



МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Оригинальная статья
УДК 612.15:616.1
<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2023-1-40-51>

Перспективы метода магнитно-резонансной томографии для оценки биоэластической функции стенки аорты

К. Р. Бриль^{*,1}, А. А. Пронкин^{2,3}, Т. Н. Галян¹,
М. В. Малахова¹, В. Ю. Усов^{4,5}, В. В. Ховрин¹

¹ ФГБНУ «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского», Москва

² ФГБНУ «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук», Москва

³ ФГБОУ «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Россия

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия

⁵ ФГБНУ «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук»

Реферат

Отчетливый рост сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) и заболеваний аорты в мире требует точных диагностических методов их раннего прогнозирования. В современных исследованиях все больше внимания уделяется биомеханике и числовым моделям точных количественных расчетов. Оценка патологии аорты с помощью магнитно-резонансной томографии (МРТ) приобретает большую клиническую значимость, поскольку дает возможность одновременной оценки анатомической топографии и физических свойств аорты. Широкое изучение изменяющихся биомеханических процессов дополнит имеющиеся представления об основах формирования аневризмы и расслоения аорты. МРТ является современным неинвазивным методом, предоставляющим необходимые данные для оценки физических свойств стенки и направленных потоков в аорте.

*** Бриль Кристина Руслановна**, аспирант ФГБНУ «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского», Москва.

Адрес: 119991, Москва, Абрикосовский пер., 2.

Тел.: +7 (917) 538-28-38. Электронная почта: kr.bril@yandex.ru

ORCID.org/0000-0001-8789-0330

Kristina R. Bril, Postgraduate, Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery, Moscow.

Address: 2, Abrikosovsky per., Moscow, 119991, Russia.

Phone number: +7 (917) 538-28-38. E-mail: kr.bril@yandex.ru

ORCID.org/0000-0001-8789-0330

© К. Р. Бриль, А. А. Пронкин, Т. Н. Галян, М. В. Малахова, В. Ю. Усов, В. В. Ховрин.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография аорты, жесткость стенки аорты, эластичность аорты, модуль Юнга, скорость пульсовой волны.

Финансирование исследования и конфликт интересов

Исследование не финансировалось какими-либо источниками. Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов. Мнения, изложенные в статье, принадлежат авторам рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

MEDICAL TECHNOLOGY

Original research

Prospects of the Magnetic Resonance Imaging Method for Assessing the Bioelastic Function of the Aortic Wall

**Kristina R. Bril^{*1}, Aleksandr A. Pronkin^{2,3}, Tat'yana N. Galyan¹,
Mariya V. Malakhova¹, Vladimir Yu. Usov^{4,5}, Valeriy V. Khovrin¹**

¹ B. V. Petrovsky National Research Centre of Surgery, Moscow

² Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow

³ National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russia

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University, Russia

⁵ Research Institute of Cardiology of Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences

Abstract

The distinct growth of cardiovascular diseases (CVD) and aortic diseases in the world requires accurate diagnostic methods for their early prediction. In modern research, more and more attention is paid to biomechanics and numerical models of accurate quantitative calculations. The assessment of aortic pathology using magnetic resonance imaging (MRI) acquires great clinical significance, since it makes it possible to simultaneously assess the anatomical topography and physical properties of the aorta. A broad study of changing biomechanical processes will complement the existing ideas about the basics of aneurysm formation and aortic dissection. MRI is a modern non-invasive method that provides the necessary data to assess the physical properties of the wall and directional flows in the aorta.

Key words: Magnetic Resonance Imaging of the Aorta, Aortic Wall Stiffness, Aortic Elasticity, Young's Modulus, Pulse Wave Velocity.

Research funding and conflict of interest

The study was not funded by any sources. The authors state that this work, its topic, subject and content do not affect competing interests. The opinions expressed in the article belong to the authors of the manuscript. The authors confirm the compliance of their authorship with the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, the preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Актуальность

Лучевая диагностика занимает лидирующие позиции в изучении патологии сердечно-сосудистой системы. Проведение малоинвазивной диагностики с прогнозированием течения и выявлением осложнений ориентирует к правильной тактике ведения пациентов и способствует своевременному началу лечения [3, 8].

Количественная оценка параметров биоэластической функции стенки аорты, ее жесткости и скорости пульсовой волны (СПВ) может иметь большую клиническую значимость в раннем выявлении сердечно-сосудистых заболеваний и их осложнений [11].

Уже в 70–90-е годы В. Л. Карпману удалось с применением баллисто- и фонокардиографии сформулировать и доказать положение о ведущей роли аортальной растяжимости и эластичности (комплайнса) в обеспечении реакции сердца на спортивные физиологические и предельные нагрузки. Однако до сих пор исследованиям биомеханики аорты в клинической практике не уделяется достаточного внимания.

