

Перспективная оценка показателей растяжимости стенки восходящей аорты и её сосудистого протеза у пациентки с аневризмой при технически безупречной хирургической коррекции и послеоперационном снижении функциональных показателей: клинический случай

А.В. Фридман¹, Т.А. Берген¹, Д.А. Сирота¹, Б.Н. Козлов², И.Ю. Журавлева¹, А.Р. Таркова¹,
В.Ю. Усов¹, А.М. Чернявский¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина, Новосибирск, Россия;

² Научно-исследовательский институт кардиологии Томского национального исследовательского медицинского центра Российской академии наук, Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Представлен и обсуждён клинический случай, когда у пациентки после выполнения хирургически безупречного протезирования восходящей аорты отмечалось выраженное снижение толерантности к физической нагрузке, снижение сократительной функции миокарда левого желудочка в покое и расширение лёгочной артерии вследствие усиления лёгочной артериальной гипертензии. Протезирование было выполнено в связи с инструментально выявленной при расширенном магнитно-резонансном томографическом исследовании аневризмой восходящей аорты с увеличением просвета в поперечном сечении аорты до 60 мм. Показано, что единственным и ведущим фактором к развитию негативных последствий протезирования явилось снижение объёма систолического расширения аорты до 5 мл, при исходных 13 мл, несмотря на заметное увеличение показателей растяжимости и снижения механической жёсткости по сравнению с показателями поражённой стенки аорты. Представлен обзор литературы и обсуждены в этой связи настоятельная необходимость и проблемы создания протезов аорты, эквивалентных по показателям механической растяжимости и упругости таковым для здоровых биологических тканей.

Ключевые слова: аневризма восходящей аорты; протезирование восходящей аорты; растяжимость; модуль Юнга; коронарное кровоснабжение миокарда; клинический случай.

Как цитировать: Фридман А.В., Берген Т.А., Сирота Д.А., Козлов Б.Н., Журавлева И.Ю., Таркова А.Р., Усов В.Ю., Чернявский А.М. Перспективная оценка показателей растяжимости стенки восходящей аорты и её сосудистого протеза у пациентки с аневризмой при технически безупречной хирургической коррекции и послеоперационном снижении функциональных показателей: клинический случай // Digital Diagnostics. 2024. Т. 5, № 2. С. XX–XX. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD568070>

Копирайт: © Эко-Вектор, 2024

Лицензия: Статья доступна по лицензии [CC BY-NC-ND 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Рукопись получена: 06.08.2023

Рукопись одобрена: 06.12.2023

Опубликована online: 29.01.2024

Prospective evaluation of the extensibility of the ascending aorta wall and its vascular prosthesis in a patient with an aneurysm with technically flawless surgical correction and postoperative decrease in functional parameters: a case report

Alexander V. Friedman¹, Tatiana A. Bergen¹, Dmitry A. Sirota¹, Boris N. Kozlov², Irina Yu. Zhuravleva¹, Alexandra R. Tarkova¹, Wladimir Yu. Ussov¹, Alexander M. Chernyavskiy¹

¹ E. Meshalkin National Medical Research Center, Novosibirsk, Russia;

² Cardiology Research Institute of the Tomsk National Research Medical Center, Tomsk, Russia

ABSTRACT

A clinical case is presented and discussed when after performing a surgically flawless prosthetic replacement of the ascending aorta on a patient with an instrumentally detected aneurysm with an expansion of the lumen up to 60 mm, there was a marked decrease in exercise tolerance, a decrease in the contractile function of the left ventricular myocardium at rest, and an expansion of the pulmonary artery. It is shown that the leading factor was a decrease in the volume of systolic expansion of the aorta down to 5 ml (at the initial 13 ml), despite a noticeable increase in extensibility and a decrease in mechanical stiffness compared with initial indexes of the affected aortic wall. In this connection, the literature review is presented and the problems of creating aortic prostheses equivalent in terms of mechanical extensibility and elasticity to those for healthy biological tissues are discussed.

Keywords: aneurysm of the ascending aorta; prosthetics of the ascending aorta; extensibility; Young's modulus; systolic stretching of the aorta; coronary blood supply to the myocardium; case report.

To cite this article:

Friedman AV, Bergen TA, Sirota DA, Kozlov BN, Zhuravleva IYu, Tarkova AR, Ussov WYu, Chernyavskiy AM. Prospective evaluation of the extensibility of the ascending aorta wall and its vascular prosthesis in a patient with an aneurysm with technically flawless surgical correction and postoperative decrease in functional parameters: a case report. *Digital Diagnostics*. 2024;5(2):XX–XX. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD568070>

Copyright: © Eco-Vector, 2024

License: This article can be used under the [CC BY-NC-ND 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) License

Submitted: 06.08.2023

Accepted: 06.12.2023

Published online: 29.01.2024

АКТУАЛЬНОСТЬ

Хирургическое лечение аневризматических поражений аорты с расширением поперечника её восходящего колена более 5 см [1] традиционно является методом выбора в спасении таких пациентов от практически неизбежного риска разрыва аневризмы, острые случаи которого приводят к почти 100% -ной смертности [2–4].

Разработан ряд кардиохирургических вмешательств, которые предполагают замену восходящей аорты протезом по типу полной или частичной дуги [5].

В оценке результатов таких протезирований, как правило, исходят из достигаемого кардинального снижения риска смертности у этих пациентов [2], в то время как количественная оценка физиологических и биомеханических параметров восходящей аорты, качества жизни пациентов после протезирования, наличия и тяжести стенокардии и других показателей коронарной ишемии отходят на второй план [3]. Это в целом обоснованно, ибо спасение жизни пациента всегда первично.

Однако достижение устойчивого эффекта снижения смертности при хирургическом лечении аневризмы восходящей аорты неизбежно порождает необходимость дальнейшего совершенствования патофизиологических критериев, определяющих функциональное состояние пациентов, возможность реабилитации и возвращения к труду, состояние миокарда и факторов, влияющих на коронарную доставку крови к нему.

Восходящая аорта — важная анатомическая и функциональная часть сосудистой системы, обеспечивающей кровоснабжение миокарда, так как приток крови к сердечной мышце происходит почти исключительно в диастолу и осуществляется в пределах объёма систолического растяжения восходящей аорты [6]. Исследование эластических свойств восходящей аорты именно в аспекте обеспечения миокарда достаточным притоком крови за счёт спадения в диастолу растянутой перед тем в систолу аорты давно привлекает внимание физиологов и спортивных врачей [6], а также специалистов по разработке клапанов и сосудистых протезов [7]. Однако клиническое применение биофизических и биомеханических оценок эластичности аорты, как в одноцентровых, так и в межцентровых исследованиях, минимально [4]. Ранее нам удалось показать, что падение эластичности и растяжимости и увеличение жёсткости восходящей аорты — важнейший патологический фактор, способствующий развитию острого инфаркта миокарда [8, 9]. Очевидно не меньшим по своему клиническому значению является и исследование эластичности восходящей аорты у кардиохирургических больных с аневризматической патологией. Недостаточная эластичность протеза может служить ограничивающим, а порой и патологическим фактором.

