]*
синусов Вальсальвы level of the sinuses of Valsalva	2.99 [-0.63; 6.85] *	3.73 [0.24; 6.56]**	0.13 [-1.42; 3.04]*, **
синотубулярного соединения level of the sinotubular junction	-1.07 [-2.47; 2.26]	2.1 [-0.78; 5.74]	0.63 [-2.83; 4.50]
на уровне восходящей аорты ascending aorta	3.77 [1.6; 4.91]	1.78 [0.18; 5.25]	2.29 [-0.25; 4.28]
на уровне проксимальнее устья БЦС level of 1 cm proximal to the brachiocephalic trunk	2.47 [1.58; 5.17]	2.70 [0.10; 6.60]	3.17 [2.1; 7.96]
на уровне дуги аорты level of an aortic arch	4.98 [1.60; 6.90]	3.69 [1.02; 8.07]	3.06 [1.1; 6.17]
на уровне начальной части нисходящей аорты proximal part of the descending aorta	3.32 [0.39; 5.27]	5.48 [1.27; 8.40]**	1.97 [-0.32; 6.08]**
на уровне левого предсердия level of the left atrium	3.60 [2.43; 6.25]	5.24 [2.09; 7.69]	2.84 [0.76; 7.86]
на уровне диафрагмы aperture level	3.88 [0.28; 5.73]	2.10 [-0.91; 7.17]	4.28 [-1.02; 9.20]
Продольная деформация, % / Longitudinal strain, %			
S1	6.46 [1.06; 23.4]	2.78 [-1.28; 9.11]	6.68 [-0.84; 15.31]
S2	-6.80 [-8.84; 9.82]	5.96 [-8.98; 9.25]**	-2.58 [-7.75; 1.89]**
S3	-0.20 [-9.01; 4.53]	0.66 [-1.53; 2.2]	1.6 [0.00; 3.40]

Примечание. * – достоверность различий между подгруппой 1а и группой контроля ($p < 0,05$); ** – достоверность различий между подгруппой 1б и группой контроля ($p < 0,05$).

Note. * – significance of differences between group 1a and control group ($p < 0.05$); ** – significance of differences between group 1b and control group ($p < 0.05$); S1 – segment 1 of the aorta (ascending aorta); S2 – segment 2 of the aorta (aortic arch); S3 – segment 3 of the aorta (proximal part of the descending aorta)

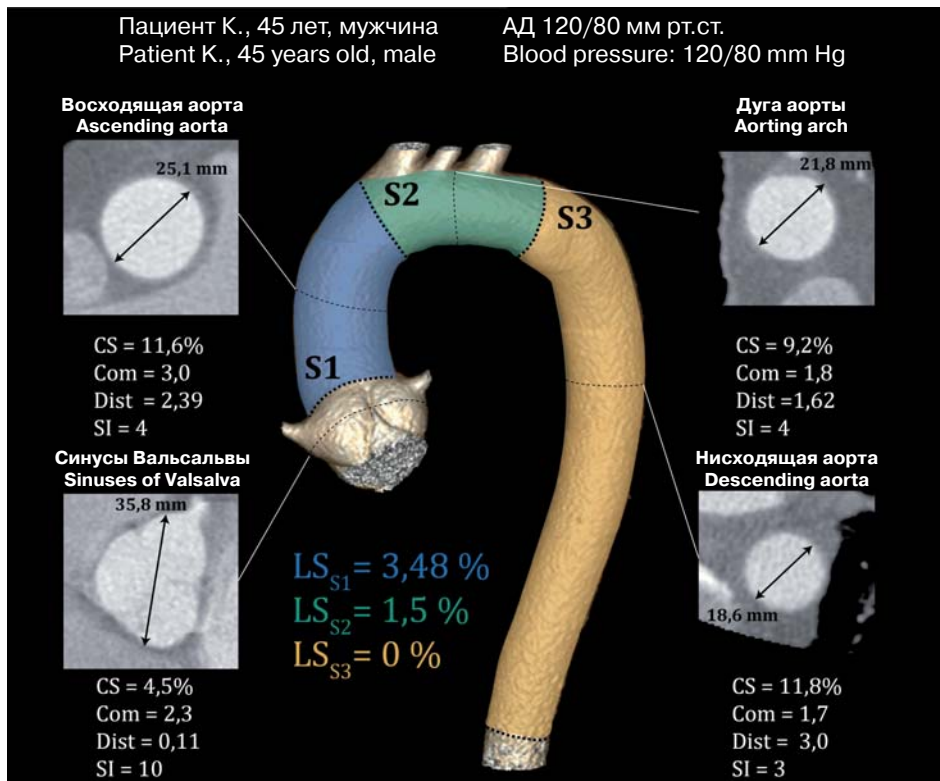
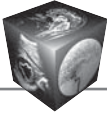


Рис. 2. Пример морфометрической обработки МСКТ-изображений грудного отдела аорты с вычислением показателей эластичности аортальной стенки пациента из контрольной группы (диаметр восходящей аорты менее 40 мм).

