

# Оценка методом магнитно-резонансной томографии биомеханики левого желудочка и эластических свойств восходящей аорты у пациентов с обширной постинфарктной аневризмой, оперированных по методу Дора: ретроспективный анализ

**Для корреспонденции:** Владимир Юрьевич Усов, [ussov1962@yandex.ru](mailto:ussov1962@yandex.ru)

Поступила в редакцию 29 ноября 2024 г. Исправлена 21 февраля 2025 г. Принята к печати 5 марта 2025 г.

**Цитировать:** Протопопов А.В., Фридман А.В., Богачев-Прокофьев А.В., Сирота Д.А., Афанасьев А.В., Таркова А.Р., Жульков М.О., Лишманов Ю.Б., Усов В.Ю., Чернявский А.М. Оценка методом магнитно-резонансной томографии биомеханики левого желудочка и эластических свойств восходящей аорты у пациентов с обширной постинфарктной аневризмой, оперированных по методу Дора: ретроспективный анализ. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2025;29(2):24-36. <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2025-2-24-36>

## Финансирование

Данная работа была выполнена в рамках государственного задания Министерства здравоохранения Российской Федерации 124022500251-0 – Разработка тканеинженерного клапан-содержащего кондуита для коррекции врожденных клапанных пороков сердца.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в создание статьи

## ORCID

А.В. Протопопов, <https://orcid.org/0000-0002-2617-2447>  
А.В. Фридман, <https://orcid.org/0000-0002-2300-2418>  
А.В. Богачев-Прокофьев, <https://orcid.org/0000-0003-4625-4631>  
Д.А. Сирота, <https://orcid.org/0000-0002-9940-3541>  
А.В. Афанасьев, <https://orcid.org/0000-0001-7373-6308>

А.В. Протопопов<sup>1</sup>, А.В. Фридман<sup>1</sup>, А.В. Богачев-Прокофьев<sup>1</sup>, Д.А. Сирота<sup>1,2</sup>, А.В. Афанасьев<sup>1</sup>, А.Р. Таркова<sup>1</sup>, М.О. Жульков<sup>1</sup>, Ю.Б. Лишманов<sup>1</sup>, В.Ю. Усов<sup>1</sup>, А.М. Чернявский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Кафедра сердечно-сосудистой хирургии факультета повышения квалификации и профессиональной переподготовки ФГБОУ ВО Новосибирского государственного медицинского университета Минздрава России, Новосибирск, Российская Федерация

## Аннотация

**Актуальность.** Операция Дора совершенствуется и внедряется в широкую практику кардиохирургии как наиболее эффективная в восстановлении механической функции левого желудочка сердца после перенесенного массивного инфаркта миокарда. Однако при этом механизмы улучшения коронарного кровотока, динамика состояния аорты и, в частности, ее эластичности при проспективном наблюдении пациентов с коронарным шунтированием и одновременной резекцией и пластикой аневризм левого желудочка практически не изучены.

**Целью** настоящей работы было, во-первых, изучить средствами МРТ с контрастным усилением изменения биомеханики и насосной функции миокарда левого желудочка в результате выполнения операции Дора; во-вторых, определить характеристики эластических свойств восходящей аорты в динамике операции Дора и их взаимосвязь с улучшением состояния миокарда в результате этого кардиохирургического вмешательства.

**Материалы и методы.** У 28 пациентов, которым была выполнена операция Дора по поводу обширной постинфарктной аневризмы левого желудочка с коронарным шунтированием, до и после операции было проведено МР-томографическое исследование сердца в покое с определением массы миокарда левого желудочка, показателей конечно-диастолического и конечно-систолического объемов, расчетом объема поврежденной (фиброзной) ткани в исходе перенесенного инфаркта миокарда, а также показателей работы левого желудочка за удар, эластической растяжимости аорты и показателей объема левого предсердия и регургитации на митральном клапане.