На протяжении долгого времени золотым стандартом и единственным методом оценки жесткости аорты являлся метод определения каротидно-фemorальной скорости пульсовой волны в значениях расстояния от сегмента на шее (места определения револны общей сонной артерии) до сегмента на бедре (места определения револны бедренной артерии) [2]. Недостаток данного способа заключается в том, что проводится только общая оценка скорости пульсовой волны в аорте на всем пути сонно-бедренной артерии, без учета геометрических особенностей.

В литературе существуют примеры определения растяжимости аорты на различных уровнях при ее атеросклеротическом поражении с помощью спиральной рентгеновской компьютерной томографии (КТ) [4], где комплаинс

аорты рассчитывается после определения фаз конечной систолы и диастолы по данным максимального диаметра аорты, толщины стенки аорты и площади поперечного сечения аорты. Лучевая нагрузка и использование внутривенного контрастного вещества являются стандартным недостатком компьютерной томографии, при этом отсутствует дополнительная возможность одновременной оценки объемов и параметров кровотока в аорте.

МРТ является альтернативным неинвазивным методом оценки региональной жесткости аорты во всех ее сегментах, который впервые обсуждался в 1989 г. [8]. Растяжимость аорты с помощью МРТ у пациентов с артериальной гипертонией в РФ уже изучалась (Мартынов А. И. и др. 2001), при этом оценка биоэластических свойств аорты могла проводиться и у пациентов с острым инфарктом миокарда и при некоронарных его повреждениях [5]. Redheuil A. и др. (2014) в своем исследовании показали, что снижение растяжимости проксимального отдела аорты играет ключевую роль в смертности и тяжелых ССЗ у населения.

Однако при перспективной роли МРТ в диагностике заболеваний аорты до сих пор нет полной информации о клиническом значении МРТ-показателей физических свойств аорты у здоровых людей и у пациентов из группы риска.

Цель: оценить результаты фазово-контрастной МРТ с использованием расчетных физических значений эластических свойств аортальной стенки у пациентов с заболеваниями сердечной мышцы и без расслоения и аневризм аорты.

Методика магнитно-резонансной томографии аорты

В настоящее время в клинической практике Федерального государствен-

ного бюджетного научного учреждения «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского» (Москва) идет успешное применение фазово-контрастной МРТ (2D MRI) и методов вычислительной гидродинамики в оценке *in vivo* кровотока и биоэластических свойств стенок грудной и брюшной аорты [1].

В проспективном исследовании проанализированы данные 78 пациентов: мужчин — 52 (66,7 %), женщин — 26 (33,3 %), средний возраст $46,7 \pm 15,77$ года, без анамнеза заболеваний аорты (табл. 3, 4). Обследования включали в себя:

- 1) физикальные параметры (рост, масса тела, артериальное давление (АД) и частота сердечных сокращений (ЧСС) при каждой МРТ);
- 2) результаты этапных МР-исследований сердечно-сосудистой системы.

Распределение в группах обследуемых пациентов было следующим:

1-я группа — здоровые добровольцы ($n = 43$ (55,1 %), средний возраст $38,02 \pm 13,22$ года);

2-я группа — пациенты с ишемической болезнью сердца ($n = 14$ (17,9 %), средний возраст $54,78 \pm 13,91$ года);

3-я группа — пациенты с выявленной концентрической гипертрофией миокарда ($n = 21$ (27 %), средний возраст $59 \pm 9,92$ года).

Все данные МРТ были получены при использовании МР-томографа с напряженностью магнитного поля 1,5 Т. МРТ сердечно-сосудистой системы выполнена у всех обследованных 78 пациентов. Комплексное МР-исследование выполнялось в два этапа. На первом этапе МР-исследование проводили согласно стандартному протоколу с применением проспективной ЭКГ-синхронизации и экспираторной задержки дыхания (табл. 1).

Для укладки и позиционирования использовалась поверхностная 16-ка-

Таблица 1

Параметры магнитно-резонансной томографии для проведения кардиологического этапа сканирования

Выбор последовательности	Плоскость сканирования	TR, мс	TE, мс	Толщина среза, мм	FOV, мм	Размер матрицы
Fast imaging employing steady-state acquisition (сбалансированное градиентное эхо)	2-камерная проекция	3,6	1,6	8	36×32	200×200
Fast imaging employing steady-state acquisition (сбалансированное градиентное эхо)	4-камерная проекция	3,6	1,5	8	38×34	200×200
Fast imaging employing steady-state acquisition (сбалансированное градиентное эхо)	проекция по «короткой оси»	3,8	1,6	8	36×32	200×200

Примечание: TR — time repetition (время повторения); TE — time echo (время эхо); FOV — field of view (поле зрения).

нальная катушка с расположением верхнего края на уровне яремной вырезки грудины.