В этой связи мы приводим здесь случай наблюдения за пациенткой, у которой, несмотря на неосложнённое протезирование восходящей аорты, не удалось достичь после операции достаточного уровня pO_2 , а также других показателей, необходимых для высоких функциональных свойств пациента, — например, толерантности к физической нагрузке. Эти показатели не только не увеличились, но, напротив, ухудшились, а сама пациентка на протяжении нескольких месяцев после операции продолжала и продолжает быть зависимой от использования концентратора кислорода для дыхания.

ОПИСАНИЕ СЛУЧАЯ

Представлен случай проспективного наблюдения динамики состояния биомеханических показателей аневризмы аорты в ходе хирургического лечения пациентки Б-к, 65 лет, ранее в течение 10 лет страдавшей артериальной гипертонией (под полным медикаментозным контролем артериального давления). У пациентки также диагностирован сахарный диабет 2-го типа, с компенсацией уровня глюкозы и гликозилированного гемоглобина до границ нормальных значений при приёме пероральных сахароснижающих препаратов. Других заболеваний в течение последних 15 лет не наблюдалось.

Первоначально пациентка обратилась к невропатологу в связи с учащением эпизодов головокружения и слабости, сопровождавшихся одышкой и преходящими краткосрочными эпизодами потери речи. В связи с подозрением на наличие критического стеноза внутренней сонной артерии или её ветвей, была направлена для проведения ультразвукового исследования и магнитно-резонансной (МР) ангиографии сонных артерий. При этих обследованиях предположение о наличии патологии сонных артерий не подтвердилось, степень сужения внутренних сонных артерий и их ветвей во всех локализациях не превышала 15–20%, но при каротидной МР-ангиографии было заподозрено патологическое расширение восходящей аорты до 57–60 мм в поперечнике. При МР-аортографии оно было полностью подтверждено (рис. 2, а), по

поводу чего больная была направлена в НИИК Томского НИМЦ РАН для консультации и кардиохирургического лечения.

Предоперационно было выполнено также коронароангиографическое и аортографическое исследование, подтвердившее полностью характер и протяжённость поражения аорты и исключившее коронарные стенозирующие поражения. Наибольшим стенозом был стеноз правой коронарной артерии в проксимальной трети, до 35% просвета артерии. В бассейне левой коронарной артерии стенозы ни в одной из её важнейших ветвей не превышали 25%.

Перед операцией протезирования аорты порог толерантности к физической нагрузке при велоэргометрическом тесте с контролем по данным ЭКГ составлял 25 Вт, при этом причиной прекращения теста служила одышка и мышечная слабость. Электрокардиографических признаков коронарной недостаточности при тесте не выявлено.

Как отмечалось выше, у пациентки было проведено МР-томографическое исследование сердца и стенки аорты с ЭКГ-синхронизацией [8], в том числе и с охватом грудной аорты вплоть до уровня диафрагмы. В частности, срезы МР томографии (МРТ) сердца по короткой и длинной осям были получены в:

- T1-взвешенных изображениях (ВИ): время повторения (time of repetition, TR) = 500 мс, время эхо (time of echo, TE) = 12 мс;
- T2-ВИ: TR=4000 мс, TE=25 мс;
- ssfp-взвешенных режимах.

Толщина срезов — 5–8 мм, матрица 256×392 или 256×256. В качестве компонента ЭКГ-синхронизированной МРТ сердца и грудной клетки выполняли исследование органов грудной клетки в аксиальных срезах, в T1-ВИ, с дыхательной и ЭКГ-синхронизацией, с удлинёнными показателями TR=1850–1900 мс и TE=32 мс (рис. 1). В этом режиме устойчиво визуализируются структуры крупных сосудов грудной полости, в частности их стенок. В связи с пограничной величиной показателя скорости клубочковой фильтрации — менее 30 мл/(мин×1,73 м²) — исследование выполнялось без дополнительного парамагнитного контрастного усиления.

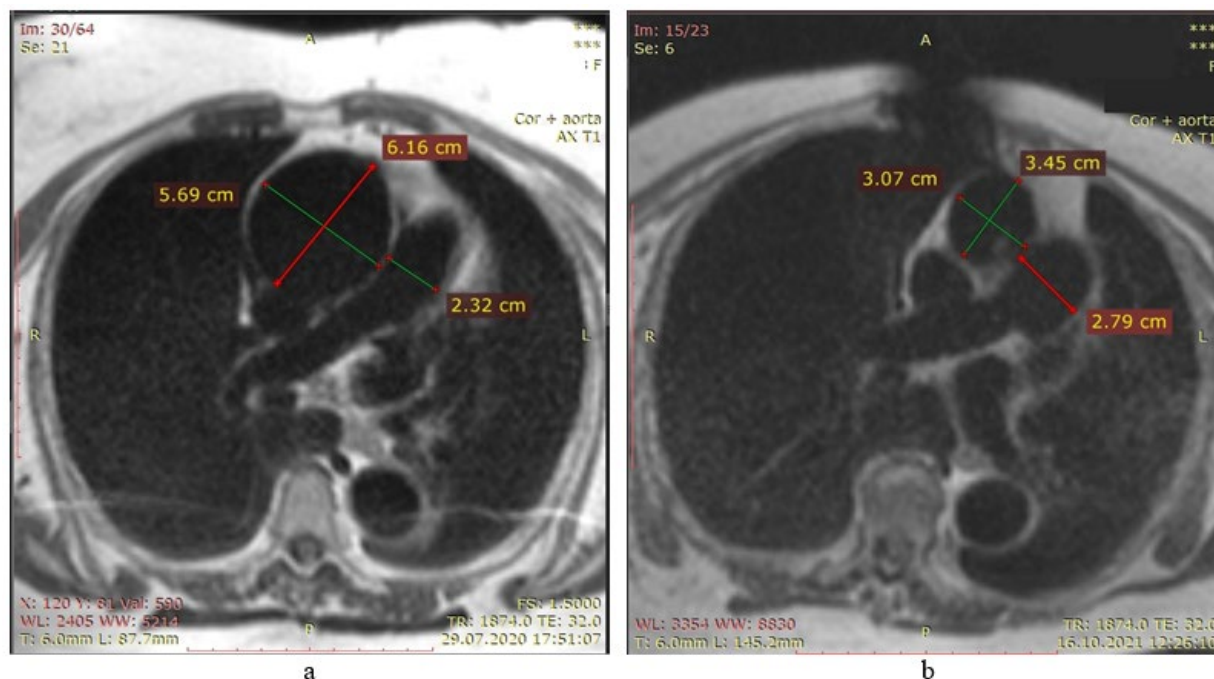


Рис. 1. Поперечные срезы T1-взвешенных изображений органов грудной клетки, в частности грудной аорты, на уровне бифуркации лёгочной артерии у пациентки Б-к: *a* — до протезирования аневризматически расширенной грудной аорты, видно критическое расширение аневризматической восходящей аорты до >6 см; *b* — после протезирования аневризматически расширенной грудной аорты, нормальные величины поперечника восходящей аорты. Нисходящая аорта в пределах нормы как до, так и после протезирования. Обращает внимание расширение лёгочной артерии после протезирования до 27 мм, при исходном поперечнике при поступлении 23 мм. На послеоперационной томограмме также присутствует артефакт в области грудины от проволоочного металлофиксатора.