**Результаты.** До операции конечно-диастолический объем левого желудочка (ЛЖ) составлял у всех пациентов > 200 мл за счет того, что 30–40% поверхности левого желудочка составляла трансмурально поврежденная мышечная ткань, т. е. собственно аневризма, которая затем удалялась субтотально в ходе операции Дора. В результате у левого желудочка просуществовало значительное, более чем на 20% уменьшение конечно-диастолического объема, до величин 175–180 мл. Уменьшалась и масса миокар-

A.P. Таркова, <https://orcid.org/0000-0002-4291-6047>  
 М.О. Жульков, <https://orcid.org/0000-0001-7976-596X>  
 Ю.Б. Лишманов, <https://orcid.org/0000-0001-7324-504X>  
 В.Ю. Усов, <https://orcid.org/0000-0001-7978-5514>  
 А.М. Чернявский, <https://orcid.org/0000-0001-9818-8678>

© Протопопов А.В.,  
 Фридман А.В.,  
 Богачев-Прокофьев А.В.,  
 Сирота Д.А., Афанасьев А.В.,  
 Таркова А.Р., Жульков М.О.,  
 Лишманов Ю.Б., Усов В.Ю.,  
 Чернявский А.М., 2025



да левого желудочка с  $284 \pm 17,9$  до  $260 \pm 17,6$  г благодаря резекции большей части аневризмы в ходе операции Дора. При исследовании с контрастным усилением оказалось, что доля повреждения миокарда, т. е. участки фиброза миокарда левого желудочка, статистически значимо уменьшаются в объеме, с  $42 \pm 7$  до  $33,8 \pm 10$  %. Интегральным показателем, верифицирующим улучшение биомеханики левого желудочка, здесь было значительное и статистически значимое увеличение фракции выброса левого желудочка, с прогностически неблагоприятных 42 % в среднем по группе до 48 %, которые ассоциируются с существенно лучшим прогнозом. Коррелировавшее с приростом фракции выброса ЛЖ ( $r = 0,52, p < 0,05$ ) увеличение индекса отношения работы ЛЖ за удар к конечно-диастолическому объему ( $A_{уд}/КДО$ ) также однозначно указывает на выраженную нормализацию регуляции сократимости миокарда левого желудочка по Франку-Старлингу. Диаметр кольца митрального клапана в результате операции Дора статистически значимо уменьшался (имплантация специализированных протезирующих митральных колец при этом не проводилась) с  $31 \pm 3,2$  до  $25 \pm 2,8$  мм ( $p < 0,05$ ), а вследствие этого улучшались (снижались) и величины объема левого предсердия с  $83,6 \pm 23,9$  до  $68,1 \pm 15,1$  мл ( $p < 0,05$ ). Также улучшалась систолическая растяжимость аорты при оценке ее как увеличения объема восходящей аорты в систолу – с  $14,9 \pm 5,56$  до  $21,1 \pm 4,1$  мл ( $p < 0,05$ ).

**Заключение.** Операция Дора не только является биомеханически рациональным и обоснованным в своей эффективности вмешательством, улучшающим показатели сократительной функции левого желудочка, но и сопровождается улучшением показателей биомеханики аорты, улучшением систолического растяжения восходящей аорты с последующим диастолическим улучшением коронарного кровоснабжения. Одновременно в результате операции Дора улучшалась гемодинамика митрального клапана – левого предсердия.

**Ключевые слова:** операция Дора; аневризма левого желудочка; биомеханика левого желудочка; МРТ сердца; аорта; эластичность аорты; коронарное кровоснабжение

## MR-tomographic assessment of left ventricle biomechanics and elastic properties of ascending aorta in patients with extensive postinfarction aneurysm operated by the Dor method: retrospective analysis

### Corresponding author:

Wladimir Yu. Ussov,  
[ussov1962@yandex.ru](mailto:ussov1962@yandex.ru)

Received 24 November 2024.

Revised 21 February 2025.

Accepted 5 March 2025.

**How to cite:** Protopopov A.V.,  
 Fridman A.V., Bogachev-  
 Prokofiev A.V., Sirota D.A.,  
 Afanasyev A.V., Tarkova A.R.,  
 Zhulkov M.O., Lishmanov Yu.B.,  
 Ussov W.Yu., Chernyavsky A.M.  
 MR-tomographic assessment  
 of left ventricle biomechanics  
 and elastic properties of  
 ascending aorta in patients

**Andrey V. Protopopov**<sup>1</sup>, **Alexander V. Fridman**<sup>1</sup>, **Alexander V. Bogachev-Prokofiev**<sup>1</sup>, **Dmitry A. Sirota**<sup>1,2</sup>, **Alexander V. Afanasyev**<sup>1</sup>, **Alexandra R. Tarkova**<sup>1</sup>, **Maxim O. Zhulkov**<sup>1</sup>, **Yuri B. Lishmanov**<sup>1</sup>, **Wladimir Yu. Ussov**<sup>1</sup>, **Alexander M. Chernyavsky**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Meshalkin National Medical Research Center,  
 Ministry of Health of the Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Department of Cardiovascular Surgery of the Faculty of Advanced Training and Professional Development, Novosibirsk, Russian Federation