Пациент М., 45 лет, артериальное давление 120/80 мм рт.ст., без расширения грудной аорты. Представлены томосрезы на уровне синусов Вальсальвы, восходящей аорты, дуги аорты (проксимальное устья левой подключичной артерии) и средней части нисходящей аорты (на уровне левого предсердия). По данным КТ-ангиографии грудной отдел аорты визуально не изменен (максимальный диаметр в диастолу 25,1 мм), расширенных участков не выявлено. Эластические свойства аортальной стенки сохранены, относительно пороговых значений, предложенных Т.М. Morrison и соавт [13]: CS в восходящей аорте – 8%, в нисходящей аорте – 6%; LS восходящего отдела – 2%; растяжимость – 4%/мм рт.ст.; индекс жесткости – 4.

Примечание. CS – циркулярная деформация; Com – комплаенс; Dist – растяжимость, SI – индекс жесткости аортальной стенки; S1–3 – сегменты грудной аорты; LS – продольная деформация.

Fig. 2. An example of morphometric processing of MSCT images of the thoracic aorta with the calculation of elasticity indices of the aortic wall of a patient from the control group (ascending aorta diameter less than 40 mm).

The 45-years-old male patient, blood pressure 120/80 mm Hg, without expansion of the thoracic aorta. Tomoslices are presented at the level of the sinuses of Valsalva, the ascending aorta, the aortic arch (proximal to the left subclavian artery) and the middle part of the descending aorta (at the level of the left atrium). According to the CT study, the thoracic aorta was not visually changed, no enlarged area was detected (maximal vessel diameter 25.1 mm). The elastic properties of the aortic wall are preserved, relative to the threshold values proposed by T.M. Morrison et al. [13]: CS in the ascending aorta – 8%, in the descending aorta – 6%; LS of the ascending aorta – 2%; extensibility – 4% / mm Hg; hardness index – 4.

Note. CS – circular deformation; Com – Compliance; Dist – distensibility; SI – aortic wall stiffness index; S1–3 – segments of the thoracic aorta; LS – longitudinal deformation.

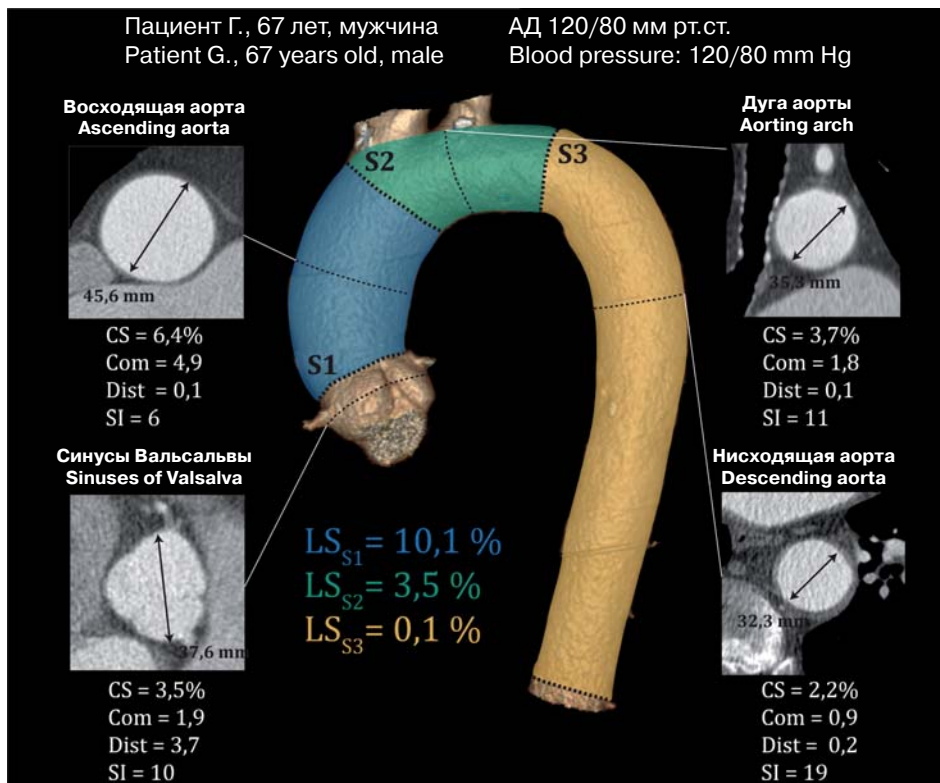
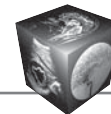


Рис. 3. Пример морфометрической обработки МСКТ-изображений грудного отдела аорты с вычислением показателей эластичности аортальной стенки пациента из подгруппы 1а (диаметр восходящей аорты более 40 мм, но менее 50 мм).