Вслед за МРТ сердца проводилась ЭКГ-синхронизированная МРТ восходящей аорты на уровне её перекрёста с бифуркацией лёгочной артерии, в аксиальной плоскости, в кино-режиме, с записью 24

кадров на сердечный цикл, с определением изменений в ходе сердечного цикла толщины стенки аорты (рис. 2, *b*), диаметра и поперечной площади просвета аорты на уровне исследования (отмечен стрелкой на рис. 2, *a*). Проводилась стандартная обработка результатов МРТ сердца, с расчётом показателей конечно-диастолического (КДОЛЖ, мл) и конечно-систолического (КСОЛЖ, мл) объёмов и фракции выброса (ФВ) левого желудочка. Кроме того, по полученным данным бесконтрастной кино-МРТ был выполнен расчёт биомеханических показателей растяжимости аорты.

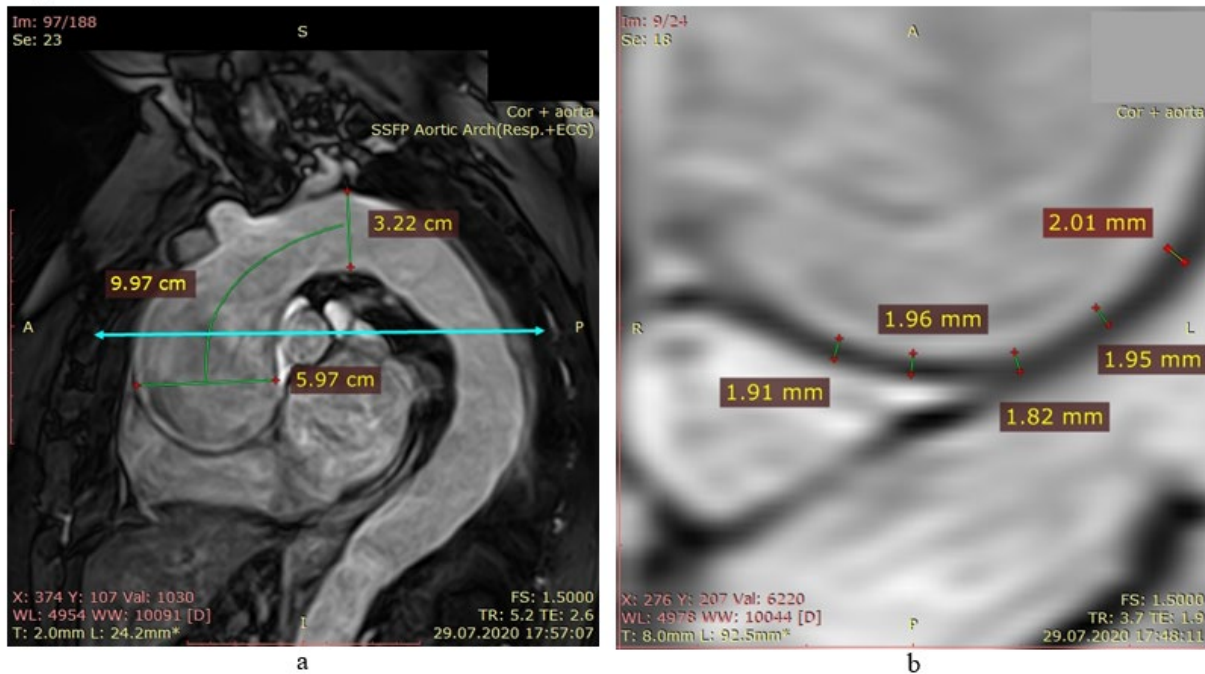


Рис. 2. ЭКГ-синхронизированная магнитно-резонансная томография пациентки Б-к: *a* — магнитно-резонансное ангиографическое исследование грудной аорты. Представлены размеры поперечника на надклапанном уровне и на уровне дуги аорты, а также расстояния между ними, используемые для расчёта показателей объёма восходящей аорты в систолу и диастолу и объёма систолического растяжения. Горизонтальной бирюзовой линией со стрелками по концам отмечен уровень томографического среза; *b* — поперечный томографический срез восходящей аорты в области стенки, с измерениями толщины для последующего расчёта показателей модуля Юнга. Измерения представлены тонкими зелёными линиями с соответствующими значениями рядом.

На основе этих измерений и линейной биофизической модели [10, 11] рассчитывалась величина поперечной растяжимости аорты [12]:

$$\text{Растяжимость}_{\text{норм}} = \frac{(S_{\text{сист}} - S_{\text{диаст}}) / S_{\text{диаст}}}{AD_{\text{пульс}}} \quad (1)$$

Кроме того, рассчитывалась растяжимость с нормировкой на пульсовое артериальное давление:

$$\text{Растяжимость}_{\text{норм}} = \frac{(S_{\text{сист}} - S_{\text{диаст}}) / S_{\text{диаст}}}{AD_{\text{пульс}}} \quad (2),$$

где $S_{\text{сист}}$ и $S_{\text{диаст}}$ — площадь поперечного сечения аорты в систолу и диастолу соответственно, а $AD_{\text{пульс}}$ — артериальное пульсовое давление, как представлено на рис. 3.

