



# Магнитно-резонансная томография в диагностике нарушений эластических свойств стенки аорты и ее гемодинамики

Бриль К.Р.<sup>1</sup>, Пронкин А.А.<sup>2, 3</sup>, Галян Т.Н.<sup>1</sup>, Ховрин В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского»,  
Абрикосовский пер., 2, Москва, 119991, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБУН «Объединенный институт высоких температур» Российской академии наук,  
ул. Ижорская, 13, стр. 2, Москва, 125412, Российская Федерация

<sup>3</sup> ФГБОУ «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,  
ул. Красноказарменная, 14, стр.1, Москва, 111250, Российская Федерация

**Бриль Кристина Руслановна**, аспирант ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского»;  
<https://orcid.org/0000-0001-8789-0330>

**Пронкин Александр Артурович**, к. т. н., ст. науч. сотр. ФГБУН «Объединенный институт высоких температур» Российской академии наук, ФГБОУ «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»;  
<https://orcid.org/0000-0001-8091-9479>

**Галян Татьяна Николаевна**, к. м. н., заведующая отделением рентгенодиагностики и компьютерной томографии ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского»;  
<https://orcid.org/0000-0003-4751-5119>

**Ховрин Валерий Владиславович**, д. м. н., гл. науч. сотр. ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского»;  
<https://orcid.org/0000-0002-6720-4126>

## Резюме

**Актуальность.** Жесткость сосудистой стенки – важный предиктор сердечно-сосудистых заболеваний. Биомеханические показатели сосудистой стенки изменяются не только у пациентов с генетическими нарушениями соединительной ткани. Это значит, что, независимо от этиологии, выявление прогрессирующей потери аортальной эластичности на ранних этапах имеет большую клиническую значимость для предотвращения развития грозных осложнений. Оценка биомеханических параметров аорты с помощью магнитно-резонансной томографии (МРТ) является новым уровнем визуализации заболеваний аорты, позволяющим совершенствовать хирургическую тактику и предупреждать развитие осложнений. Ряд определяемых при МРТ аорты биомеханических и гемодинамических параметров демонстрирует процесс ремоделирования ее стенки, поэтому их анализ дает возможность разработать алгоритм ранней диагностики аневризмы и угрозы возникновения острого аортального синдрома.

**Цель:** с помощью данных МРТ аорты оценить ее биомеханические параметры и гемодинамику на до- и послеоперационном этапах и их влияние на возникновение осложнений и рецидивов в отдаленном периоде.

**Материал и методы.** В период с 2020 по 2023 гг. В РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского проспективно была выполнена МРТ аорты 107 пациентам с диагнозами «аневризма восходящей аорты» (55 человек: 48 (87%) мужчин и 7 (13%) женщин, средний возраст 79,4±14,91 года) и «расслоение аорты I и III типов по De Bakey, хроническая стадия» (52 пациента: 44 (85%) мужчины и 8 (15%) женщин, средний возраст 54,32±10,41 года). Исследование проводилось до и после операции.

**Результаты.** При количественном анализе полученных данных у обследуемых пациентов в послеоперационном периоде наблюдалось снижение эластических свойств стенки аорты в виде растяжимости (0,4 [0,34; 0,54] %/мм рт. ст. в группе с аневризмой; 0,5 [0,25; 0,55] %/мм рт. ст. в группе с расслоением) и увеличение показателя жесткости в виде модуля Юнга (0,6 [0,38; 0,68] МПа в группе с аневризмой; 0,5 [0,39; 0,83] МПа в группе с расслоением). По результатам оценки гемодинамических изменений в группе с расслоением после операции продемонстрировано значительное увеличение показателей максимальной скорости в нисходящей аорте (78,6 [66,24; 130,78] см/с) и градиента давления на уровне чревного ствола (2,1 [1,76; 6,84] мм рт. ст.). При оценке параметра скорости пульсовой волны в обеих группах отмечены высокие значения с тенденцией к увеличению после выполнения хирургического лечения (в группе аневризмы 7,7 [5,7; 20,3] см/с до операции против 8,7 [6,5; 10,65] см/с после операции; в группе расслоения 9,7 [6,8; 12,9] против 12,7 [7,7; 15,7] см/с соответственно).

**Заключение.** Мониторинг общей гемодинамики и паттернов кровотока совместно с оценкой эластичности стенки аорты позволит выявлять пациентов с пограничной дилатацией аорты. При этом особый интерес вызывают исследования протезированного сегмента аорты. Полученные данные гемодинамических изменений, возникающих на границе протезированного и нативного сегментов оперированной аорты, могут подтвердить и обосновать развитие осложнения в виде надрыва интимы по дистальному краю стента-графта (distal stent graft-induced new entry, dSINE).