Пациент К., 67 лет, артериальное давление 120/80 мм рт.ст. Показаны уровни синусов Вальсальвы, восходящей аорты, дуги аорты (проксимальнее устья левой подключичной артерии) и средней части нисходящей аорты (на уровне левого предсердия). По данным КТ-ангиографии было определено расширение восходящего отдела аорты (от синотубулярного соединения до брахиоцефального ствола, максимальный диаметр в диастолу 45,6 мм). Показатели эластичности аортальной стенки восходящего отдела умеренно снижены (показаны на рисунке для каждого отдела) относительно пороговых значений, предложенных Т.М. Morrison и соавт. [13]: циркулярная деформация в восходящей аорте – 8%, продольная деформация восходящего отдела – 2%; растяжимость – 4 %/мм рт.ст.; индекс жесткости – 4.

Примечание. CS – циркулярная деформация; Com – комплаенс; Dist – растяжимость, SI – индекс жесткости аортальной стенки; S1–3 – сегменты грудной аорты; LS – продольная деформация.

Fig. 3. An example of morphometric processing of MSCT images of the thoracic aorta with the calculation of elasticity indices of the aortic wall of a patient from group 1a (the diameter of the ascending aorta is more than 40 mm, but less than 50 mm).

The 67-years-old male patient, blood pressure – 120/80 mm Hg. The levels of the sinuses of Valsalva, the ascending aorta, the aortic arch (proximal to the left subclavian artery) and middle part of the descending aorta (at the level of the left atrium) are shown. According to the MSCT study, the expansion of the ascending aorta was determined (from the sinotubular junction to the brachiocephalic trunk, the maximum diameter in diastole was 45.6 mm). The indicators of elasticity of the aortic wall of the ascending section are moderately reduced (shown in the figure for each section), relative to the threshold values proposed by T.M. Morrison et al. [13]: CS in the ascending aorta, 8%, LS of the ascending aorta, 2%; extensibility – 4% / mm Hg; hardness index – 4.

Note. CS – circular deformation; Com – compliance; Dist – distensibility, SI – aortic wall stiffness index; S1–3 – segments of the thoracic aorta; LS – longitudinal deformation.

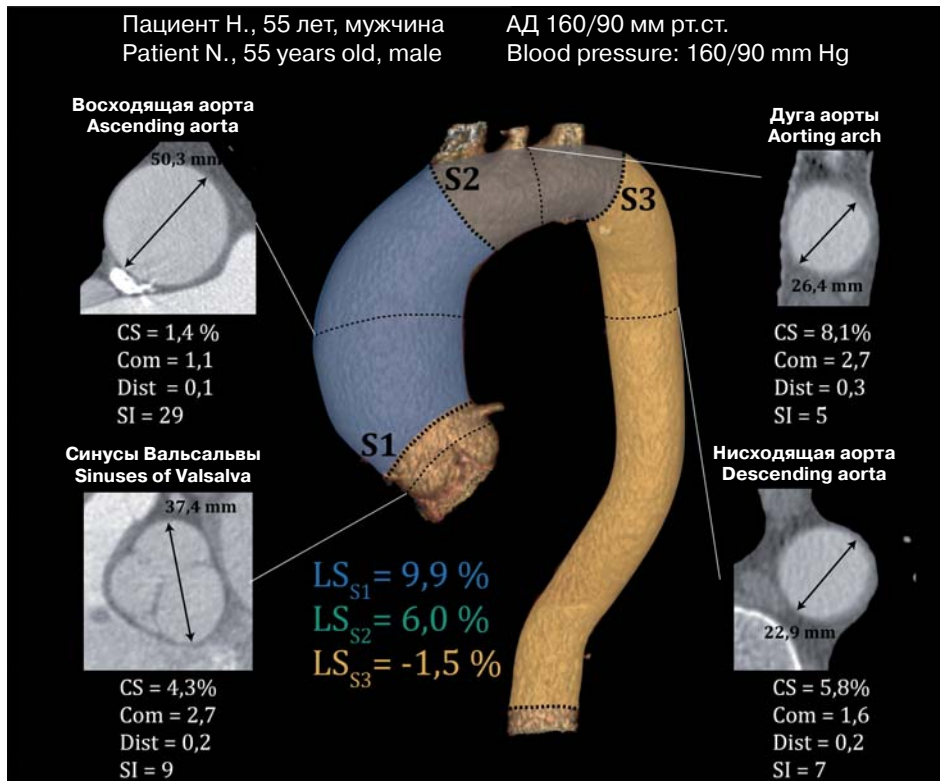
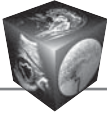


Рис. 4. Пример морфометрической обработки МСКТ-изображений грудного отдела аорты с вычислением показателей эластичности сосуда пациента из подгруппы 1б (аневризма восходящего отдела аорты, максимальный диаметр более 50 мм).