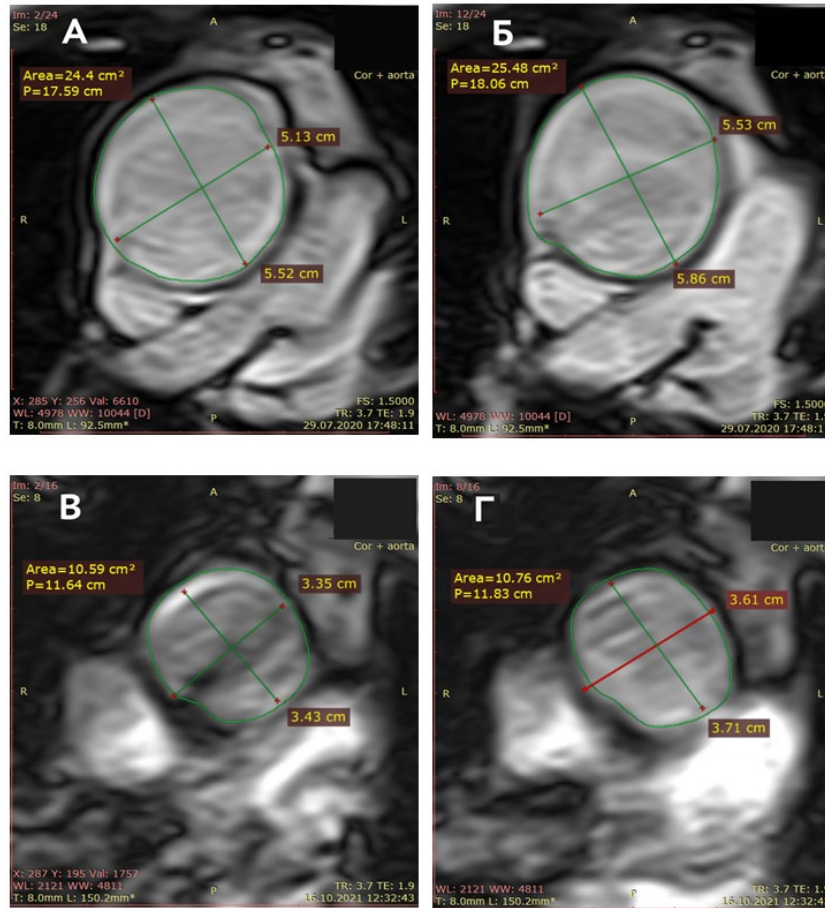


Рис. 3. Картина измерений поперечных размеров и площадей восходящей аорты в диастолу и систолу: верхний ряд — исходно, при поступлении (до операции протезирования аневризматически расширенной аорты); нижний ряд — после протезирования аорты синтетическим протезом; а, с — диастола; b, d — систола. Обращает внимание выраженное уменьшение поперечника аорты после хирургического вмешательства при относительно небольшой растяжимости поперечника просвета восходящей аорты.

Поперечный модуль Юнга для стенки восходящей аорты рассчитывался по данным ЭКГ-синхронизированной МРТ-аортографии по методике, детально изученной в биомеханических

$$E = \frac{d_{\text{диаст}}^2 \times (1 - 0,25) \times \Delta d_{\text{пульс}}}{2 \times h \times \Delta d_{\text{пульс}}} \times 133,3 \quad (3),$$

где E — модуль Юнга (Па),

$d_{\text{диаст}}$ — поперечный диаметр аорты в диастолу,

$\Delta d_{\text{пульс}}$ — прирост диаметра аорты в систолу

0,25 — квадрат коэффициента Пуассона для стенки аорты, о котором (о коэффициенте) известно, что он равен 0,5 [11],

h — толщина стенки аорты в диастолу (см. рис. 2, b)

$\Delta d_{\text{пульс}}$ — пульсовое артериальное давление,

133,3 — коэффициент перевода мм рт.ст. в Па.

Рассчитывался объём восходящей аорты, по протяжённости — от надклапанного уровня до середины дуги аорты (между брахиоцефальным стволом и устьем левой общей сонной артерии), в систолу и диастолу. Аорта в восходящем колене представлялась как деформированный, то есть равномерно несжимаемо изогнутый, усечённый конус протяжённостью l (длина участка «аортальный клапан—середина дуги аорты», как показано на рис. 1, а), с радиусом оснований, определяемым по поперечным срезам в кино-режиме: радиус нижнего основания — R , верхнего — r . Тогда объём усечённого деформированного конуса — восходящего колена аорты — с высокой

$$\text{точностью составляет [13]: } V = \frac{1}{3} \pi l (R^2 + Rr + r^2) \quad (4)$$

По разнице систолического и диастолического объёмов восходящей аорты определялась величина систолического объёмного расширения аорты $\Delta V_{\text{сист}}$, мл, которая определяет объём крови, доступный для коронарного кровоснабжения миокарда в диастолическую фазу сердечного цикла, когда как раз и осуществляется основное кровоснабжение миокарда [6, 14].

Пациентке в условиях искусственного кровообращения было выполнено протезирование восходящей аорты и половины дуги синтетическим протезом GORE-TEX (W.L. Gore & Associates, США) диаметром 35 мм, без замены при этом аортального клапана, поскольку его значимой недостаточности не отмечалось, а эффективный гемодинамический просвет аортального клапана в систолу по площади превышал 2,0 см². Устье брахиоцефального ствола было имплантировано в соответствующую браншу протеза, нарушений кровоснабжения в бассейне правой общей сонной артерии и подключичной артерии в послеоперационном периоде — не отмечено.

Послеоперационный период протекал без собственно хирургических осложнений, в том числе воспалительного характера, без каких бы то ни было признаков нарушения кровоснабжения жизненно важных органов. Наблюдалась синусовая тахикардия в покое (82–92 в минуту), выраженно усиливавшаяся при малых нагрузках. Дооперационная величина скорости клубочковой фильтрации, составлявшая 57–65 мл/(мин×1,73 м²), оставалась в этих пределах и после протезирования. Пациентка длительное время оставалась в условиях необходимости дыхания смесью с обогащённым содержанием кислорода, так как только в этом случае её состояние субъективно оценивалось как близкое к нормальному. При этом, по данным инструментального и клиничко-биохимического исследования, признаков послеоперационного инфаркта миокарда не отмечалось. При отсутствии обогащения дыхательной смеси с помощью мембранного концентратора кислорода показатель рО₂ составлял 81–83%, а при его использовании поднимался до 93–95% и (эпизодически в покое) выше. При этом в ходе обследования средствами перфузионной однофотонной компьютерной томографии с ^{99m}Tc-меченными микросферами признаков тромбоза или эмболии лёгочной артерии и её ветвей не было выявлено.

После хирургического вмешательства толерантность к физической нагрузке по сравнению с дооперационной резко снизилась и была минимальна как в госпитальный послеоперационный период, так и после выписки. Пациентка для подъёма на второй этаж, где она живёт, пользуется исключительно лифтом, а поход для проведения амбулаторного МРТ потребовал использования концентратора кислорода.

В послеоперационный период спустя 4 мес после операции было проведено повторное исследование — МРТ сердца и МР-эластография стенки аорты, показатели которых представлены в табл. 1 и 2 в сравнении с исходными.

Таблица 1. Показатели магнитно-резонансной томографии сердца пациентки Б-к до и после протезирования аорты

	Масса миокарда левого желудочка, г	КДОЛЖ, мл	ФВЛЖ, %	ММЛЖ, г	Объём левого предсердия, мл	Диаметр лёгочной артерии, мм
Исходно (при поступлении)	165	79,4	83	165	55,7	23
После протезирования восходящей аорты	161	94,2	73	161	69,4	28

Примечание. КДОЛЖ — конечно-диастолический объём левого желудочка; ФВЛЖ — фракция выброса левого желудочка; КСОЛЖ — конечно-систолический объём левого желудочка. Жирным шрифтом выделены показатели, указывающие на прогрессирование сердечной недостаточности — увеличение КДОЛЖ, снижение ФВЛЖ, увеличение объёма левого предсердия и расширение лёгочной артерии на 4 мм.

Параметры эластичности аорты после имплантации протеза заметно улучшились, впрочем, по-прежнему многократно превосходя норму [8], но за счёт уменьшения диаметра аорты на 2 см резко уменьшился показатель систолического объёмного расширения восходящей аорты $\Delta V_{\text{сист}}$.