Целью выполнения первого этапа МР-исследования явился обязательный анализ анатомии и функции камер сердца для дальнейшей оценки состояния сердечно-сосудистой системы (ССС) и последующих построений анатомических проекций аорты.

Второй этап, на котором производился сбор МР-данных для оценки биоэластических свойств аорты, был проведен согласно разработанному протоколу МРТ-исследования (табл. 2) [1], который состоял в основном из последовательностей с градиентным эхо и фазово-контрастных изображений [11, 12].

Изображения аорты получены в поперечной плоскости, перпендикулярной просвету аорты на таких уровнях:

1. Уровень синотубулярных гребней.
2. Уровень восходящей и нисходящей аорты на срезе бифуркации ствола легочной артерии.
3. Уровень нисходящей аорты на уровне чревного ствола.

В плоскости изображения, построенной перпендикулярно сосуду, кодировка максимальной скорости потока (VENC) происходит в направлении сквозной плоскости и может

быть зарегистрирована при последующем измерении. Стандартное значение кодирования скорости, которое необходимо установить перед началом получения последовательности фазово-контрастного изображения, обычно составляет около 150 м/с, но при наличии препятствия току крови на уровне створок аортального клапана (стеноз) это значение может увеличиваться [6]. Значения потока крови изменяются на всех уровнях сканирования, поэтому крайне важным является отслеживание каждой последовательности для достижения высокого качества изображений при устранении появляющихся артефактов (рис. 1, б).

Количественная оценка эластических свойств аорты

Для достижения целей работы полученные данные МР-исследования обрабатывались в версии ПО (программным обеспечением) «CVI42 (Version 5.3 Ext.4, Circle Cardiovascular Imaging Inc., Canada)». Нами применяется специализированный протокол оценки параметров аорты по аксиальным изображениям аорты (рис. 2, б) с инструментами контурирования стенки аорты в фазы сердечного цик-

Таблица 2

Параметры магнитно-резонансной томографии для проведения этапа оценки биоэластических свойств аорты

Выбор последовательности	Уровень исследования	Плоскость сканирования	TR, мс	TE, мс	Толщина среза, мм	FOV, мм	VENC, см/с	Размер матрицы
PC/GRE	синотубулярные гребни	перпендикулярно оси аорты	6,4	3,8	7	36 × 36	150	192 × 160
PC/GRE	восходящая и грудная аорта	перпендикулярно оси аорты	6,2	3,7	7	36 × 36	150	192 × 160
PC/GRE	восходящая и нисходящая аорта	косая в направлении оси аорты	6,4	3,8	8	40 × 40	150	224 × 180

Примечание: VENC — velocity encoding — параметры кодирования скорости.