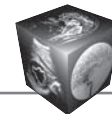
Пациент Н., 55 лет, артериальное давление 160/90 мм рт.ст. Показаны уровни синусов Вальсальвы, восходящей аорты, дуги аорты (проксимальнее устья левой подключичной артерии) и средней части нисходящей аорты (на уровне левого предсердия). По данным КТ-ангиографии определяется выраженное расширение восходящего отдела аорты (от синотубулярного соединения до брахиоцефального ствола, максимальный диастолический диаметр 50,3 мм). Эластические свойства аортальной стенки восходящего отдела значительно снижены, при этом в зоне дуги аорты высокие показатели циркулярной и продольной деформации относительно пороговых значений, предложенных Т.М. Morrison и соавт. [13]: циркулярная деформация в восходящей аорте – 8%, в нисходящей аорте – 6%; продольная деформация восходящего отдела – 2%; растяжимость – 4 %/мм рт.ст.; индекс жесткости – 4.

Примечание. CS – циркулярная деформация; Com – комплаенс; Dist – растяжимость, SI – индекс жесткости аортальной стенки; S1–3 – сегменты грудной аорты; LS – продольная деформация.

Fig. 4. An example of morphometric processing of MSCT images of the thoracic aorta with the calculation of indicators of vessel elasticity in a patient from group 1b (aneurysm of the ascending aorta, maximum diameter over 50 mm).

The 55-years-old male patient, blood pressure – 160/90 mm Hg. The levels of the sinuses of Valsalva, the ascending aorta, the aortic arch (proximal to the left subclavian artery) and middle part of the descending aorta (at the level of the left atrium) are shown. According to the MSCT study, a pronounced expansion of the ascending aorta is determined (from the sinotubular junction to the brachiocephalic trunk, the maximum diastolic diameter is 50.3 mm). The elastic properties of the aortic wall of the ascending section are significantly reduced, while in the region of the arch, the indicators of circular and longitudinal deformation are increased, relative to the threshold values proposed by T.M. Morrison et al. [13]: circular deformity in the ascending aorta – 8%, in the descending aorta – 6%; longitudinal deformation of the ascending section – 2%; extensibility – 4% / mm Hg; stiffness index – 4.

Note. CS – circular deformation; Com – Compliance; Dist – distensibility, SI – aortic wall stiffness index; S1–3 – segments of the thoracic aorta; LS – longitudinal deformation.



аортального клапана, циркулярной деформации на уровне фиброзного кольца и синусов Вальсальвы, а пациенты с аневризматически расширенной восходящей аортой (подгруппа 1б) – по показателям циркулярной деформации на уровне синусов Вальсальвы и начальной части нисходящей аорты, по растяжимости %/мм рт.ст. и продольной деформации, % 2-го сегмента грудной аорты. Примеры морфометрической обработки КТ-изображений грудного отдела аорты с вычислением показателей эластичности аортальной стенки для пациента из группы контроля показаны на рис. 2, пациента из подгруппы 1а – на рис. 3, из подгруппы 1б – на рис. 4. У данных больных показатели эластичности были сопоставлены с пороговыми значениями, предложенными Т.М. Morrison и соавт. [13].

Учитывая возможное влияние на показатели эластичности аорты таких факторов, как АГ и бicuspidальный аортальный клапан, мы провели дополнительный статистический анализ между подгруппами нормотензивных пациентов и больных с АГ, а также между пациентами с трикуспидальным (ТАК) и бicuspidальным аортальным клапаном (БАК). Было установлено, что у пациентов с БАК отмечаются более высокие показатели растяжимости и более низкий индекс жесткости на уровне начальной части нисходящей аорты по сравнению с подгруппой больных с ТАК (0,46 [0,24; 0,52] %/мм рт.ст. vs 0,15 [0,05; 0,23] %/мм рт.ст., $p = 0,024$; 0,04 [0,01; 0,07] vs 0,09 [0,05; 0,12] $p = 0,002$). В то же время значимого влияния АГ на показатели эластичности грудной аорты нами выявлено не было.