Таблица 2. Показатели магнитно-резонансной эластографии стенки восходящей аорты пациентки Б-к до и после протезирования аорты

	Модуль Юнга стенки восходящей аорты, Па	Растяжимость восходящей аорты		$\Delta V_{\text{сист}}$, мл
		Абсолютная	Нормированная = Абсолютная / (Пульс АД)	
Исходно (при поступлении)	0,58×10 ⁶	0,0043	0,0043/25= 1,72×10 ⁻⁴	13,28
После протезирования восходящей аорты	0,260×10 ⁶	0,0161	0,0161/20=8,05×10 ⁻⁴	4,95

Послеоперационная величина модуля Юнга стенки аорты — точнее, протеза восходящей аорты — уменьшилась, а эластичность её возросла. Однако в целом величина объёма систолического

растяжения аорты всё же снизилась более чем вдвое, до ~5 мл (см. табл. 2), что безусловно недостаточно для адекватного обеспечения коронарного кровоснабжения [8]. При этом геометрические размеры протеза соответствовали паспортным, представленным в документации. Таким образом, даже в условиях отсутствия значимых коронарных стенозов и при безупречной собственно хирургической технике протезирования восходящей аорты, недостаток растяжимости аортальной стенки оказался критическим фактором, ограничивающим толерантность к нагрузке после протезирования и способствующим прогрессированию левожелудочковой недостаточности, хотя и без развития острого инфаркта миокарда.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования жёсткости аорты, как правило, используют апробированные первоначально в исследованиях на животных [15,16,17] методы внешней передачи высокочастотной механической волны на аорту, с помощью специального МРТ-совместимого генератора вибрационных волн, с последующей МРТ-регистрацией распространения волн по аортальной стенке [15,18, 19]. Такой подход заимствован из исследований эластичности паренхиматозных органов и используется достаточно широко [18, 19, 20].

Использование высокочастотной методики оценки механической эластичности аорты обеспечивает расчёт этого показателя на всём анатомическом протяжении области исследования — по ходу аорты [19], однако при этом расчёт объёма аорты на том или ином уровне, в первую очередь на уровне восходящей аорты, во внимание не принимается [2]. Необходимость учёта объёмных показателей различных участков аорты при её патологических поражениях стала привлекать детальное внимание в последнее время [15]

Использование картины растяжимости собственно поперечника аорты в ходе сердечного цикла под действием изменения артериального (внутриаортального) давления является в этом смысле более физиологичным [12], а главное — даёт возможность для случая восходящей аорты прямо оценить величину объёма крови, доступной для диастолического «закачивания» в коронарное русло [12]. В нашем случае оказалось, что именно эта расчётная возможность позволила однозначно определить причину послеоперационного состояния пациентки, которое первоначально приписывалось не выявленным дефектам хирургической техники, в итоге ничуть не подтвердившимся.

Данный пример иллюстрирует, что аортальное звено является важнейшим в обеспечении адекватного кровоснабжения миокарда по коронарному руслу [6, 12], а в случае протезирования восходящей аорты эластичность протеза играет для этого обеспечения критическую роль [7]. Это тем более существенно, что показана взаимосвязь между воспалительным поражением аортальной стенки [24] и её жёсткостью [25] — и частотой и тяжестью нарушений мозгового кровообращения. Повышенная жёсткость аортальной стенки — доказанный предиктор повышенной частоты коронарных нарушений у инфарктных пациентов по данным как моноцентровых [12], так и многоцентровых исследований [8, 26]. У кардиологических пациентов, не требующих кардиохирургических вмешательств, показано, что возможно значительное улучшение показателей растяжимости и упругости аорты в ходе медикаментозной терапии [27].

Ранее отмечалось, что дальнейшее развития материалов для протезирования восходящей аорты по-видимому безальтернативно направлено в сторону использования синтетических и многокомпонентных материалов с сохранённой эластичностью, способных обеспечить адекватное диастолическое кровоснабжение миокарда и толерантность к физической нагрузке [7]. Эта проблема вполне осознаётся производителями [28, 29], и это очевидно в нашем случае: механическая жёсткость стенки аорты после протезирования уменьшилась более чем вдвое по сравнению с аневризматической аортой до операции, а растяжимость сечения по площади улучшилась более чем втрое (см. табл. 2). Однако, в условиях уменьшенного относительно исходной аневризмы аорты диаметра протеза, свойств современных синтетических материалов оказывается недостаточно для поддержания объёмной систолической растяжимости восходящей аорты — показателя $\Delta V_{\text{сист}}$.

С этой точки зрения безусловным преимуществом по параметрам механической растяжимости и эластичности обладают биологические графты аорты [29, 30], выполненные с помощью специальных технологий из крупных магистральных сосудов крупного рогатого скота, с сохранёнными структурами коллагеновых и эластиновых волокон, пока единственные, способные обеспечить сохранение растяжимости стенки такой сложной гемодинамической конструкции, как аорта [30]. МРТ-эластометрия при этом может обеспечить мониторинг упругих свойств аорты после её протезирования как угодно часто и продолжительно по времени наблюдения [8] и

может служить методом оценки состояния стенки аорты и показателей механической растяжимости у пациентов с протезированием её восходящего колена и в эксперименте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методически, с точки зрения развития МРТ-эластометрии, существенно, что использование этого метода для получения результатов количественной оценки биомеханического состояния восходящей аорты является важной клинической информацией. Она необходимо должна приниматься во внимание при исследованиях у пациентов с заболеваниями аорты, как атеросклеротического, так и любого иного генеза, и — как в нашем случае — при протезировании необратимо аневризматически изменённой восходящей аорты.

Метод ЭКГ-синхронизированной МРТ-эластометрии для получения показателей растяжимости и расчёта модуля Юнга для поражённой стенки аорты на сегодня безальтернативен, поскольку методически близкий метод эластометрии по данным рентгеновской компьютерной томографии имманентно сопряжён с лучевой нагрузкой на пациента.