**Ключевые слова:** магнитно-резонансная томография аорты; аневризма аорты; расслоение аорты; жесткость стенки аорты; эластичность аорты; модуль Юнга; скорость пульсовой волны.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Бриль К.Р., Пронкин А.А., Галян Т.Н., Ховрин В.В. Магнитно-резонансная томография в диагностике нарушений эластических свойств стенки аорты и ее гемодинамики. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2023; 104(2): 115–23. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-2-115-123>

**Для корреспонденции:** Бриль Кристина Руслановна, E-mail: kr.bril@yandex.ru

Статья поступила 05.04.2023

После доработки 12.07.2023

Принята к печати 13.07.2023

# Magnetic Resonance Imaging in the Diagnosis of Aortic Wall Elastic Properties Disorders and Its Hemodynamics

Kristina R. Bril<sup>1</sup>, Alexander A. Pronkin<sup>2, 3</sup>, Tatiana N. Galyan<sup>1</sup>, Valeriy V. Khovrin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery, Abrikosovskiy per., 2, Moscow, 119991, Russian Federation

<sup>2</sup> Joint Institute of High Temperatures, Russian Academy of Sciences, ul. Izhorskaya, 13, str. 2, Moscow, 125412, Russian Federation

<sup>3</sup> National Research University "Moscow Power Engineering Institute", ul. Krasnokazarmennaya, 14, str. 1, Moscow, 111250, Russian Federation

Kristina R. Bril, Postgraduate, Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery; <https://orcid.org/0000-0001-8789-0330>

Alexander A. Pronkin, Cand. Tech. Sc., Senior Researcher, Joint Institute of High Temperatures, Russian Academy of Sciences; National Research University "Moscow Power Engineering Institute"; <https://orcid.org/0000-0001-8091-9479>

Tatiana N. Galyan, Cand. Med. Sc., Head of Department of Radiology and Computed Tomography, Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery; <https://orcid.org/0000-0003-4751-5119>

Valeriy V. Khovrin, Dr. Med. Sc., Chief Researcher, Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery; <https://orcid.org/0000-0002-6720-4126>

## Abstract

**Background.** Vascular stiffness is an important predictor of cardiovascular disease. The vascular wall biomechanical parameters change not only in patients with genetic disorders of the connective tissue. This means that, regardless of etiology, the early detection of a progressive loss of aortic elasticity is of great clinical importance in preventing the development of severe complications. Assessment of aortic biomechanical parameters using magnetic resonance imaging (MRI) is a new level of visualization for aortic diseases allowing to improve surgical tactics and prevent complications. A number of biomechanical parameters determined by aortic MRI demonstrates the process of its wall remodeling, so their analysis will allow to develop an algorithm for the early diagnosis of aneurysms and the threat of acute aortic syndrome.

**Objective:** using aortic MRI data, to evaluate the aortic biomechanical parameters and hemodynamics at pre- and postoperative stages and their impact on the occurrence of complications and relapses in the long-term period.

**Material and methods.** Between 2020 and 2023, in Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery, aortic MRI was performed prospectively before and after surgery in 107 patients with diagnoses of ascending aortic aneurysm (55 patients: 48 (87%) males and 7 (13%) females, mean age 79.4±14.91 years) and DeBakey type I and III aortic dissection, chronic stage (52 patients: 44 (85%) males and 8 (15%) females, mean age 54.32±10.41 years).

**Results.** The quantitative data analysis in the postoperative period showed a decrease in the aortic wall elastic properties in the form of extensibility (0.4 [0.34; 0.54] %/mm Hg in the aneurysm group; 0.5 [0.25; 0.55] %/mmHg in the dissection group) and an increase in stiffness in the form of Young's modulus (0.6 [0.38; 0.68] MPa in the aneurysm group; 0.5 [0.39; 0.83] MPa in the dissection group). Hemodynamic changes in the dissection group after surgery demonstrated a significant increase in values of maximum velocity in the descending aorta (78.6 [66.24; 130.78] cm/sec) and pressure gradient at the celiac trunk level (2.10 [1.76; 6.84] mm Hg). When assessing the pulse wave velocity parameter in both groups, high values were noted with a tendency to increase after surgery (in the aneurysm group, 7.7 [5.7; 20.3] cm/s before surgery versus 8.7 [6.5; 10.65] cm/s after surgery; in the dissection group, 9.7 [6.8; 12.9] versus 12.7 [7.7; 15.7] cm/s, respectively).

**Conclusion.** Monitoring general hemodynamics and blood flow patterns together with an assessment of the aortic wall elasticity will make it possible to identify patients with borderline aortic dilatation. At the same time, studies of the aortic prosthetic segment are of particular interest. The obtained data on hemodynamic changes occurring at the border of the prosthetic and native segments of the operated aorta can confirm and justify the development of a complication in the form of distal stent graft-induced new entry (dSINE).

**Keywords:** aortic magnetic resonance imaging; aortic aneurysm; aortic dissection; aortic wall stiffness; aortic elasticity; Young's modulus; pulse wave velocity.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Bril KR, Pronkin AA, Galyan TN, Khovrin VV. Magnetic resonance imaging in the diagnosis of aortic wall elastic properties disorders and its hemodynamics. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2023; 104(2): 115–23 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-2-115-123>

**For corresponding:** Kristina R. Bril, E-mail: kr.bril@yandex.ru

Received April 5, 2023

Revised July 12, 2023

Accepted July 13, 2023

## Введение

Своевременная оценка биомеханической функции стенки аорты имеет большую клиническую значимость в ранней диагностике аневризмы и расслоения аорты, а изучение критериев артериальной жесткости является прямым определением независимых предикторов сердечно-сосудистых заболеваний [1]. Развитие аневризмы может быть связано с множеством как приобретенных, так и врожденных факторов [2, 3], поэтому патофизиологическая перестройка сосудистой стенки при аневризме аорты происходит в результате сложного взаимодействия между устойчивыми и динамическими изменениями структурных и клеточных элементов. По данным R. McClure et al. (2018 г.), частота случайно выявленных дилатаций восходящей аорты составляет 7,6 случая на 100 тыс. населения [4].