Обсуждение

В представленном исследовании впервые полностью сопоставление показателей эластичности стенки грудной аорты, рассчитанных по данным ЭКГ-синхронизированной КТ-ангиографии, у пациентов с аневризматически расширенной, дилатированной и нерасширенной восходящей аортой.

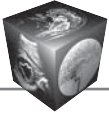
На предварительном этапе анализа данных нами была установлена умеренная отрицательная корреляционная взаимосвязь между возрастом обследованных пациентов и показателями циркулярной деформации на всех уровнях сосуда от синотубулярного соединения до диафрагмы, что свидетельствует о снижении эластичности и повышении его жесткости при старении. Эти результаты хорошо согласуются с ранее опубликованными сведениями, полученными как при морфологических и механометрических [14] исследованиях образцов грудной аорты, так и при выполнении КТ

и магнитно-резонансной томографии у лиц без патологических изменений сосуда [15].

В то же время в представленном исследовании ЭКГ-синхронизированная КТ-ангиография не позволила выявить каких-либо различий по показателям эластичности и жесткости на уровне восходящей аорты (от СТС до БЦС) между пациентами контрольной группы и больными с аортопатией, несмотря на то что патологическое расширение сосуда локализовалась именно в данном отделе. Эти результаты согласуются с отдельными исследованиями, в которых применяли ЭКГ-синхронизированную МСКТ для оценки пульсовой деформации грудного отдела сосуда. В частности, в работе Н.W.L. de Beaufort и соавт. [16] также не было выявлено различий по показателям эластичности у лиц с неизменной и патологически расширенной восходящей аортой. В то же время S. Pasta и соавт. [11] продемонстрировали повышенную жесткость аневризматически измененного участка восходящей аорты по сравнению с аналогичным отделом в группе контроля.

Вместе с тем нами были установлены значимые различия по циркулярной деформации на уровне синусов Вальсальвы между контрольной группой и обеими подгруппами исследования (с дилатацией и аневризмой аорты), что объясняется наличием расширения корня аорты у 52% обследованных больных. Кроме того, показатели циркулярной деформации на уровне начального отдела нисходящей аорты и продольной деформации 2-го сегмента грудной аорты различались между контролем и группой пациентов с аневризмой. При этом группа больных с дилатированным восходящим отделом аорты по эластическим характеристикам не отличалась от двух других групп. Данные результаты указывают на то, что патологические тканевые изменения присутствуют не только в аневризматически расширенной части аорты, но и постепенно распространяются на дистальные отделы, проявляясь лишь нарушением деформационных свойств аортальной стенки.

Возможным объяснением полученных фактов является способность аорты к саморегулированию и поддержанию баланса эластичности и прочности при увеличенных механических нагрузках [10]. Данный механизм осуществляется через повышение синтеза или утилизации встроенных во внеклеточный матрикс белков интрамуральными клетками аорты в ответ на изменение химико-механического окружения [10]. Предположительно, такие компенсаторные механизмы в полной мере реализуются в области аневризмы, при этом избыточная растяжимость сосудистой стенки нивелируется увеличением жесткости коллагенового



каркаса адвентиции. В связи с этим пульсовая деформация расширенной части сосуда поддерживается в пределах нормальных значений и ЭКГ-синхронизированная МСКТ-ангиография не выявляет значимых отклонений. В то же время наличие аневризмы изменяет направление потока крови, что повышает стрессовую нагрузку на смежные недилатированные участки, приводит к тканевым реакциям в них и к первоначально значимому изменению (повышению) пульсовой деформации, которая была нами выявлена при помощи ЭКГ-синхронизированной МСКТ-ангиографии в области аортальной дуги. В связи с этим указанные отделы аорты также могут быть подвержены риску расслоения и разрыва и требуют наблюдения при консервативном лечении заболевания. Отсутствие статистически значимых различий по показателям, характеризующим эластичность, между подгруппой больных с дилатированной и нормальной аортой, а также больными с аневризмой сосуда могут свидетельствовать о промежуточном характере тканевых изменений, существенно не отражающихся на пульсовой деформации восходящих отделов и аортальной дуги.