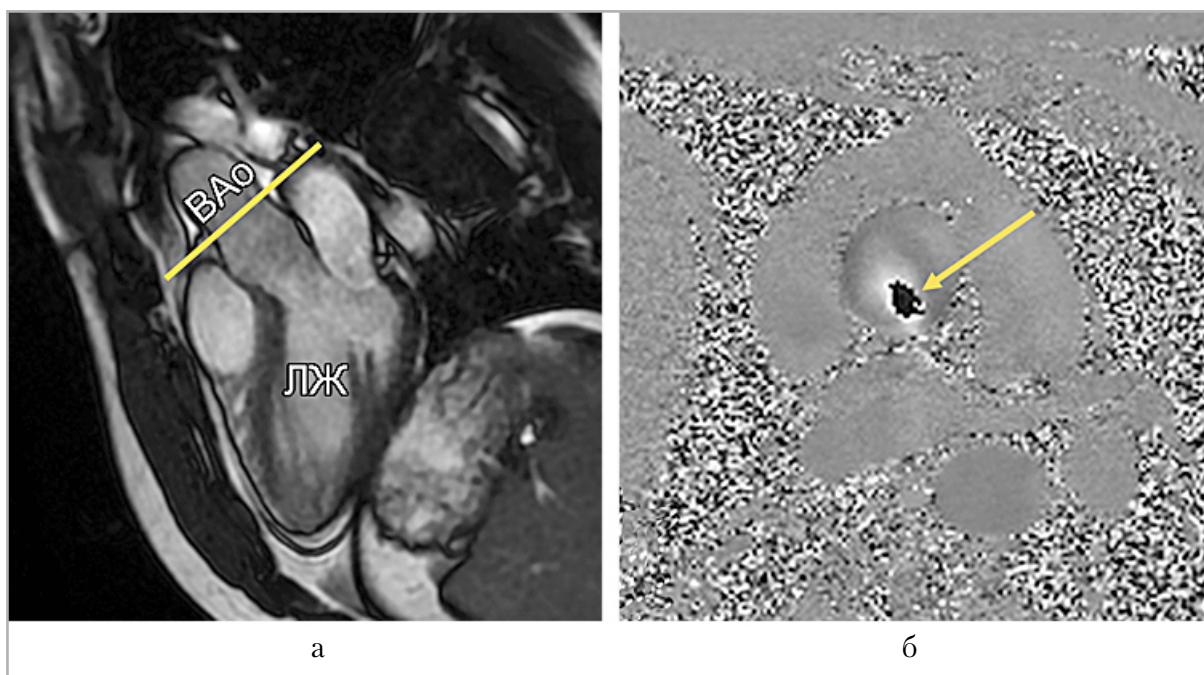


Рис. 1. Магнитно-резонансные томограммы аорты: *а* — 3-камерная проекция, желтая линия в срезе перпендикулярно оси аорты на уровне синотубулярных гребней; *б* — аксиальное изображение аорты на уровне синотубулярных гребней, стрелкой указан артефакт потока значений, превышающих установленный максимум VENC 150 м/с

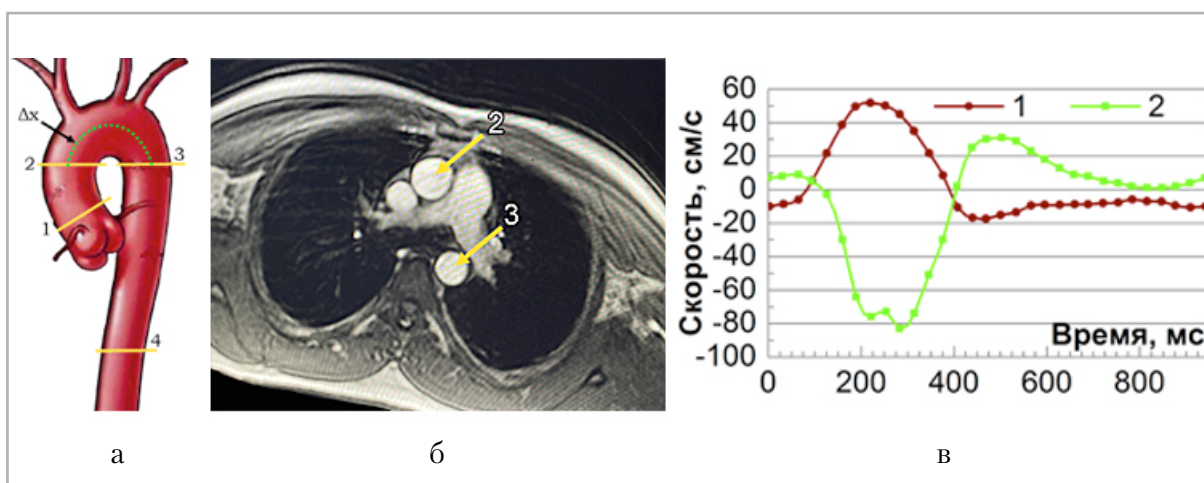


Рис. 2. Методика измерения скорости пульсовой волны с помощью магнитно-резонансной томографии. *а* — схематическое сагиттальное изображение аорты, показывающее уровни исследования: 1 — уровень синотубулярных гребней; 2 — уровень восходящей и нисходящей аорты на срезе бифуркации ствола легочной артерии; 3 — уровень нисходящей аорты на уровне чревного ствола. Стрелкой указано определение параметра Δx . *б* — аксиальное изображение восходящей и нисходящей аорты на срезе бифуркации ствола легочной артерии. *в* — график зависимости скорости от времени: восходящая аорта (красная) и нисходящая аорта (зеленая) кривые средней скорости, используемые для определения прихода переднего фронта пульсовой волны для расчета параметра Δt

ла. Определение площади и диаметра аорты входит в алгоритм действий,

а расчеты параметров проводятся по формулам.

Растяжимость стенки аорты [4]:

$$R = \left(\frac{A_{sist}^i - A_{diast}^i}{A_{diast}^i \times \Delta L_{puls}} \right) \times 100\% \left[\frac{\%}{\text{мм рт. ст.}} \right]$$

Модуль Юнга [5]:

$$E = 1,33 \times \left(\frac{(d_{diast}^i)^2 \times 0,75 \Delta L_{puls}}{2h^i \times \Delta d_{puls}^i} \right) [Па]$$

Согласно методике, в косых и сагиттальных плоскостях между контрольными точками в восходящей и нисходящей аорте определялся уровень измерения диаметра, далее проводилось определение параметров Δx

пульсовой волны (рис. 2, а) и Δt (рис. 2, в). Время прохождения волны потока (Δt) определялось как интервал времени между приходом «фронта» пульсовой волны в восходящей и нисходящей аорте [9].