На сегодняшний день максимальный диаметр аорты используется как единственный показатель для планового хирургического лечения, однако, как показывает практика, развитие осложнений в виде расслоения более чем в 80% случаев происходит при размере ниже рекомендуемого порога [5]. В соответствии с рекомендациями по лечению заболеваний грудной аорты [6, 7] оперативное вмешательство показано при диаметре более 55 мм при негенетическом варианте [8] и более 50 мм у пациентов с синдромом Марфана. При анализе международного реестра острых расслоений аорты у 60% больных с расслоением аорты типа А диаметр не превышал 55 мм [9]. Исследование B. Ziganshin et al. (2019 г.) также демонстрирует

оправданное хирургическое лечение аневризмы при меньших размерах – до 50 мм [10].

Методы вычислительной гемодинамики, такие как фазово-контрастная магнитно-резонансная томография (2D MPT), помимо размеров позволяет выявить биомеханические критерии, отражающие ремоделирование сосудистой стенки на ранних этапах, с возможностью динамического контроля гемодинамических изменений [11–13]. Таким образом, внедрение персонализированного превентивного подхода в клиническую практику позволит выйти на новый уровень диагностики и хирургического лечения заболеваний аорты [14–16].

**Цель** – с помощью данных МРТ аорты оценить ее биомеханические параметры и гемодинамику на до- и послеоперационном этапах и их влияние на возникновение осложнений и рецидивов в отдаленном периоде.

## Материал и методы

В проспективном исследовании проанализированы данные 107 пациентов (92 (86%) мужчин и 15 (14%) женщин, средний возраст  $52,37 \pm 13,00$  года) с заболеваниями аорты до и после операции. В исследование были включены:

- физикальные параметры (рост, масса тела, артериальное давление и частота сердечных сокращений при каждом МРТ-исследовании);

- результаты этапного МРТ-исследования сердечно-сосудистой системы.

Пациенты были распределены в две группы:

– 1-я группа – больные с аневризмой корня и/или восходящего отдела аорты (n=55, 48 (87%) мужчин и 7 (13%) женщин, средний возраст 54,78±13,91 года);

– 2-я группа – пациенты с расслоением аорты I и III типов по De Bakey (n=52, 44 (85%) мужчины и 8 (15%) женщин, средний возраст 79,4±14,91 года).

Во 2-й группе было 29 больных с I типом расслоения (23 (79%) мужчины и 6 (21%) женщины) и 23 пациента с III типом расслоения (20 (87%) мужчин и 3 (13%) женщины). После гибридной операции по методике frozen elephant trunk рассмотрены результаты у 38 (73%) больных.

МРТ сердечно-сосудистой системы выполнена у всех обследованных (n=107). Комплексное исследование проходило в два этапа. Первый этап выполняли по стандартному кардиологическому протоколу с применением проспективной электрокардиографической синхронизации и экспираторной задержки дыхания. Его целью являлся анализ функции камер сердца с возможностью дальнейших построений анатомических проекций аорты. Второй этап со сбором данных для оценки биоэластических свойств аорты проводили согласно разработанному и запатентованному протоколу МРТ-исследования [17, 18]. Изображения аорты получены в последовательностях градиентного эхо (gradient echo) и фазово-контрастных изображений (phase contrast magnetic resonance imaging) в поперечной плоскости, перпендикулярной осевому сечению аорты на следующих уровнях:

– синотубулярные гребни;

– восходящая и нисходящая аорта на уровне бифуркации ствола легочной артерии;

– нисходящая аорта на уровне чревного ствола.

Для количественной оценки эластических свойств аорты использовали аксиальные изображения, которые обрабатывали с помощью программного обеспечения CVI42 Version 5.3 Ext.4 (Circle Cardiovascular Imaging Inc., Канада) с инструментами контурирования стенки аорты в фазы сердечного цикла. Более подробно ознакомиться с методикой выполнения МРТ аорты можно в нашей предыдущей работе [19].

Комбинированный протокол включал как расчетные, так и цифровые данные. Расчеты параметров проводились по следующим формулам:

– растяжимость стенки аорты [20]:

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

– модуль Юнга [21]:

$$E = \frac{(d_{\text{diast}}^2 \times \pi \times \Delta L_{\text{puls}}) \times 133,3}{h \times \Delta d_{\text{puls}}} \quad [\text{Па}].$$

В косых и сагиттальных плоскостях между контрольными точками в восходящей и нисходящей аорте определяли уровень измерения диаметра, далее находили параметры пульсовой волны  $\Delta x$  и  $\Delta t$ . Время прохождения волны потока ( $\Delta t$ ) рассчитывали как интервал между приходом «фронта» пульсовой волны в восходящей и нисходящей аорте [22]. Формула для расчета скорости пульсовой волны (СПВ):

$$\text{СПВ} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right].$$

К цифровым параметрам, рассчитанным автоматически с помощью программного обеспечения, были отнесены: максимальная скорость, градиент давления и объемы потока крови. Общая продолжительность МРТ-исследования аорты составила 20–25 мин.

Статистическая обработка результатов выполнена в программе Statistica 13.0 (Tibco Inc., США). Описательная статистика представлена как среднее (M) ± стандартное отклонение (SD) или медиана (Me [25% и 75% процентиля]). Для исследуемых групп изученные параметры были распределены по критерию Лилефорса. Сравнение средних значений проводили с помощью параметрического критерия Краскела–Уоллиса в связи с тем, что большинство параметров имеет распределение, отличающееся от нормального. Различия для показателей считали статистически значимыми при значении коэффициента достоверности  $p < 0,05$ .