Представленная работа имеет ряд ограничений, заключающихся в использовании относительно малых выборок исследуемых групп больных, а также отсутствии верификации параметров эластических свойств стенки аорты, полученных в исследовании. С этой целью в дальнейшем могут быть применены прямая эластометрия интраоперационных образцов аорты либо магнитно-резонансная томография, которая позволяет эффективно измерять и глобальную жесткость по скорости распространения пульсовой волны, и локальную жесткость аорты по изменению диаметров сосуда в систолу и диастолу [17]. Другим методом медицинской визуализации, позволяющим оценить состояние грудной аорты, является эхокардиография. Трансторакальное ультразвуковое обследование выполняет ключевую роль в первичном скрининге аневризматического расширения грудного отдела аорты. Если при ТТ-ЭхоКГ выявлена дилатация восходящей аорты без признаков диссекции, целесообразно выполнить чреспищеводную ЭхоКГ, которая позволяет визуализировать грудной отдел аорты практически в полном объеме, за исключением дистального сегмента восходящего отдела и части дуги, экранированных столбом воздуха в трахее и левом магистральном бронхе. Главное преимущество чреспищеводного ультразвукового исследования аорты – отсутствие лучевой нагрузки на пациента. В то же время ограничением метода являются его полуинвазивность, дискомфорт для пациента при введении в пище-

вод датчика и риск возникновения кровотечения из вен пищевода. Учитывая сказанное выше, а также тот факт, что МСКТ-аортография является неотъемлемой частью обследования больных с патологией аорты [6, 7], данный метод визуализации среди прочих, по нашему мнению, имеет наилучшие перспективы для одновременной диагностики анатомических и функциональных изменений аорты (“one-stop-shop” метод).

Заключение

ЭКГ-синхронизированная МСКТ-ангиография позволяет не только точно и быстро оценить морфометрические показатели грудной аорты на всем ее протяжении, но и определить эластико-тоническое состояние различных областей сосуда. С помощью данного метода нами было установлено, что у больных с аневризматическим расширением восходящего отдела имеет место изменение эластических свойств (повышение растяжимости и пульсовой деформации) смежной недилатированной области, в частности дуги аорты. Это может указывать на потенциальный риск ее расслоения или разрыва и диктует необходимость тщательного наблюдения при консервативном лечении заболевания.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, № 21-15-00160, <https://rscf.ru/project/21-15-00160/>

Конфликт интересов. Конфликт интересов не является.

Участие авторов

Сазонова С.И. – концепция и дизайн исследования, написание текста.

Саушкин В.В. – сбор и обработка данных, проведение исследования.

Панфилов Д.С. – участие в научном дизайне, подготовка и редактирование текста.

Варламова Ю.В. – сбор и обработка данных, обзор публикаций по теме статьи.

Шипулин В.В. – сбор и обработка данных, статистическая обработка данных.

Базарбекова Б.А. – сбор и обработка данных, подготовка, создание опубликованной работы.

Завадовский К.В. – участие в научном дизайне, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

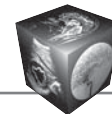
Козлов Б.Н. – концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Sazonova S.I. – concept and design of the study, writing text.

Saushkin V.V. – conducting research, collection and analysis of data.

Panfilov D.S. – participation in scientific design, text preparation and editing.



Varlamova Yu.V. – collection and analysis of data, review of publications.

Shipulin V.V. – collection and analysis of data, statistical analysis.

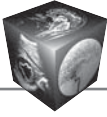
Bazarbekova B.A. – collection and analysis of data, preparation and creation of the published work.

Zavadovsky K.V. – participation in scientific design, responsibility for the integrity of all parts of the article, approval of the final version of the article.

Kozlov B.N. – concept and design of the study, approval of the final version of the article.

Список литературы [References]