### Abstract

**Introduction:** Dor surgery is being improved and widely adopted in cardiac surgery as the most effective method for restoring the mechanical function of the left ventricle of the heart after massive myocardial infarction. However, the mechanisms for improving coronary blood flow, as well as the dynamics of aortic function, including its elasticity, have remained largely unstudied in prospective follow-up of patients with revascularization interventions on the coronary bed and simultaneous resection and plastic surgery of left ventricular aneurysms.

with extensive postinfarction aneurysm operated by the Dor method: retrospective analysis. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokhirurgiya = Circulation Pathology and Cardiac Surgery*. 2025;29(2):24-36. (In Russ.)  
<https://doi.org/10.21688/1681-3472-2025-2-24-36>

### Funding

This work was performed as part of the state assignment of the Ministry of Health of the Russian Federation, project No. 124022500251-0, "Development of a Tissue-Engineered Valve-Conduit for the Correction of Congenital Valvular Heart Disease

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Contribution of the authors

#### ORCID

A.V. Protopopov,  
<https://orcid.org/0000-0002-2617-2447>  
A.V. Fridman,  
<https://orcid.org/0000-0002-2300-2418>  
A.V. Bogachev-Prokofiev,  
<https://orcid.org/0000-0003-4625-4631>  
D.A. Sirota, <https://orcid.org/0000-0002-9940-3541>  
A.V. Afanasyev,  
<https://orcid.org/0000-0001-7373-6308>  
A.R. Tarkova,  
<https://orcid.org/0000-0002-4291-6047>  
M.O. Zhulkov,  
<https://orcid.org/0000-0001-7976-596X>  
Yu.B. Lishmanov,  
<https://orcid.org/0000-0001-7324-504X>  
W.Yu. Ussov,  
<https://orcid.org/0000-0001-7978-5514>  
A.M. Chernyavsky,  
<https://orcid.org/0000-0001-9818-8678>

© 2025 Protopopov et al.



The purpose of the study was to examine changes in the biomechanics and pumping function of the left ventricular myocardium after the Dor procedure using contrast-enhanced MRI and to determine the characteristics of the elastic properties of the ascending aorta during the course of the Dor procedure, as well as to reveal their relationship with the improvement in myocardial condition as a result of this cardiac surgical intervention.

**Material and methods:** The Dor procedure was performed in 28 patients with extensive postinfarction left ventricular aneurysms. Pre- and post-operative cardiac MR tomographic examination was performed at rest, determining left ventricular myocardial mass, end-diastolic and end-systolic volumes, calculating the volume of damaged (fibrous) tissue following myocardial infarction, as well as left ventricular work per beat, aortic elastic distensibility, left atrium volume, and mitral valve regurgitation.

**Results:** Preoperatively, ventricular end-diastolic volume was >200 ml in all patients, due to 30-40% transmural damage to the left ventricular muscle tissue, namely the aneurysm, which was further removed subtotally during the Dor procedure. As a result of the Dor operation, the left ventricle experienced a significant, more than 20 %, reduction in end-diastolic volume to 175-180 ml and a decrease in mass from  $284 \pm 17.9$  g to  $260 \pm 17.6$  g due to resection of the majority of the aneurysm. Contrast-enhanced MR imaging revealed a highly significant and substantial reduction in the proportion of myocardial damage, i.e., areas of left ventricular myocardial fibrosis, from  $42 \pm 7$  % to  $33.8 \pm 10$  %. The integrated indicator verifying the improvement in left ventricular biomechanics was associated to a highly significant and pronounced increase in the left ventricular ejection fraction, from a prognostically unfavorable 42 % to 48 % on average for the group indicating a significantly improved prognosis. Correlated with an enhancement in EFLV ( $r = 0.52, p < 0.05$ ), an increase in the index of the ratio of LV work per beat to the end-diastolic volume (ALV/EDV) also unambiguously indicated a pronounced normalization of the Frank-Starling regulation of left ventricular contractility. The mitral valve annulus diameter significantly decreased after the Dor procedure from  $31 \pm 3.2$  mm to  $25 \pm 2.8$  mm ( $p < 0.05$ ), although specialized prosthetic mitral rings were not implanted; this contributed to a decrease in the left atrial volume from  $83.6 \pm 23.9$  ml to  $68.1 \pm 15.1$  ml ( $p < 0.05$ ). Systolic aortic distensibility, assessed as an increase in the ascending aorta volume during systole, also improved from  $14.9 \pm 5.56$  ml to  $21.1 \pm 4.1$  ml ( $p < 0.05$ ).