## Результаты

В результате этапного МРТ-исследования сердечно-сосудистой системы у обследуемых пациентов с аневризмой и расслоением аорты были проанализированы не только биомеханические и гемодинамические параметры аорты. После лечения отмечена компенсация параметров глобальной насосной функции левого желудочка (ударного объема (УО) и конечного диастолического объема (КДО)) без снижения расчетной фракции изгнания (см. табл.).

Снижение индекса УО левого желудочка: в группе аневризмы 44,2 [36,4; 62,3] мл/м<sup>2</sup> до операции против 37,1 [32,7; 46,6] мл/м<sup>2</sup> после операции, в группе расслоения 49,3 [39,1; 57,8] против 39,5 [33,4; 44,6] мл/м<sup>2</sup> соответственно. Снижение индекса КДО: в группе аневризмы 72,9 [59,8; 112,3] против 72,3 [65,0; 88,5] мл/м<sup>2</sup>, в группе расслоения 79,4 [72,6; 91,6] против 63,6 [59,1; 81,4] мл/м<sup>2</sup> соответственно.

О влиянии на работу левого желудочка и нормализации векторов направленности кровотока в оперированной аорте говорят цифры «положительного» и «отрицательного» объемов крови, определяемые методом МРТ в восходящей аорте.

## Средние значения параметров в исследуемых группах пациентов с заболеваниями аорты до и после операции

Table

## Mean values of parameters in the studied groups of patients with aortic diseases before and after surgery

Параметр / Parameter	Уровень исследования / Study level	Аневризма / Aneurysm		Расслоение / Dissection		
		До / Before	После / After	До / Before	После / After	p*
Число наблюдений, n / Number of patients, n	–	24	31	14	38	
Площадь поверхности тела, м <sup>2</sup> / Body surface area, m <sup>2</sup>	–	2,0	2,1	2,1	2,1	≥0,05
Индекс КДО, мл/м <sup>2</sup> // DV index, ml/m <sup>2</sup>	–	72,9 [59,8; 112,3]	72,3 [65,0; 88,5]	79,4 [72,6; 91,6]	63,6 [59,1; 81,4]	<0,05
Индекс УО, мл/м <sup>2</sup> // SV index, ml/m <sup>2</sup>	–	44,2 [36,4; 62,3]	37,1 [32,7; 46,6]	49,3 [39,1; 57,8]	39,5 [33,4; 44,6]	<0,05
СПВ, см/с // PWV, cm/s	Дуга / Arch	7,7 [5,7; 20,3]	8,7 [6,5; 10,7]	9,7 [6,8; 12,9]	12,7 [7,7; 15,7]	<0,05
Максимальная площадь, см <sup>2</sup> / Maximum area, cm <sup>2</sup>	BAo / AAo	1713,9 [1299,5; 2020,5]	805,3 [746,0; 954,6]	1059,7 [757,2; 1361,1]	747,7 [668,1; 869,0]	<0,05
Максимальный периметр, мм / Maximum perimeter, mm		142,7 [126,8; 161,5]	102,7 [97,3; 107,4]	121,9 [99,9; 133,1]	96,7 [92,5; 104,4]	<0,05
Растяжимость, %/мм рт. ст. // Extensibility, %/mm Hg		0,2 [0,2; 0,5]	0,3 [0,2; 0,6]	0,5 [0,4; 1,02]	0,4 [0,2; 0,5]	<0,05
Положительный объем, мл / Positive volume, ml	СТГ / STJ	144,1 [98,4; 172,8]	85,6 [74,7; 96,9]	113,0 [101,4; 144,2]	80,0 [62,5; 101,8]	<0,05
Отрицательный объем, мл / Negative volume, ml		25,9 [12,7; 76,5]	12,7 [8,7; 14,4]	16,7 [11,7; 37,5]	6,8 [6,2; 14,1]	<0,05
Растяжимость, %/мм рт. ст. // Extensibility, %/mm Hg		0,6 [0,3; 0,8]	0,4 [0,3; 0,5]	0,8 [0,4; 1,2]	0,5 [0,3; 0,6]	<0,05
Модуль Юнга, МПа / Young's modulus, MPa		0,7 [0,4; 1,3]	0,6 [0,4; 0,7]	0,2 [0,2; 0,6]	0,5 [0,4; 0,8]	<0,05
Растяжимость, %/мм рт. ст. // Extensibility, %/mm Hg	HAo / DAo	0,5 [0,4; 0,7]	0,6 [0,3; 0,9]	1,3 [0,8; 2,3]	0,7 [0,4; 0,9]	<0,05
Градиент давления / Pressure gradient		0,4 [0,2; 0,9]	0,5 [0,3; 0,8]	0,6 [0,4; 0,8]	0,8 [0,5; 1,2]	<0,05
Градиент давления / Pressure gradient	HAo-ЧС / DAo-СТ	1,2 [0,7; 3,0]	1,3 [1,1; 2,5]	1,6 [1,2; 2,0]	2,1 [1,8; 6,8]	<0,05
Максимальная скорость, см/с // Maximum velocity, cm/s		61,3 [41,9; 86,3]	57,1 [51,9; 79,1]	63,0 [54,9; 69,8]	78,6 [66,2; 130,8]	<0,05

**Примечание.** КДО – конечный диастолический объем; УО – ударный объем; СПВ – скорость пульсовой волны; BAo – восходящий отдел аорты; СТГ – синотубулярный гребень; HAo – нисходящий отдел аорты; ЧС – чревный ствол. \* Межгрупповое значение.