1. Isselbacher E.M. Thoracic and abdominal aortic aneurysms. *Circulation*. 2005; 111: 816–828. <http://doi.org/10.1161/01.CIR.0000154569.08857.7A>
2. Davis F.M., Luo Y., Avril S. et al. Local mechanical properties of human ascending thoracic aneurysms. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2016; 61: 235–249. <http://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.03.025>
3. Emerel L., Thunes J., Kickliter T. et al. Predissection-derived geometric and distensibility indices reveal increased peak longitudinal stress and stiffness in patients sustaining acute type A aortic dissection: Implications for predicting dissection. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2019; 158 (2): 355–363. <http://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2018.10.116>
4. Isselbacher E.M., Cardenas C.L.L., Lindsay M.E. Hereditary influence in thoracic aortic aneurysm and dissection. *Circulation*. 2016; 133 (24): 2516–2528. <http://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.116.009762>
5. Илюшеникова Ю.Н., Панфилов Д.С., Саушкин В.В., Сондуйев Э.Л., Козлов Б.Н., Сазонова С.И. Методика скинтиграфической визуализации воспалительных процессов в стенке аорты с использованием ^{99m}Tc-пирофосфата. *Современные технологии в медицине*. 2021; 13: 65–71. <https://doi.org/10.17691/stm2021.13.6.07>
6. Ilyushenkova J.N., Panfilov D.S., Saushkin V.V., Sonduev E.L., Kozlov B.N., Sazonova S.I. Scintigraphic imaging of inflammation in the aortic wall using ^{99m}Tc-pyrophosphate. *Sovremennye tehnologii v medicine = Modern Technologies in Medicine*. 2021; 13 (6): 65–71. <https://doi.org/10.17691/stm2021.13.6.07> (In Russian)
7. Hiratzka L.F., Bakris G.L., Beckman J.A. et al. 2010 ACCF/AHA/AATS/ACR/ASA/SCA/SCAI/SIR/STS/SVM Guidelines for the diagnosis and management of patients with thoracic aortic disease: A report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on practice guidelines, American Association of Radiology, American Stroke Association, Society of Cardiovascular Anesthesiologists, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, Society of Interventional Radiology, Society of Thoracic Surgeons, and Society for Vascular Medicine. *Circulation*. 2014; 35 (41): 2873–2926. <http://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d4739e>
8. Абугов С.А., Аверина Т.Б., Аксельрот Б.А., Акчурин Р.С., Алякян Б.Г., Аракелян В.С., Вачёв А.Н., и др. Клинические рекомендации. Рекомендации по диагностике и лечению заболеваний аорты (2017). *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2018; 11 (1): 7–67.
9. Abugov S.A., Averina T.B., Akchurin R.S., Alekyan B.G., Arakelyan V.S., Vachev A.N., Gordeev M.L. et al. Clinical guidelines. guidelines for the diagnosis and treatment of aortic diseases (2017). *The Russian Journal of Cardiology & Cardiovascular Surgery*. 2018; 11 (1): 7–67. (In Russian)
10. Adriaans B.P., Wildberger J.E., Westenberg J.J.M. et al. Predictive imaging for thoracic aortic dissection and rupture: moving beyond diameters. *Eur. Radiol.* 2019; 29 (12): 6396–6404. <http://doi.org/10.1007/s00330-019-06320-7>
11. Koechlin L., Macius E., Kaufmann J. et al. Aortic root and ascending aorta dimensions in acute aortic dissection. *Perfusion*. 2020; 35 (2): 131–137. <http://doi.org/10.1177/0267659119858848>
12. Iddawela S., Ravendren A., Harky A. Bio-chemomechanics of the thoracic aorta. *Vasc. Biol.* 2021; 12; 3 (1): 25–33. <http://doi.org/10.1530/VB-20-0015>. eCollection 2021.
13. Pasta S., Agnese V., Giuseppe M.D. et al. In Vivo Strain Analysis of Dilated Ascending Thoracic Aorta by ECG-Gated CT Angiographic Imaging. *Ann. Biomed. Eng.* 2017; 45 (12): 2911–2920. <http://doi.org/10.1007/s10439-017-1915-4>
14. Скрипник А.Ю., Фокин В.А., Мирончук Р.Р., Успенский В.Е., Иртыга О.Б., Кушнарева Е.А., Рудь С.Д., Лепёхина А.С., Моисеева О.М., Труфанов Г.Е. Оценка эластических характеристик стенки восходящего отдела аорты при помощи компьютерно-томографической ангиографии в режиме электрокардиографической синхронизации с расширенной пост процессорной обработкой данных. *Российский кардиологический журнал*. 2019; 24 (12): 48–54. <http://doi.org/10.15829/1560-4071-2019-12-48-54>
15. Skripnik A.Yu., Fokin V.A., Mironchuk R.R., Uspenskiy V.E., Irtyuga O.B., Kushnareva E.A., Rud S.D., Lepekina A.S., Moiseeva O.M., Trufanov G.E. Assessment of the elastic properties of the ascending aorta using electrocardiographic synchronized computed tomography angiography with advanced data processing. *Russian Journal of Cardiology*. 2019; 12: 48–54. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2019-12-48-54> (In Russian)
16. Morrison T.M., Choi G., Zarins C.K., Taylor C.A. Circumferential and longitudinal cyclic strain of the human thoracic aorta: Age-related changes. *J. Vasc. Surg.* 2009; 49 (4): 1029–1036. <http://doi.org/10.1016/j.jvs.2008.11.056>
17. Vatner S.F., Zhang J, Vyzas C. et al. Vascular Stiffness in Aging and Disease. *Front. Physiol.* 2021; 12: 762437. <http://doi.org/10.3389/fphys.2021.762437>
18. Zubair M.M., de Beaufort H.W.L., Belvroy V.M. et al. Impact of Cardiac Cycle on Thoracic Aortic Geometry – Morphometric Analysis of Ecg Gated Computed Tomography. *Ann. Vasc. Surg.* 2020; 65: 174–182. <http://doi.org/10.1016/j.avsg.2019.10.072>
19. de Beaufort H.W., Nauta F.J., Conti M. et al. Extensibility and Distensibility of the Thoracic Aorta in Patients with Aneurysm. *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.* 2017; 53 (2): 199–205. <http://doi.org/10.1016/j.ejvs.2016.11.018>
20. Mitéran J., Bouchot O., Cochet A., Lalonde A. Automatic determination of aortic compliance based on MRI and adapted curvilinear detector. *Biomed. Signal Process Control*. 2018; 40: 295–311. <http://doi.org/10.1016/j.bspc.2017.09.002>