**Conclusion.** The Dor procedure is a biomechanically rational and rightly effective intervention that improves left ventricular contractility and is accompanied by enhancements in aortic biomechanics, including meliorated systolic distension of the ascending aorta and subsequent diastolic advancing in coronary blood flow. Concurrently, the Dor surgery also improves left atrial hemodynamics associated with the mitral valve.

**Keywords:** Dor surgery; Left Ventricular Aneurysm; Left ventricular biomechanics; MRI of the heart; Aorta; Aortic elasticity; coronary blood supply

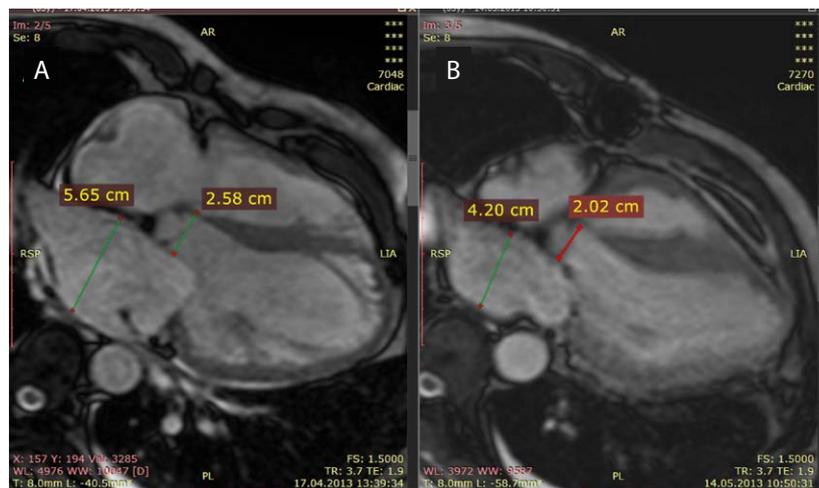
## Введение

Неоднократно показано, в том числе на значительных по численности когортах пациентов, что реконструктивные операции Дора, Минеканти [1; 2] и их модификации и аналоги являются сегодня одними из наиболее эффективных в коррекции состояния миокарда у пациентов, перенесших обширный инфаркт левого желудочка (ЛЖ), с выраженной левожелудочковой недостаточностью, зачастую снимаемая необходимостью в трансплантации сердца у таких пациентов. Основным принципом и главным этапом операции Дора является выполнение эндовентрикулопластики с использованием кругового шва и заплаты из биологически совместимых атромботических материалов (первоначально – из дакрона) так, что при этом корригируется аневризма ЛЖ, отсутствует повреждение межжелудочковой перегородки, а также полностью или частично восстанавливается форма левого желудочка, более эффективно, чем при линейном ушивании по Кули, или при кисетной пластике по Жатене [1; 2]. Однако улучшение биомеханики миокарда ЛЖ у таких пациентов остается пока изученным эмпирически, как правило, на основе общепринятых показателей конечно-диастолического объема (он прямо уменьшается при резекции и ушивании аневризмы), конечно-систолического объема ЛЖ и фракции выброса ЛЖ, без детального анализа состояния механизмов обеспечения и регуляции коронарного кровотока. Между тем совершенствование и детализация биомеханического анализа у них могли бы послужить не только лучшему пониманию патофизиологических основ этих операций, но и дополнительным фактором улучшения как текущего состояния, так и прогноза – функционального и жизни. Были высказаны предположения [3; 4], что адекватная и неосложненная хирургическая коррекция у пациентов с обширной постинфарктной аневризмой левого желудочка сопровождается улучшением коронарного кровотока, как можно видеть по данным перфузионной МРТ [4]. Ключевым здесь, безусловно, является адекватное выполнение у этих пациентов аортокоронарного шунтирования, полностью восстанавливающего коронарный приток крови к сократительному жизнеспособному миокарду, наряду с резекцией и пластикой аневризматически измененного участка сердечной мышцы [3]. Однако важнейшим механизмом, практически единственным, обеспечивающим улучшение коронарного кровотока за счет повышения артериального напора в просвете восходящей аорты, у пациентов с ишемической кардиомиопатией является повы-

шение механической растяжимости аорты – комплайенса (compliance), когда восходящая аорта оказывается растянутой в систолу таким образом, чтобы в диастолу за счет схлопывания эластически растянутого просвета (стенок восходящей аорты) обеспечить достаточный возврат и кровоснабжение по коронарным артериям. Аорта и, в частности, восходящая аорта являются важнейшими компонентами сосудистой системы, обеспечивающей кровоснабжение миокарда, так как приток крови к сердечной мышце происходит почти исключительно в диастолу и осуществляется в пределах объема систолического растяжения восходящей аорты [5–7].