$$PWS = \frac{\Delta x}{\Delta t} \left[\frac{м}{с} \right]$$

Результаты и их обсуждение

При сравнении полученных результатов в группах здоровых добровольцев в возрасте до 38 и после 38 лет были выявлены статистически значимые отличия ($p < 0,05$) растяжимости и модуля Юнга в восходящей аорте $1,17 \pm 0,57$ %/мм рт. ст. и $0,20 \pm 0,10$ МПа в возрастной группе до 38 лет против $0,80 \pm 0,27$ %/мм рт. ст. и $0,30 \pm 0,09$ %/мм рт. ст. в группе после 38 лет. При этом были различия ($p < 0,05$) максимальной площади ($635,66 \pm 102,88$ см² против $793,87 \pm 199,66$ см²) и периметра ($89,79 \pm 8,10$ мм против $100,20 \pm 11,86$ мм) восходящей аорты (табл. 3). Это подтверждает факт возрастных изменений в структуре эластического каркаса стенки аорты и наличия тенденции увеличения диаметра восходящей аорты при снижении эластических свойств магистральных артериальных сосудов.

В обследуемых группах пациентов с ишемической болезнью сердца (ИБС) и концентрической формой гипертро-

фии миокарда наблюдалась выраженная разница ($p < 0,05$) параметров глобальной систолической функции сердца: в группе с ИБС со снижением фракции выброса (ФВ) ($35,50 \pm 3,95$ %), в группе с гипертрофией миокарда — увеличением ФВ ($65,28 \pm 17,44$ %) (табл. 4). Несмотря на разную ФВ, между группами не было существенной разницы ($p > 0,05$) значений максимальной площади ($919,54 \pm 297,64$ см² против $950,34 \pm 207,69$ см²) и периметра ($105,18 \pm 16,20$ мм против $109,63 \pm 12,18$ мм) восходящей аорты. Однако наблюдались значимые различия в сравнении с группой добровольцев: максимальная площадь и периметр у лиц до 38 лет ($635,66 \pm 102,88$ см² и $89,79 \pm 8,10$ мм) и у лиц старше 38 лет ($793,87 \pm 199,66$ см² и $100,20 \pm 11,86$ мм) на восходящей аорте. Также растяжимость и показатель жесткости в виде модуля Юнга различались ($p < 0,05$) между контрольной группой до 38 лет ($1,17 \pm 0,57$ %/мм рт. ст. и $0,20 \pm 0,10$ МПа), группой после 38 лет ($0,80 \pm 0,27$ %/мм рт. ст. и $0,30 \pm 0,09$ МПа), группой с ИБС ($0,64 \pm$

0,32 %/мм рт. ст. и $0,43 \pm 0,26$ МПа) и пациентами с выявленной концентрической гипертрофией миокарда ($0,66 \pm 0,28$ %/мм рт. ст. и $0,44 \pm 0,20$ МПа). Это может говорить о возможной причине снижения эластических свойств, заключающейся в дегенерации структуры стенки аорты, что будет наиболее выражено проявляться у пациентов с аневризмой и расслоением аорты.

Статистически значимые отличия ($p < 0,05$) выявлены в значениях скорости пульсовой волны (СПВ) между группами здоровых добровольцев (до

38 лет — $4,31 \pm 1,10$ см/с против старше 38 лет — $5,50 \pm 1,37$ см/с соответственно). В то же время в группе с заболеваниями сердца более высокие значения СПВ были в группе с ишемической болезнью сердца ($6,67 \pm 2,70$ см/с) и у пациентов с концентрической гипертрофией миокарда ($7,75 \pm 2,99$ см/с) (табл. 3). Полученные данные подтверждают, что с возрастом скорость пульсовой волны увеличивается [13], полностью не исключается взаимосвязь между наличием ССЗ и повышенной жесткостью аортальной стенки.

Таблица 3

Полученные результаты в группах обследуемых пациентов

Параметры	Уровень исследования	п < 38 лет	п > 38 лет	ИБС	ГКМП	p
		среднее ± SD				
Количество пациентов в группах		22	21	14	21	
Площадь поверхности тела (м²)		1,94 ± 0,30	1,95 ± 0,23	2,11 ± 0,15	2,05 ± 0,23	p > 0,05
Максимальная площадь (см²)	Восходящая аорта	635,66 ± 102,88	793,87 ± 199,66	919,54 ± 297,64	950,34 ± 207,69	p < 0,05
Максимальный периметр (мм)		89,79 ± 8,10	100,20 ± 11,86	105,18 ± 16,20	109,63 ± 12,18	p < 0,05
Растяжимость (%/мм рт. ст.)	Синотубулярные гребни	1,17 ± 0,57	0,80 ± 0,27	0,64 ± 0,32	0,66 ± 0,28	p < 0,05
Модуль Юнга (МПа)		0,20 ± 0,10	0,30 ± 0,09	0,43 ± 0,26	0,44 ± 0,20	p < 0,05
Растяжимость (%/мм рт. ст.)	Нисходящая аорта	0,93 ± 0,40	0,55 ± 0,44	0,54 ± 0,26	0,56 ± 0,32	p < 0,05
Модуль Юнга (МПа)		0,04 ± 0,06	0,04 ± 0,07	0,04 ± 0,01	0,12 ± 0,16	p < 0,05
СПВ (см/с)	Дуга аорты	4,31 ± 1,10	5,50 ± 1,37	6,67 ± 2,70	7,75 ± 2,99	p < 0,05