Обоснованно полагать расширение клинической применимости МРТ-эластометрии, поскольку расчёт показателя объёма систолического расширения аорты, вероятно, окажется клинически информативен и при других различных по генезу нарушениях биомеханики аорты и патологии коронарного кровообращения.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: А.В. Фридман — разработка плана работы, обработка данных, клиническая оценка результатов МРТ, написание и редактирование текста статьи, подготовка иллюстраций; Т.А. Берген - разработка плана работы, клиническая оценка результатов МРТ, редактирование текста статьи, окончательное одобрение публикационной версии статьи; Д.А. Сирота - разработка плана работы, клиническая оценка результатов МРТ и оценка результатов кардиохирургического вмешательства, окончательное одобрение публикационной версии статьи; Б.Н. Козлов — выполнение кардиохирургического вмешательства и оценка его результатов, редактирование текста статьи; И.Ю. Журавлева — участие в разработке концепции работы, редактирование текста статьи, окончательное одобрение публикационной версии статьи; А.Р. Таркова - клиническая оценка результатов МРТ, написание текста статьи, подготовка иллюстраций; В.Ю. Усов - разработка концепции работы, обработка данных, клиническая оценка результатов МРТ, написание текста статьи, подготовка иллюстраций, окончательное одобрение публикационной версии статьи; А.М. Чернявский - разработка концепции работы, клиническая оценка результатов МРТ, редактирование текста, окончательное одобрение публикационной версии статьи

Информированное согласие на публикацию. Авторы получили письменное согласие пациентки на публикацию медицинских данных и фотографий в журнале Digital Diagnostics.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. A.V. Friedman — development of a research plan, data processing, clinical evaluation of MRI results, writing text, editing text, preparing illustrations for the article. T.A. Bergen - development of the work plan, clinical evaluation of MRI results, text editing, final approval of the publication version of the article; D.A. Sirota - development of the work plan, clinical evaluation of MRI results and evaluation of cardiac surgery results, final approval of the publication version of the article; B.N. Kozlov — performing cardiac surgery and evaluating its results, editing the text; I.Y. Zhuravleva — participation in the development of the work

concept, text editing, final approval of the publication version of the article; A.R. Tarkova - clinical evaluation of MRI results, writing the text, preparing illustrations for the article, W.Yu.Ussov - development of the work concept, data processing, clinical evaluation of MRI results, writing the text, preparation of illustrations for the article, final approval of the publication version of the article; A.M. Chernyavsky - development of the work concept, clinical evaluation of MRI results, text editing, final approval of the publication version of the article.

Consent for publication. Written consent was obtained from the patient for publication of relevant medical information and all of accompanying images within the manuscript in Digital Diagnostics Journal.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокерия Л.А., Малащенко А.И., Русанов Н.И., и др. Хирургическое лечение аневризмы восходящей аорты с сопутствующим поражением коронарных артерий // *Анналы хирургии*. 2004. № 2. С. 35–42.
2. Константинов Б.А., Белов Ю.В., Кузнецовский Ф.В. Аневризма восходящего отдела и дуги аорты. Москва : Астрель, 2006.
3. Белов Ю.В., Исаев Р.М. Современные стратегии оперативного лечения аневризм дуги аорты // *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2014. № 10. С. 122–126.
4. Сирота Д.А., Жульков М.О., Хван Д.С., и др. Предикторы летальности, ремоделирования и возникновения аортосвязанных событий при различных вариантах хирургии проксимального расслоения аорты // *Современные технологии в медицине*. 2023. Т. 15, № 1. С. 38–52. doi: 10.17691/stm2023.15.1.05
5. Белов Ю.В., Исаев Р.М. Стратификация риска в сердечно-сосудистой хирургии // *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2014. № 7. С. 78–81.
6. Карпман В.Л., Орёл В.Р. Импеданс артериальной системы и сердечная деятельность // *Физиология человека*. 1985. № 4. С. 628–633.
7. Журавлева И.Ю., Ляшенко М.М., Шаданов А.А., Сирота Д.А., Чернявский А.М. Quo vadimus? Фундаментальные проблемы разработки гибридных протезов грудной аорты // *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2021. Т. 27, № 4. С. 103–112. doi: 10.33529/ANGIO2021412
8. Усов В.Ю., Игнатенко Г.А., Берген Т.А., и др. Вычислительная оценка механоэластических свойств и парамагнитного контрастного усиления стенки восходящей аорты при остром инфаркте и некоронарных повреждениях миокарда, по данным динамической ЭКГ-синхронизированной МР-томографии (МР-эластометрии) // *Трансляционная медицина*. 2021. Т. 8, № 6. С. 43–58. doi: 10.18705/2311-4495-2021-6-43-58
9. Усов В.Ю., Игнатенко Г.А., Максимова А.С., и др. Взаимосвязи структурных изменений стенки восходящей аорты и миокарда, по данным МР-томографии с контрастным усилением у пациентов после инфаркта миокарда // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2023. Т. 22, № 1. С. 41–51. doi: 10.24884/1682-6655-2023-22-1-41-51
10. Пурия Б.А., Касьянов В.А. Биомеханика крупных кровеносных сосудов человека. Рига : Зинатне, 1980.
11. Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У. Механика кровообращения. Москва : Мир, 1981.
12. Скрипник А.Ю., Фокин В.А., Мирончук Р.Р., и др. Оценка эластических характеристик стенки восходящего отдела аорты при помощи компьютерно-томографической ангиографии в режиме электрокардиографической синхронизации с расширенной постпроцессорной обработкой данных // *Российский кардиологический журнал*. 2019. Т. 24, № 12. С. 48–54. doi: 10.15829/1560-4071-2019-12-48-54
13. Зельдович Я.Б. Высшая математика для начинающих. Москва : Наука, 1963.
14. Дудко В.А., Карпов Р.С. Атеросклероз сосудов сердца и головного мозга. Томск : STT, 2002.
15. Kolipaka A., Woodrum D., Araoz P.A., Ehman R.L. MR elastography of the in vivo abdominal aorta: a feasibility study for comparing aortic stiffness between hypertensives and normotensives // *J Magn Reson Imaging*. 2012. Vol. 35, N 3. P. 582–586. doi: 10.1002/jmri.22866