Для корреспонденции*: Сазонова Светлана Ивановна – тел.: +7-903-950-37-98. E-mail: sazonova_si@mail.ru

Сазонова Светлана Ивановна – доктор мед. наук, ведущий научный сотрудник отдела лучевой диагностики НИИ кардиологии Томского НИМЦ РАН, Томск. <https://orcid.org/0000-0003-2799-3260>. E-mail: sazonova_si@mail.ru

Саушкин Виктор Вячеславович – канд. мед. наук, старший научный сотрудник отдела лучевой диагностики НИИ кардиологии Томского НИМЦ РАН, Томск. <https://orcid.org/0000-0001-5564-3802>. E-mail: saushkin.vv@outlook.com

Панфилов Дмитрий Сергеевич – доктор мед. наук, старший научный сотрудник отделения сердечно-сосудистой хирургии НИИ кардиологии Томского НИМЦ РАН, Томск. <https://orcid.org/0000-0003-2201-350X>. E-mail: pand2006@yandex.ru

Варламова Юлия Вячеславовна – канд. мед. наук, врач-радиолог отдела лучевой диагностики НИИ кардиологии Томского НИМЦ РАН, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-0193-9453>. E-mail: jul13@bk.ru

Шипулин Владимир Владимирович – канд. мед. наук, младший научный сотрудник отдела лучевой диагностики НИИ кардиологии Томского НИМЦ РАН, Томск. <https://orcid.org/0000-0001-9887-8214>. E-mail: shipartphoto@gmail.com

Базарбекова Ботажан Аскарбековна – аспирант отделения сердечно-сосудистой хирургии НИИ кардиологии Томского НИМЦ РАН, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-7896-4446>. E-mail: botazhan.bazarbekova@yandex.ru

Завадовский Константин Валерьевич – доктор мед. наук, руководитель отдела лучевой диагностики НИИ кардиологии Томского НИМЦ РАН, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-1513-8614>. E-mail: konstz@cardio-tomsk.ru

Козлов Борис Николаевич – доктор мед. наук, заведующий отделением сердечно-сосудистой хирургии НИИ кардиологии Томского НИМЦ РАН, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-0217-7737>. E-mail: bnkozlov@yandex.ru

Contact*: Svetlana I. Sazonova – phone: +7-903-950-37-98. E-mail: sazonova_si@mail.ru

Svetlana I. Sazonova – Doct. of Sci. (Med.), leading researcher, radiology department, Cardiology research Institute, Tomsk National medical research Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0003-2799-3260>. E-mail: sazonova_si@mail.ru

Viktor V. Saushkin – Cand. of Sci. (Med.), senior researcher, radiology department, Cardiology research Institute, Tomsk National medical research Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0001-5564-3802>. E-mail: saushkin.vv@outlook.com

Dmitry S. Panfilov – Doct. of Sci. (Med.), senior researcher, Cardiovascular Surgery Department, Cardiology research Institute, Tomsk National medical research Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0003-2201-350X>. E-mail: pand2006@yandex.ru

Yuliya V. Varlamova – Cand. of Sci. (Med.), Radiologist, radiology department, Cardiology research Institute, Tomsk National medical research Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-0193-9453>. E-mail: jul13@bk.ru

Vladimir V. Shipulin – Cand. of Sci. (Med.), junior researcher, radiology department, Cardiology research Institute, Tomsk National medical research Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0001-9887-8214>. E-mail: shipartphoto@gmail.com

Botazhan A. Bazarbekova – graduate student, Cardiovascular Surgery Department, Cardiology research Institute, Tomsk National medical research Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-7896-4446>. E-mail: botazhan.bazarbekova@yandex.ru

Konstantin V. Zavadovsky – Doct. of Sci. (Med.), Head of the radiology department, Cardiology research Institute, Tomsk National medical research Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-1513-8614>. E-mail: konstz@cardio-tomsk.ru

Boris N. Kozlov – Doct. of Sci. (Med.), senior researcher, Cardiovascular Surgery Department, Cardiology research Institute, Tomsk National medical research Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-0217-7737>. E-mail: bnkozlov@yandex.ru