Таблица 4

Полученные результаты функциональных параметров работы сердца

Параметры	n < 38 лет среднее $\pm$ SD	n > 38 лет среднее $\pm$ SD	ИБС среднее $\pm$ SD	ГКМП среднее $\pm$ SD	p
Конечно диастолический объем (EDV), мл/м ²	75,23 $\pm$ 12,33	69,97 $\pm$ 9,39	128,07 $\pm$ 9,40	80,01 $\pm$ 15,96	p < 0,05
Конечно систолический объем (ESV), мл/м ²	37,51 $\pm$ 10,33	31,88 $\pm$ 6,83	87,38 $\pm$ 10,29	28,02 $\pm$ 17,48	p < 0,05
Ударный объем (SV), мл/м ²	37,05 $\pm$ 9,63	38,07 $\pm$ 6,88	41,64 $\pm$ 2,70	51,70 $\pm$ 16,66	p < 0,05
Фракция выброса (EF), %	50,02 $\pm$ 11,83	54,43 $\pm$ 7,25	35,50 $\pm$ 3,95	65,28 $\pm$ 17,44	p < 0,05

Заключение

Создание единого протокола комплексного МР-исследования аорты и сердца позволяет расширить возможности одновременного анализа работы сердечной мышцы, эластических свойств и жесткости аорты (растяжимость, модуль Юнга, скорость пульсовой волны). С введением в методику анализа фазово-контрастной томографии появляется возможность дополнительного анализа данных скорости и направления потока в течение всей фазы сердечного цикла, причем с количественным анализом объемов потока и расчетом локального давления на стенку аорты.

Важным вопросом остается оценка состояния биоэластических свойств стенки аорты у пациентов с аневризмой и расслоением аорты. При этом важно, что до сих пор диагностика аневризм аорты проводится на основе результатов количественной оценки размеров аорты без расчета показателей механической прочности. Анализ биомеханических параметров аорты у пациентов на до- и послеоперационном этапе определит причины изменений гемодинамики, приводящих к ремоделированию сосудистой стенки.

Список литературы

1. Брилль К. Р. Магнитно-резонансная томография в оценке критериев жесткости стенки аорты // Digital Diagnostics. 2022. Т. 3. № 1S. С. 10–11.
2. Журавлева Л. В. Методика измерения каротидно-фemorальной, аортально-фemorальной скорости распространения пульсовой волны с помощью реографии // Medicine of Ukraine. 2016. №10. ISSN 1997-9894.
3. Малахова М. В. Диагностика отрыва клапаносодержащего кондуита восходящего отдела аорты и его успешное хирургическое лечение // Вестник рентгенологии и радиологии. 2021. Т. 102. № 6. С. 383–9.
4. Скрипник А. Ю. 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. Т. 24. № 12. С. 48–54.
5. Усов В. Ю. Вычислительная оценка механикоэластических 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.
6. Catapano F. 4D flow imaging of the thoracic aorta: is there an added clinical

- value? *Cardiovasc. Diagn. Ther.* 2020. V. 10. No. 4. P.1068–1089.
7. *Harloff A.* Determination of aortic stiffness using 4D flow cardiovascular magnetic resonance — a population-based study. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2018. V. 20. No. 43.
8. *Houriez-Gombaudo-Saintonge S.* Comparison of different methods for the estimation of aortic pulse wave velocity from 4D flow cardiovascular magnetic resonance. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2019. V. 21. No. 1. P. 75.
9. *Hrabak-Paar M.* 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. V. 2. No. 2. e190090.
10. *Ohyama Y.* Imaging Insights on the Aorta in Aging. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2018. V. 11. No. 4. e005617.
11. *Soulat G.* 4D Flow with MRI. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 2020. V. 22. P. 103–126.
12. *Sträter A.* 4D-Flow MRI: Technique and Applications. *Rofo.* 2018. V. 190. No. 11. P. 1025–1035.
13. *Van Hout M.* Normal and reference values for cardiovascular magnetic resonance-based pulse wave velocity in the middle-aged general population. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2021. V. 23. No. 1. P. 46.
4. *Skripnik A. Yu.* Assessment of the elastic characteristics of the wall of the ascending aorta using computed tomographic angiography in the mode of electrocardiographic synchronization with advanced postprocessor data processing. *Russian J. of Cardiology.* 2019. V. 24. No. 12. P. 48–54 (in Russian).
5. *Usov V. Yu.* Computational evaluation of mechanoelastic properties and paramagnetic contrast enhancement of the ascending aortic wall in acute infarction and non-coronary myocardial injuries, according to dynamic ECG-synchronized MR-tomography (MR-elastometry). *Translational medicine.* 2021. V. 8. No. 6. P. 43–58 (in Russian).
6. *Catapano F.* 4D flow imaging of the thoracic aorta: is there an added clinical value? *Cardiovasc. Diagn. Ther.* 2020. V. 10. No. 4. P. 1068–1089.
7. *Harloff A.* Determination of aortic stiffness using 4D flow cardiovascular magnetic resonance — a population-based study. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2018. V. 20. No. 43.
8. *Houriez-Gombaudo-Saintonge S.* Comparison of different methods for the estimation of aortic pulse wave velocity from 4D flow cardiovascular magnetic resonance. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2019. V. 21. No. 1. P. 75.
9. *Hrabak-Paar M.* 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. V. 2. No. 2. e190090.
10. *Ohyama Y.* Imaging Insights on the Aorta in Aging. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2018. V. 11. No. 4. e005617.
11. *Soulat G.* 4D Flow with MRI. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 2020. V. 22. P. 103–126.
12. *Sträter A.* 4D-Flow MRI: Technique and Applications. *Rofo.* 2018. V. 190. No. 11. P. 1025–1035.
13. *Van Hout M.* Normal and reference values for cardiovascular magnetic resonance-based pulse wave velocity in the middle-aged general population. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2021. V. 23. No. 1. P. 46.