**Note.** EDV – end-diastolic volume; SV – stroke volume; PWV – pulse wave velocity; AAo – ascending aorta; STJ – sinotubular junction; DAo – descending aorta; CT – celiac trunk. \* Intergroup value.



Согласно полученным данным в обеих группах наблюдалась тенденция к стабилизации кровотока, его равномерности и снижению турбулентности. Положительный объем потока в группе аневризмы снижался с 144,1 [98,4; 172,8] мл до операции до 85,6 [74,7; 96,9] мл после операции, а в группе расслоения – с 113,0 [101,4; 144,2] до 80,0 [62,5; 101,8] мл соответственно. Отмечены значимые изменения отрицательного потока объема крови (реургитации): в группе аневризмы 25,9 [12,7; 76,5] мл до операции против 12,7 [8,7; 14,4] мл после операции, в группе расслоения 16,7 [11,7; 37,5] против 6,8 [6,2; 14,1] мл соответственно.

При сравнении результатов хирургического лечения в группах пациентов с аневризмой восходящей аорты и расслоением аорты I и III типов выявлены статистически значимые отличия ( $p < 0,05$ ) в значениях максимальной площади: в группе аневризмы 1713,9 [1299,5; 2020,5]  $\text{см}^2$  до операции против 805,3 [746,0; 954,6]  $\text{см}^2$  после операции (рис. 1), в группе расслоения 1059,7 [757,2; 1361,1] против 747,7 [668,1; 869,0]  $\text{см}^2$  соответственно. Однако при этом анализ данных МРТ показал, что растяжимость стенки восходящей аорты у пациентов до операции была выше, чем у оперированных больных: 0,6 [0,3; 0,8] против 0,4 [0,3; 0,5] %/мм рт. ст. в группе аневризмы и 0,8 [0,4; 1,2] против 0,5 [0,3; 0,6] %/мм рт. ст. в группе расслоения. Выявленные различия показывают, что после

протезирования оценивается просвет установленного протеза, который не обладает такими же эластическими свойствами, как нативная стенка аорты (рис. 2).

Расчеты давления на стенку аорты в установленном по результатам МРТ сегменте позволили получить данные о значительном увеличении градиента давления в группе расслоения (в нисходящей аорте 0,6 [0,4; 0,8] мм рт. ст. до операции против 0,8 [0,5; 1,2] мм рт.ст. после операции, на уровне чревного ствола 1,6 [1,2; 2,0] против 2,1 [1,8; 6,8] мм рт. ст. соответственно). В то же время в группе аневризмы показатели градиента давления на уровне чревного ствола снизились с 1,2 [0,7; 3,0] до 1,3 [1,1; 2,5] мм рт. ст.

Совместно с показателями градиента давления были получены статистически значимые ( $p < 0,05$ ) отличия в значениях скорости потока. Максимальная скорость в нисходящей аорте в группе аневризмы была выше до операции (61,3 [41,9; 86,3] против 57,1 [51,9; 79,1] см/с), а в группе расслоения отмечено значительное увеличение данного показателя после операции (63,0 [54,9; 69,8] против 78,6 [66,2; 130,8] см/с). Выявленное резкое повышение максимальной скорости и градиента давления у пациентов с расслоением аорты после операции в дальнейшем требует внимания для предотвращения рецидивов и реопераций ниже дистального края стента (рис. 3).

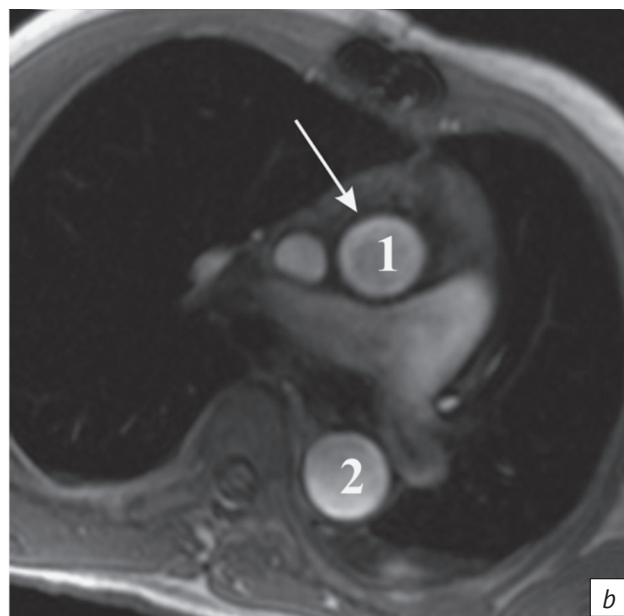
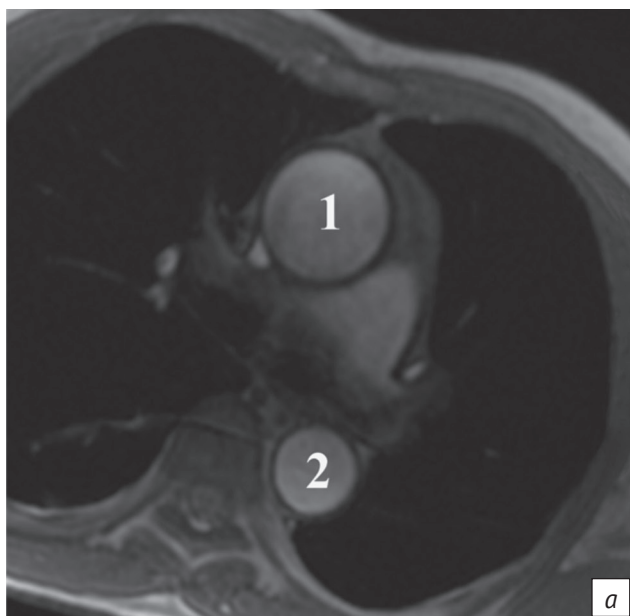