Однако парадоксальным образом взаимосвязь между коронарной перфузией и состоянием миокарда ЛЖ, с одной стороны, и – в данном аспекте самое главное – состоянием растяжимости и механической жесткости аорты, с другой, остается у этой группы пациентов практически неизученной. Совершенно не изучена динамика состояния аорты и ее эластичности при динамическом наблюдении пациентов после открытой реваскуляризации миокарда одновременной резекцией и пластикой аневризм левого желудочка. При анализе отечественной (РИНЦ – [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)) и зарубежной (MedLine – [www.nlm.nih.gov](http://www.nlm.nih.gov)) систематизированной литературы по данному вопросу мы такого исследования не обнаружили. Между тем, хотя эластичность аорты именно у кардиохирургических пациентов остается «белым пятном», в целом у кардиологических пациентов сходные исследования выполнялись [8; 9]. В частности, во-первых, было показано, что ЭКГ, синхронизированная с МРТ сердца и органов грудной клетки, является оптимальным методом для такого рода исследований как с методических, так и с клинико-патофизиологических позиций [8]. Во-вторых, оказалось, что систолическое расширение объема восходящей аорты – критический фактор, обуславливающий сохранность или повреждение миокарда у пациентов с различными формами ишемической болезни сердца [9]. В этом случае удалось показать, что снижение эластичности и растяжимости и увеличение жесткости восходящей аорты являются важнейшими патологическими факторами, способствующими развитию острого инфаркта миокарда [9]. Очевидно, не меньшим по своему клиническому значению является и исследование эластичности восходящей аорты у кардиохирургических больных с аневризматической патологией левого желудочка, которым выполняются хирургические вмешательства Дора или Минеканти. Недостаточная эластичность восходящей аорты, предположительно,

**Рис. 1.** Поперечные срезы Т1-ВИ сердца в четырехкамерной позиции и органов грудной клетки до и после выполнения операции Дора. Обращает внимание исходное умеренное, но статистически значимое расширение левого предсердия (А), которое затем заметно уменьшается после кардиохирургического вмешательства, как и аорта на уровне клапанного кольца. Также на послеоперационной томограмме виден артефакт в области грудины от проволочно-металлофиксатора



может служить ограничивающим, а порой и патологическим фактором, снижая возможности адекватного кровоснабжения сердца после резекции и пластики аневризмы.

Поэтому **целью** настоящей работы было, во-первых, изучить средствами МРТ с контрастным усилением изменения биомеханики и насосной функции миокарда левого желудочка в результате выполнения операции Дора; во-вторых, определить характеристики эластических свойств восходящей аорты в динамике после операции Дора и взаимосвязь их с улучшением миокардиального кровотока в результате этого кардиохирургического вмешательства.

## Материал и методы

**Пациенты.** Исследование носило ретроспективный характер и основывалось на базе данных магнитно-резонансных томографических исследований сердца ФГБУ НМИЦ им. ак. Е.Н. Мешалкина Минздрава России, полученных в рентгеновском отделении Центра в 2017–2023 гг. **Критериями включения** были наличие в клиническом анамнезе подтвержденного перенесенного трансмурального острого инфаркта миокарда давностью более 2 мес., с формированием обширной аневризмы левого желудочка и установленными показаниями к проведению операции Дора и коронарному шунтированию. **Критериями исключения** служили: наличие имплантируемых металлосодежащих устройств, наличие на момент исследования онкологических заболеваний и / или заболеваний легких с формированием легочной артериальной гипертензии, наличие установленного диагноза сахарного диабета 2-го типа. Поскольку исследование носило ретроспективный

характер, целиком состояло в расширенном анализе данных имеющихся МРТ-исследований и не требовало выполнения дополнительных протоколов и манипуляций, то получения индивидуального согласия пациента и согласия этического комитета НМИЦ данная работа не требовала, а зачастую оно было и невозможно.