References

1. *Bril K. R.* Magnetic resonance imaging in the evaluation of aortic wall stiffness criteria. *Digital Diagnostics.* 2022. V. 3. No. 1S. P. 10–11 (in Russian).
2. *Zhuravleva L. V.* Methodology for measuring carotid-femoral, aortic-femoral pulse wave propagation velocity using rheography. *Medicine of Ukraine.* 2016. No. 10. ISSN 1997-9894 (in Russian).
3. *Malakhova M. V.* Diagnostics of detachment of the valve-containing conduit of the ascending aorta and its successful surgical treatment. *Bulletin of radiology and radiology.* 2021. V. 102. No. 6. P. 383–9 (in Russian).
4. *Skripnik A. Yu.* Assessment of the elastic characteristics of the wall of the ascending aorta using computed tomographic angiography in the mode of electrocardiographic synchronization with advanced postprocessor data processing. *Russian J. of Cardiology.* 2019. V. 24. No. 12. P. 48–54 (in Russian).
5. *Usov V. Yu.* Computational evaluation of mechanoelastic properties and paramagnetic contrast enhancement of the ascending aortic wall in acute infarction and non-coronary myocardial injuries, according to dynamic ECG-synchronized MR-tomography (MR-elastometry). *Translational medicine.* 2021. V. 8. No. 6. P. 43–58 (in Russian).
6. *Catapano F.* 4D flow imaging of the thoracic aorta: is there an added clinical value? *Cardiovasc. Diagn. Ther.* 2020. V. 10. No. 4. P. 1068–1089.
7. *Harloff A.* Determination of aortic stiffness using 4D flow cardiovascular magnetic resonance — a population-based study. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2018. V. 20. No. 43.
8. *Houriez-Gombaudo-Saintonge S.* Comparison of different methods for the estimation of aortic pulse wave velocity from 4D flow cardiovascular magnetic resonance. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2019. V. 21. No. 1. P. 75.
9. *Hrabak-Paar M.* 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. V. 2. No. 2. e190090.
10. *Ohyama Y.* Imaging Insights on the Aorta in Aging. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2018. V. 11. No. 4. e005617.
11. *Soulat G.* 4D Flow with MRI. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 2020. V. 22. P. 103–126.
12. *Sträter A.* 4D-Flow MRI: Technique and Applications. *Rofo.* 2018. V. 190. No. 11. P. 1025–1035.
13. *Van Hout M.* Normal and reference values for cardiovascular magnetic resonance-based pulse wave velocity in the middle-aged general population. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2021. V. 23. No. 1. P. 46.

Сведения об авторах / Information about authors

Бриль Кристина Руслановна, аспирант, ФГБНУ «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского», Москва.

Адрес: 119991, Москва, Абрикосовский пер., 2.

Тел.: +7 (917) 538-28-38. Электронная почта: kr.bril@yandex.ru

ORCID.org/0000-0001-8789-0330

Вклад автора: проведение исследований, обработка данных исследований, участие в научном дизайне, написание текста статьи, создание опубликованной работы.

Kristina R. Bril', Postgraduate, Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery, Moscow.

Address: 2, Abrikosovsky per., Moscow, 119991, Russia.

Phone number: +7 (917) 538-28-38. E-mail: kr.bril@yandex.ru

ORCID.org/0000-0001-8789-0330

Author's contribution: conducting research, processing research data, participating in scientific design, writing the text of an article, creating a published work.