Рис. 1. Магнитно-резонансные томограммы аорты, градиентное эхо. Аксиальные изображения восходящей (1) и нисходящей (2) аорты на уровне бифуркации легочного ствола. Аневризма корня и восходящего отдела аорты: а – до операции; б – после протезирования (стрелкой указано уменьшение просвета восходящей аорты)

Fig. 1. Aortic magnetic resonance images, gradient echo. Axial images of ascending (1) and descending (2) aorta at the level of pulmonary trunk bifurcation. Root and ascending aorta aneurysm: а – before surgery; б – after prosthetics (the arrow indicates a decrease in the lumen of the ascending aorta)

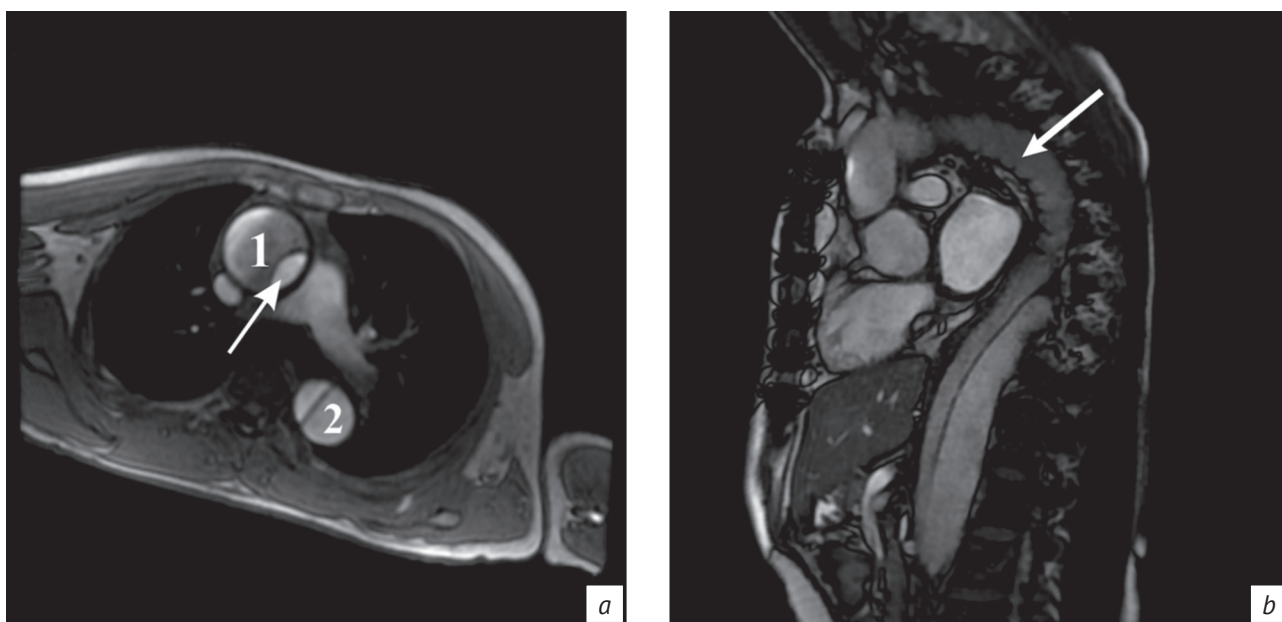


Рис. 2. Магнитно-резонансные томограммы аорты, градиентное эхо. Пациент 54 лет с подострым расслоением аорты I типа по DeBakey, аневризмой восходящего отдела аорты:

*a* – аксиальное изображение восходящей (1) и нисходящей (2) аорты на уровне бифуркации легочного ствола до операции (стрелкой указан истинный просвет аорты); *b* – сагиттальное изображение аорты после гибридной операции по методике frozen elephant trunk (стрелкой указан гибридный протез в истинном канале), определяется положительное ремоделирование аорты до уровня левого предсердия

Fig. 2. Aortic magnetic resonance images, gradient echo. A 54-year-old patient with DeBakey type I subacute aortic dissection, ascending aortic aneurysm:

*a* – axial image of the ascending (1) and descending (2) aorta at the level of pulmonary trunk bifurcation before surgery (the arrow indicates the true aortic lumen); *b* – sagittal image of the aorta after hybrid surgery using the frozen elephant trunk technique (the arrow indicates a hybrid prosthesis in the true channel), positive remodeling of the aorta to the left atrium level is determined