16. Damughatla A.R., Raterman B., Sharkey-Toppen T., et al. Quantification of aortic stiffness using MR elastography and its comparison to MRI-based pulse wave velocity // *J Magn Reson Imaging*. 2015. Vol. 41, N 1. P. 44–51. doi: 10.1002/jmri.24506
17. Kolipaka A., Araoz P.A., McGee K.P., Manduca A., Ehman R.L. Magnetic resonance elastography as a method for the assessment of effective myocardial stiffness throughout the cardiac cycle // *Magn Reson Med*. 2010. Vol. 64, N 3. P. 862–870. doi: 10.1002/mrm.22467
18. Dresner M.A., Rose G.H., Rossman P.J., et al. Magnetic resonance elastography of skeletal muscle // *J Magn Reson Imaging*. 2001. Vol. 13, N 2. P. 269–276. doi: 10.1002/1522-2586(200102)13:2<269::aid-jmri1039>3.0.co;2-1
19. Hrabak-Paar M., Kircher A., Al Sayari S., et al. Variability of MRI Aortic Stiffness Measurements in a Multicenter Clinical Trial Setting: Intraobserver, Interobserver, and Intracenter Variability of Pulse Wave Velocity and Aortic Strain Measurement // *Radiol Cardiothorac Imaging*. 2020. Vol. 2, N 2. P. e190090. doi: 10.1148/ryct.2020190090Woodrum
20. D.A., Romano A.J., Lerman A., et al. Vascular wall elasticity measurement by magnetic resonance imaging // *Magn Reson Med*. 2006. Vol. 56, N 3. P. 593–600. doi: 10.1002/mrm.20991
21. Кобелев Е., Шаданов А.А., Сирота Д.А., и др. Объёмный анализ компьютерно-томографической ангиографии при лечении расслоения грудной аорты на примере с семилетним периодом наблюдения // *Медицинская визуализация*. 2022. Т. 26, № 3. С. 46–56. doi: 10.24835/1607-0763-1060
22. Кобелев Е., Берген Т.А., Таркова А.Р., и др. Новый взгляд на структурные изменения корня аорты при стенозе аортального клапана // *Современные технологии в медицине*. 2022. Т. 14, № 2. С. 51–58. doi: 10.17691/stm2022.14.2.05
23. Непомнящих Л.М. Морфогенез важнейших общепатологических процессов в сердце. Новосибирск : Наука, 1991.
24. Усов В.Ю., Беличенко О.И., Максимова А.С., и др. Магнитно-резонансная томография аортальной стенки с парамагнитным контрастным усилением в оценке тяжести её атеросклеротического поражения и прогнозировании окклюзионно-тромботических артериальных осложнений // *Терапевт*. 2017. Т. 128, № 9. С. 55–62.
25. Badji A., Sabra D., Bherer L., et al. Arterial stiffness and brain integrity: A review of MRI findings // *Ageing Res Rev*. 2019. Vol. 53. doi: 10.1016/j.arr.2019.05.001
26. Lechner I., Reindl M., Tiller C., et al. Determinants and prognostic relevance of aortic stiffness in patients with recent ST-elevation myocardial infarction // *Int J Cardiovasc Imaging*. 2022. Vol. 38, N 1. P. 237–247. doi: 10.1007/s10554-021-02383-0
27. Прибылов С.А., Яковлева М.В., Прибылов В.С., и др. Артериальная ригидность у пациентов с острым коронарным синдромом без стойкого подъёма сегмента ST в сочетании с хронической болезнью почек и артериальной гипертензией и её коррекция на фоне антигипертензивной терапии // *Человек и его здоровье*. 2022. Т. 25, № 1. С. 19–27. doi: 10.21626/vestnik/2022-1/03
28. Сойнов И.А., Журавлева И.Ю., Кулябин Ю.Ю., и др. Тканевая инженерия в сердечно-сосудистой хирургии: эволюция и современное состояние проблемы // *Вестник экспериментальной и клинической хирургии*. 2019. Т. 12, № 1. С. 71–80. doi: 10.18499/2070-478X-2019-12-1-71-80
29. Журавлева И.Ю., Тимченко Т.П., Владимиров С.В., и др. Ab ovo: факторы, влияющие на радиальную жёсткость стент-графтов грудного отдела аорты // *Современные технологии в медицине*. 2021. Т. 13, № 1. С. 17–26. doi: 10.17691/stm2021.13.1.02
30. Васильева М.Б., Кузнецова Е.В., Русакова Я.Л., и др. Механические свойства нативной и децеллюляризованной стенки аорты после длительного хранения в биоцидных растворах // *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2021. Т. 23, № 4. С. 86–94. doi: 10.15825/1995-1191-2021-4-86-94

REFERENCES

1. Bokeriya LA, Malashenkov AI, Rusanov NI, et al. Surgical treatment of ascending aortic aneurysm with concomitant coronary artery disease. *Annaly khirurgii*. 2004(2):35–42. (In Russ).

2. Konstantinov BA, Belov YuV, Kuznechevskii FV. *Aneurysm of the ascending aorta and aortic arch*. Moscow: Astrel'; 2006. (In Russ).
3. Belov IuV, Isaev PM. Modern strategies of surgical treatment of aortic arch aneurysms. *Pirogov Russian Journal of Surgery (Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova)*. 2014(10):122–126.
4. Sirota DA, Zhulkov MO, Khvan DS. Predictors of Lethality, Remodeling, and Aorta-Related Events in Different Types of Proximal Aortic Dissection Surgery. *Modern Technologies in Medicine*. 2023;15(1):38–52. doi: 10.17691/stm2023.15.1.05
5. Belov IuV, Isaev RM. Risk stratification in cardiovascular surgery. *Pirogov Russian Journal of Surgery (Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova)*. 2014(7):78–81.
6. Karpman VL, Orel VR. Arterial system impedance and cardiac function. *Human Physiology*. 1985;(4):628–633. (In Russ).
7. Zhuravleva IYu, Lyashenko MM, Shadanov AA, Sirota DA, Chernyavskiy AM. Quo vadimus? Fundamental problems of developing hybrid prostheses of thoracic aorta. *Angiology and vascular surgery*. 2021;27(4):103–112. doi: 10.33529/ANGIO2021412
8. Ussov WYu, Ignatenko GA, Bergen TA, et al. Computational evaluation of mechano-elastic properties and of paramagnetic contrast enhancement of thoracic aortic wall in acute myocardial infarction and in non-coronarogenic myocardial damage, from the data of dynamic ECG-gated MRI (MR-elastometry). *Translational Medicine*. 2021;8(6):43–58. doi: 10.18705/2311-4495-2021-6-43-58
9. Ussov WYu, Ignatenko GA, Maksimova AS, et al. The relationship of structural changes in the wall of the ascending aorta and myocardium according to chest contrast-enhanced MRI in myocardial infarction patients. *Regional blood circulation and microcirculation*. 2023;22(1):41–51. doi: 10.24884/1682-6655-2023-22-1-41-51
10. Purinya BA, Kas'yanov VA. *Biomechanics of human large blood vessels*. Riga: Zinatne; 1980. (In Russ).
11. Karo K, Pedli T, Shroter R, Sid U. *Circulatory mechanics*. Moscow: Mir; 1981. (In Russ).
12. Skripnik AYU, Fokin VA, Mironchuk RR, et al. Assessment of the elastic properties of the ascending aorta using electrocardiographic synchronized computed tomography angiography with advanced data processing. *Russian Journal of Cardiology*. 2019;24(12):48–54. doi: 10.15829/1560-4071-2019-12-48-54
13. Zel'dovich YaB. *Advanced Math for Beginners*. Moscow: Nauka; 1963. (In Russ).
14. Dudko VA, Karpov RS. *Atherosclerosis of heart and brain vessels*. Tomsk: STT; 2002. (In Russ).
15. Kolipaka A, Woodrum D, Araoz PA, Ehman RL. MR elastography of the in vivo abdominal aorta: a feasibility study for comparing aortic stiffness between hypertensives and normotensives. *J Magn Reson Imaging*. 2012;35(3):582–586. doi: 10.1002/jmri.22866
16. Damughatla AR, Raterman B, Sharkey-Toppen T, et al. Quantification of aortic stiffness using MR elastography and its comparison to MRI-based pulse wave velocity. *J Magn Reson Imaging*. 2015;41(1):44–51. doi: 10.1002/jmri.24506
17. Kolipaka A, Araoz PA, McGee KP, Manduca A, Ehman RL. Magnetic resonance elastography as a method for the assessment of effective myocardial stiffness throughout the cardiac cycle. *Magn Reson Med*. 2010;64(3):862–870. doi: 10.1002/mrm.22467
18. Dresner MA, Rose GH, Rossman PJ, et al. Magnetic resonance elastography of skeletal muscle. *J Magn Reson Imaging*. 2001;13(2):269–276 doi: 10.1002/1522-2586(200102)13:2<269::aid-jmri1039>3.0.co;2-1
19. Hrabak-Paar M, Kircher A, Al Sayari S, et al. Variability of MRI Aortic Stiffness Measurements in a Multicenter Clinical Trial Setting: Intraobserver, Interobserver, and Intracenter Variability of Pulse Wave Velocity and Aortic Strain Measurement. *Radiol Cardiothorac Imaging*. 2020;2(2):e190090. doi: 10.1148/ryct.2020190090
20. Woodrum DA, Romano AJ, Lerman A, et al. Vascular wall elasticity measurement by magnetic resonance imaging. *Magn Reson Med*. 2006;56(3):593–600. doi: 10.1002/mrm.20991
21. Kobelev E, Shadanov AA, Sirota DA, et al. Volumetric analysis on computed tomography Angiography in the management of thoracic aortic dissection in case of seven years follow-up period. *Medical Visualization*. 2022;26(3):46–56. doi: 10.24835/1607-0763-1060
22. Kobelev E, Bergen TA, Tarkova AR, et al. A New Look at Structural Changes in the Aortic Root in Aortic Valve Stenosis. *Modern Technologies in Medicine*. 2022;14(2):51–58. doi: 10.17691/stm2022.14.2.05
23. Nepomnyashchikh LM. *Morphogenesis of the most important common pathologic processes in the heart*. Novosibirsk: Nauka; 1991. (In Russ).