Пронкин Александр Артурович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук», Москва.

Адрес: 125412. г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2.

Телефон: +7 (495) 485-90-09. Электронная почта: pronkin.a.a@gmail.com

ORCID.org/0000-0001-8091-9479. Scopus author ID: 57210335627

Вклад автора: обработка данных исследований, поиск и интерпретация математических формул, используемых в исследовании, редактирование текста.

Aleksandr A. Pronkin, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Associate of the Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

Address: 13, p. 2, ul. Izhorskaya, Moscow. 125412, Russia.

Phone number: +7 (495) 485-90-09. E-mail: pronkin.a.a@gmail.com

ORCID.org/0000-0001-8091-9479. Scopus author ID: 57210335627

Author's contribution: processing of research data, search and interpretation of mathematical formulas used in research, text editing.

Галян Татьяна Николаевна, кандидат медицинских наук, заведующая отделением рентгенодиагностики и компьютерной томографии ФГБНУ «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского», Москва.

Адрес: 119991. г. Москва, Абрикосовский пер., 2.

Телефон: +7 (499) 248-15-55. Электронная почта: Galmedi05@gmail.com

ORCID.org/0000-0003-4751-5119

Вклад автора: разрешение на возможность проведения исследований, концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта публикации.

Tat'yana N. Galyan, Candidate of Medical Sciences, Head of Department of Radiology and Computed Tomography, Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery, Moscow.

Address: 2, Abrikosovsky per., Moscow, 119991, Russia.

Phone number: +7 (499) 248-15-55. E-mail: Galmedi05@gmail.com

ORCID.org/0000-0003-4751-5119

Author's contribution: permission for the possibility of conducting research, the concept and design of the study, approval of the final version of the publication.

Малахова Мария Владимировна, кандидат медицинских наук, научный сотрудник ФГБНУ «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского», Москва.

Адрес: 119991. г. Москва, Абрикосовский пер., 2.

Телефон: +7 (499) 248-15-55. Электронная почта: mmv989@yandex.ru

ORCID.org/0000-0002-9985-3753.

Вклад автора: проведение исследований, участие в научном дизайне, написание текста статьи.

Mariya V. Malakhova, Candidate of Medical Sciences, Radiologist, Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery, Moscow.

Address: 2, Abrikosovsky per., Moscow, 119991, Russia.
Phone number: +7 (499) 248-15-55. E-mail: mmv989@yandex.ru
ORCID.org/0000-0002-9985-3753.

Author's contribution: conducting research, participating in scientific design, writing the text of the article.

Усов Владимир Юрьевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделением рентгеновских и томографических методов диагностики, НИИ кардиологии Томского НИМЦ РАН.

Адрес: 634012, г. Томск, ул. Киевская, д. 111а.

Телефон: +7 (3822) 56-12-32. Электронная почта: ussov1962@yandex.ru

ORCID.org/0000-0001-7978-5514. Scopus Author ID: 56611827000

Вклад автора: концепция и дизайн исследования, создание опубликованной работы, утверждение окончательного варианта статьи.

Vladimir Y. Usov, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of X-ray and Tomographic Diagnostic Methods, Research Institute of Cardiology of Tomsk NIMC RAS.

Address: 111a, ul. Kievskaya, Tomsk, 634012, Russia.

Phone number: +7 (3822) 56-12-32. E-mail: ussov1962@yandex.ru

ORCID.org/0000-0001-7978-5514. Scopus Author ID: 56611827000

Author's contribution: the concept and design of the study, the creation of the published work, the approval of the final version of the article.

Ховрин Валерий Владиславович, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник ФГБНУ «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского», Москва.

Адрес: 119991, г. Москва, Абрикосовский пер., 2.

Телефон: +7 (499) 248-15-55. Электронная почта: valery@vkhovrin.ru

ORCID.org/0000-0002-6720-4126. Scopus Author ID: 6504830959

Вклад автора: концепция и дизайн исследования, проведение исследований, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка, создание опубликованной работы, утверждение окончательного варианта статьи.

Valeriy V. Khovrin, Doctor of Medical Sciences, Senior Researcher, Petrov-sky Russian Scientific Center of Surgery, Moscow.

Address: 2, Abrikosovsky per., Moscow, 119991, Russia.

Phone number: +7 (499) 248-15-55. E-mail: valery@vkhovrin.ru

ORCID.org/0000-0002-6720-4126. Scopus Author ID: 6504830959

Author's contribution: the concept and design of the study, research, analysis and interpretation of the data obtained, preparation, creation of the published work, approval of the final version of the article.

Дата поступления статьи в редакцию издания: 30.12.2022 г.

Дата одобрения после рецензирования: 23.01.2023 г.

Дата принятия статьи к публикации: 28.01.2023 г.