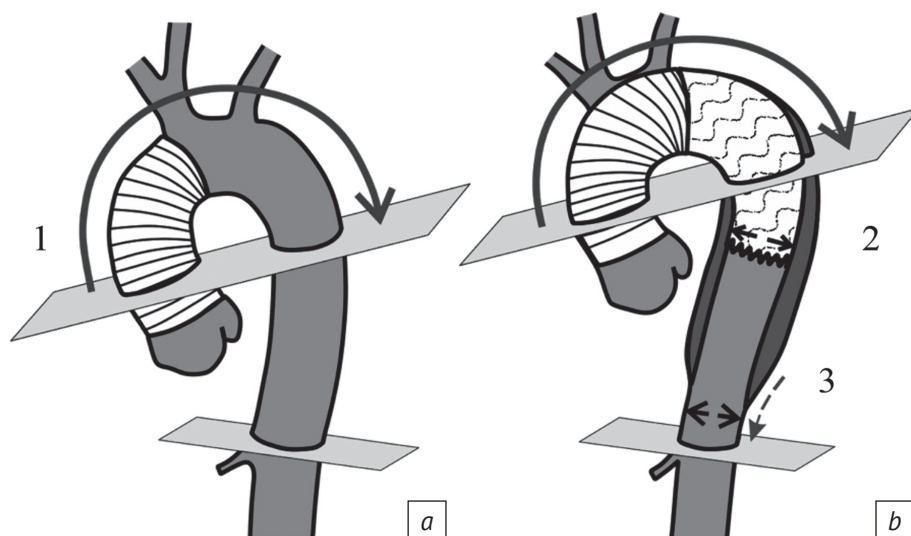


Рис. 3. Схематическое изображение аорты после протезирования восходящего отдела (*a*) и гибридной операции (*b*) с изменяющимися параметрами.

1 – распространение скорости пульсовой волны; 2 – изменение градиента давления на уровне дистального края стента; 3 – максимальная скорость кровотока

Fig. 3. Schematic representation of the aorta after ascending section prosthetics (*a*) and hybrid surgery (*b*) with changing parameters.

1 – propagation of the pulse wave velocity; 2 – change in the pressure gradient at the level of distal stent graft; 3 – maximum blood flow velocity

При оценке СПВ в дуге аорты отмечены высокие показатели в обеих группах до операции и тенденция к их увеличению после оперативного лечения: в группе аневризмы 7,7 [5,7; 20,3] против 8,7 [6,5; 10,7] см/с, в группе расслоения 9,7 [6,8; 12,9] против 12,7 [7,7; 15,7] см/с. Данные МРТ подтверждают гипотезу об увеличении жесткости стенки аорты в результате ее протезирования.

### Обсуждение

Изменение жесткости в первую очередь затрагивает восходящий отдел аорты, который подвержен максимальным гемодинамическим перепадам и вносит наибольший вклад в буферизацию кровотока. Процесс преобразования пульсирующего кровотока, выбрасываемого левым желудочком, в более равномерный называется эффектом Виндкесселя [23, 24]. У пациентов с заболеваниями аорты определяется снижение эластичности стенки с увеличением ее жесткости, в связи с чем происходит снижение виндкессельной функции. Растяжимость зависит от способности аорты реагировать на изменение внутрисосудистого давления. Жесткость является величиной, обратной растяжимости, а ее показатель – интегральный и многофакторный процесс. В результате протезирования жесткость аортальной стенки повышается.

Положительным моментом хирургического лечения является компенсация параметров глобальной насосной функции левого желудочка (УО и КДО) без снижения расчетной фракции изгнания. Однако в послеоперационном периоде отмечено повышение показателя СПВ, и без того увеличенного до операции.

Необходимо отметить важность проведения МРТ аорты у пациентов с расслоением аорты после

выполнения гибридной операции, когда протезированию подвергается почти вся аорта. Измерение биомеханических и гемодинамических параметров дистальнее установленного стента-графта оправдано градиентом давления, возникающего при переходе потока крови из стентированного участка аорты в нативный, что выражено и в увеличении показателей максимальной скорости и может приводить к осложнению в виде надрыва интимы по дистальному краю стента-графта (distal stent graft-induced new entry, dSINE).

Таким образом, проведение динамической МРТ аорты с оценкой функциональных параметров сердца на всех этапах лечения имеет важное значение, так как выбор тактики, метода и объема хирургического вмешательства осуществляется исходя из полученных диагностических данных и клинического состояния пациента.

### Заключение

МРТ аорты является мощным неинвазивным инструментом визуализации. Она позволяет без применения методик с лучевой нагрузкой и дополнительного контрастирования детально изучить физиологию кровообращения и оценить биомеханические свойства стенки аорты для индивидуального диагностического и хирургического подхода. Новые технологические достижения в визуализации *in vivo* будут полезны в диагностике рецидива аневризмы и/или расслоения с выявлением локальных зон риска дистальнее оперированного участка.

В перспективе методика оценки биомеханических свойств аорты может иметь большое клиническое значение в разработке высокотехнологичного поколения протезов аорты, обладающих сопоставимыми биомеханическими параметрами.

### Литература [References]

1. Jannasz I, Sondej T, Targowski T, et al. Pulse wave velocity – a useful tool in assessing the stiffness of the arteries. *Pol Merkur Lekarski*. 2019; 46(276): 257–62 (in Polish).
2. Mani P, Reyaldene R, Xu B. Multimodality imaging assessment of bicuspid aortic valve disease, thoracic aortic ectasia, and thoracic aortic aneurysmal disease. *Cardiovasc Diagn Ther*. 2021; 11(3): 896–910. <https://doi.org/10.21037/cdt-20-279>.
3. Rodríguez-Palomares JF, Dux-Santoy L, Guala A, et al. Aortic flow patterns and wall shear stress maps by 4D-flow cardiovascular magnetic resonance in the assessment of aortic dilatation in bicuspid aortic valve disease. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2018; 20(1): 28. <https://doi.org/10.1186/s12968-018-0451-1>.
4. McClure R, Brogly SB, Lajkosz K, et al. Epidemiology and management of thoracic aortic dissections and thoracic aortic aneurysms in Ontario, Canada: a population-based study. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2018; 155(6): 2254–64.e4. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2017.11.105>.
5. Anfinogenova ND, Sinitsyn VE, Kozlov BN, et al. Existing and emerging approaches to risk assessment in patients with ascending thoracic aortic dilatation. *J Imaging*. 2022; 8(10): 280. <https://doi.org/10.3390/jimaging8100280>.
6. Hiratzka LF, Bakris GL, Beckman JA. 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 for Thoracic Surgery, American College 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*. 2010; 121(13): e266–369. <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d4739e>.
7. Erbel R, Aboyans V, Boileau C, et al. 2014 ESC guidelines on the diagnosis and treatment of aortic diseases: document