24. Ussov WYu, Belichenko OI, Maksimova AS, et al. Magnetic resonance imaging of the aortic wall with paramagnetic contrast enhancement in assessing the severity of its atherosclerotic lesion and predicting occlusive thrombotic arterial complications. *Terapevt.* 2017;128(9):55–62. (In Russ).
25. Badji A, Sabra D, Bherer L, et al. Arterial stiffness and brain integrity: A review of MRI findings. *Ageing Res Rev.* 2019;53. doi: 10.1016/j.arr.2019.05.001
26. Lechner I, Reindl M, Tiller C, et al. Determinants and prognostic relevance of aortic stiffness in patients with recent ST-elevation myocardial infarction. *Int J Cardiovasc Imaging.* 2022;38(1):237–247. doi: 10.1007/s10554-021-02383-0
27. Pribylov SA, Yakovleva MV, Pribylov VS, et al. Arterial stiffness in patients with acute coronary syndrome without persistent ST segment elevation combined with chronic kidney disease and arterial hypertension and its correction with antihypertensive therapy. *Humans and their health.* 2022;25(1):19–27. doi: 10.21626/vestnik/2022-1/03
28. Soynov IA, Zhuravleva IY, Kulyabin YY, et al. Tissue Engineering in Cardiovascular Surgery: Evolution and Contemporary Condition of the Problem. *Journal of Experimental and Clinical Surgery.* 2019;12(1):71–80. doi: 10.18499/2070-478X-2019-12-1-71-80
29. Zhuravleva IYu, Timchenko TP, Vladimirov SV, et al. Ab ovo: Factors Affecting the Radial Stiffness of Thoracic Aorta Stent-Grafts. *Modern Technologies in Medicine.* 2021;13(1):17–26. doi: 10.17691/stm2021.13.1.02
30. Vasilyeva MB, Kuznetsova EV, Rusakova YaL, et al. Mechanical properties of native and decellularized aortic wall after long-term storage in biocide solutions. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs.* 2021;23(4):86–94. doi: 10.15825/1995-1191-2021-4-86-94

ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

Усов Владимир Юрьевич, д-р мед. наук, профессор; адрес: Россия, Новосибирск, 630090, ул. Речкуновская, 15; ORCID: 0000-0001-7978-5514; eLibrary SPIN: 1299-2074; e-mail: ussov1962@yandex.ru	Wladimir Yu. Ussov, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor; address: 15 Rechkunovskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russia; ORCID: 0000-0001-7978-5514; eLibrary SPIN: 1299-2074; e-mail: ussov1962@yandex.ru
Фридман Александр Владимирович; ORCID: 0000-0002-2300-2418; eLibrary SPIN: 8547-4380; e-mail: fridman_a@meshalkin.ru	Alexander V. Friedman, MD; ORCID: 0000-0002-2300-2418; eLibrary SPIN: 8547-4380; e-mail: fridman_a@meshalkin.ru
Берген Татьяна Андреевна, д-р мед. наук; ORCID: 0000-0003-1530-1327; eLibrary SPIN: 5467-7347; e-mail: tbergen@yandex.ru	Tatiana A. Bergen, MD, Dr. Sci. (Med.); ORCID: 0000-0003-1530-1327; eLibrary SPIN: 5467-7347; e-mail: tbergen@yandex.ru
Сирота Дмитрий Андреевич, канд. мед. наук; ORCID: 0000-0002-9940-3541; eLibrary SPIN: 4706-7549; e-mail: d_sirota@meshalkin.ru	Dmitry A. Sirota, MD, Cand. Sci. (Med.); ORCID: 0000-0002-9940-3541; eLibrary SPIN: 4706-7549; e-mail: d_sirota@meshalkin.ru
Козлов Борис Николаевич, д-р мед. наук; ORCID: 0000-0002-0217-7737; eLibrary SPIN: 9265-9432; e-mail: kbn@cardio-tomsk.ru	Boris N. Kozlov, MD, Dr. Sci. (Med.); ORCID: 0000-0002-0217-7737; eLibrary SPIN: 9265-9432; e-mail: kbn@cardio-tomsk.ru
Журавлева Ирина Юрьевна, д-р мед. наук, профессор; ORCID: 0000-0002-1935-4170; eLibrary SPIN: 7322-1480; e-mail: zhuravleva_i@meshalkin.ru	Irina Yu. Zhuravleva, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor; ORCID: 0000-0002-1935-4170; eLibrary SPIN: 7322-1480; e-mail: zhuravleva_i@meshalkin.ru
Таркова Александра Романовна, канд. мед. наук; ORCID: 0000-0002-4291-6047; eLibrary SPIN: 8547-4380;	Alexandra R. Tarkova, MD, Cand. Sci. (Med.); ORCID: 0000-0002-4291-6047; eLibrary SPIN: 8547-4380;

e-mail: a_tarkova@meshalkin.ru	e-mail: a_tarkova@meshalkin.ru
Чернявский Александр Михайлович, д-р мед. наук, профессор, член-корреспондент РАН; ORCID: 0000-0001-9818-8678; eLibrary SPIN: 5286-6950; e-mail: a_cherniavsky@meshalkin.ru	Alexander M. Chernyavskiy, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; ORCID: 0000-0001-9818-8678; eLibrary SPIN: 5286-6950; e-mail: a_cherniavsky@meshalkin.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author