- covering acute and chronic aortic diseases of the thoracic and abdominal aorta of the adult. The Task Force for the Diagnosis and Treatment of Aortic Diseases of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur Heart J*. 2014; 35(41): 2873–926. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehu281>.
8. Borger MA, Fedak PWM, Stephens EH, et al. The American Association for Thoracic Surgery consensus guidelines on bicuspid aortic valve-related aortopathy: full online-only version. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2018; 156(2): e41–74. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2018.02.115>.
  9. Kim JB, Spotnitz M, Lindsay ME, et al. Risk of aortic dissection in the moderately dilated ascending aorta. *J Am Coll Cardiol*. 2016; 11(68): 1209–19. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2016.06.025>.
  10. Ziganshin BA, Zafar MA, Elefteriades JA. Descending threshold for ascending aortic aneurysmectomy: is it time for a "left-shift" in guidelines? *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2018; 157(1): 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2018.07.114>.
  11. Catapano F, Pambianchi G, Cundari G, et al. 4D flow imaging of the thoracic aorta: is there an added clinical value? *Cardiovasc Diagn Ther*. 2020; 10(4): 1068–89. <https://doi.org/10.21037/cdt-20-452>.
  12. Malta D, Petersen KS, Johnson C, et al. High sodium intake increases blood pressure and risk of kidney disease. From the Science of Salt: a regularly updated systematic review of salt and health outcomes (August 2016 to March 2017). *J Clin Hypertens (Greenwich)*. 2018; 20(12): 1654–65. <https://doi.org/10.1111/jch.13408>.
  13. Harloff A, Mirzaee H, Lodemann T, et al. Determination of aortic stiffness using 4D flow cardiovascular magnetic resonance – a population-based study. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2018; 20(1): 43. <https://doi.org/10.1186/s12968-018-0461-z>.
  14. Ebel S, Dufke J, Köhler B, et al. Comparison of two accelerated 4D-flow sequences for aortic flow quantification. *Sci Rep*. 2019; 9: 8643. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45196-x>.
  15. Condemi F, Campisi S, Viallon M, et al. Relationship between ascending thoracic aortic aneurysms hemodynamics and biomechanical properties. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2020; 67(4): 949–56. <https://doi.org/10.1109/TBME.2019.2924955>.
  16. Kawel-Boehm N, Hetzel SJ, Ambale-Venkatesh B, et al. Reference ranges ("normal values") for cardiovascular magnetic resonance (CMR) in adults and children: 2020 update. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2020; 22(1): 8. <https://doi.org/10.1186/s12968-020-00683-3>.
  17. Бриль К.Р., Ховрин В.В. Магнитно-резонансная томография в оценке критериев жесткости стенки аорты. *Digital Diagnostics*. 2022; 3(S1): 10–11. <https://doi.org/10.17816/DD105655>. [Bril KR, Khovrin VV. Magnetic resonance imaging for aortic wall stiffness. *Digital Diagnostics*. 2022; 3(S1): 10–11 (in Russ.). <https://doi.org/10.17816/DD105655>.]
  18. Soulat G, McCarthy P, Markl M. 4D flow with MRI. *Annu Rev Biomed Eng*. 2020; 22: 103–26. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-100219-110055>.
  19. Бриль К.Р., Пронкин А.А., Галян Т.Н. и др. Перспективы метода магнитно-резонансной томографии для оценки биоэластической функции стенки аорты. *Радиология – практика*. 2023; 1: 40–51. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2023-1-40-51>. [Bril' KR, Pronkin AA, Galyan TN, et al. Prospects of the magnetic resonance imaging method for assessing the bioelastic function of the aortic wall. *Radiology – Practice*. 2023; 1: 40–51 (in Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2023-1-40-51>.]
  20. 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; 12: 48–54. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2019-12-48-54>. [Skrupnik 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; 12: 48–54 (in Russ.). <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2019-12-48-54>.]
  21. 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; 8(6): 43–58. <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2021-6-43-58>. [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-coronarygenic myocardial damage, from the data of dynamic ECG-gated MRI (MR-elastometry). *Translational Medicine*. 2021; 8(6): 43–58 (in Russ.). <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2021-6-43-58>.]
  22. 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. <https://doi.org/10.1148/ryct.2020190090>.
  23. Westerhof N, Lankhaar JW, Westerhof BE. The arterial Windkessel. *Med Biol Eng Comput*. 2009; 47(2): 131–41. <https://doi.org/10.1007/s11517-008-0359-2>.
  24. Singh C, Wang X, Morsi Y, Wong CS. Importance of stent-graft design for aortic arch aneurysm repair. *AIMS Bioengineering*. 2017; 14(1): 133–50. <https://doi.org/10.3934/bioeng.2017.1.133>.