Всего в исследование было включено 47 пациентов (42 мужчины и 5 женщин) с установленным предварительным диагнозом – ишемической постинфарктной кардиомиопатией (ИКМП), при этом средний возраст составил  $58,3 \pm 2,4$  года. Из них у 24 была в связи с наличием обширной постинфарктной аневризмы выполнена операция Дора. У 23 операция Дора не выполнялась в связи с диффузным неаневризматическим характером постинфарктного ремоделирования, они составили контрольную группу. Также отдельную контрольную группу составили 12 клинически здоровых бессимптомных лиц того же возраста ( $56,5 \pm 3,7$ ). До реваскуляризирующего кардиохирургического вмешательства пациенты прошли полное аппаратное ультразвуковое, инвазивное коронарографическое и спiroвелоэргометрическое исследование с определением количества потребляемого кислорода во время физической нагрузки, на основании чего выявлялся класс сердечной недостаточности. МР-томографическое исследование сердца проводилось как в последнюю неделю перед кардиохирургическим вмешательством, так и в послеоперационный период через год после кардиохирургического вмешательства с целью оценки динамики состояния пациентов и, в частности, параметров МР-томографического исследования сердца.

### Использованные протоколы и методики МР-томографического исследования сердца с парамагнитным контрастным усилением

У всех пациентов была выполнена МРТ миокарда с ПМКУ в режимах single-side free precession (ssfpr), инверсия-восстановление («черный неповрежденный миокард»), T2-взвешенные (T2-ВИ), T1-взвешенные (T1-ВИ), в том числе и с подавлением сигнала от жировой ткани. Все протоколы записи МРТ осуществлялись с синхронизацией по сигналам ЭКГ и дыхательному механическому движению грудной клетки. В частности, срезы МРТ сердца по короткой и длинной осям были получены в T1-ВИ (TR = 500 мс, TE = 12 мс), T2-ВИ (TR = 4000 мс, TE = 25 мс), ssfpr-взвешенных (single side free precession – позволяет осуществлять без помех и артефактов кино-исследования с высоким временным разрешением) режимах (при ssfpr TR = 3,7 мс, TE = 1,9 мс), толщиной среза 8 мм, в матрицу цифрового изображения 256 × 392 или 256 × 256 элементов. 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 удлинненным показателем времени повторения TR = 1850–1900 мс и временем эхо TE = 32 мс (рис. 1), поскольку в этом режиме устойчиво визуализируются структуры крупных сосудов грудной полости, в частности их стенок.

Парамагнитное контрастное усиление (ПМКУ) осуществлялось гадобутролом (0,1 мМ/кг массы, т. е. 1 мл 1М раствора на 10 кг веса тела) или гадоверсетамидом (0,1 мМ/кг массы, 1 мл 1М раствора на 10 кг

массы тела). Исследования проводились на МР-томографах «Toshiba Titan Vantage» (поле 1,5 Т, пр-ва Тошиба Медикал) и Philips Brilliance (поле 1,5 Т, пр-ва Philips Медикал) с использованием фазированных 8-канальных катушек для исследования грудной клетки.

Кроме МР-томографии с ПМКУ, всем пациентам было выполнено динамическое ЭКГ-синхронизированное исследование сократимости миокарда, с записью 24–36 кадров на сердечный цикл, в матрицу 256 × 256, по короткой и длинной (в двух- и четырехкамерной позициях) осям, с количественной оценкой конечно-диастолических толщин и размеров левого желудочка, с последующим расчетом величины массы миокарда левого желудочка по R. Devereaux, как детально описано ниже.

Проводилась стандартная обработка результатов МРТ сердца [9], с расчетом показателей конечно-диастолического (КДО<sub>лж</sub>, мл) и конечно-систолического (КСО<sub>лж</sub>, мл) объемов и фракции выброса (ФВ<sub>лж</sub>) левого желудочка, массы миокарда левого желудочка (ММ<sub>лж</sub>), поперечного размера митрального клапана (D<sub>мк</sub>, мм), объема левого предсердия (V<sub>лп</sub>, мл), а также относительной доли рубцовой ткани (т. е. доли повреждения – ДП) в общей массе левого желудочка (как % ЛЖ).

**Расчет массы миокарда левого желудочка.** Величина ММ<sub>лж</sub> (в г) рассчитывалась по данным кино-МРТ исследования по длинной (в четырех- и двухкамерной проекциях) оси, и также по короткой оси левого желудочка на основе классической геометрической аппроксимации R. Devereaux et al. [10],

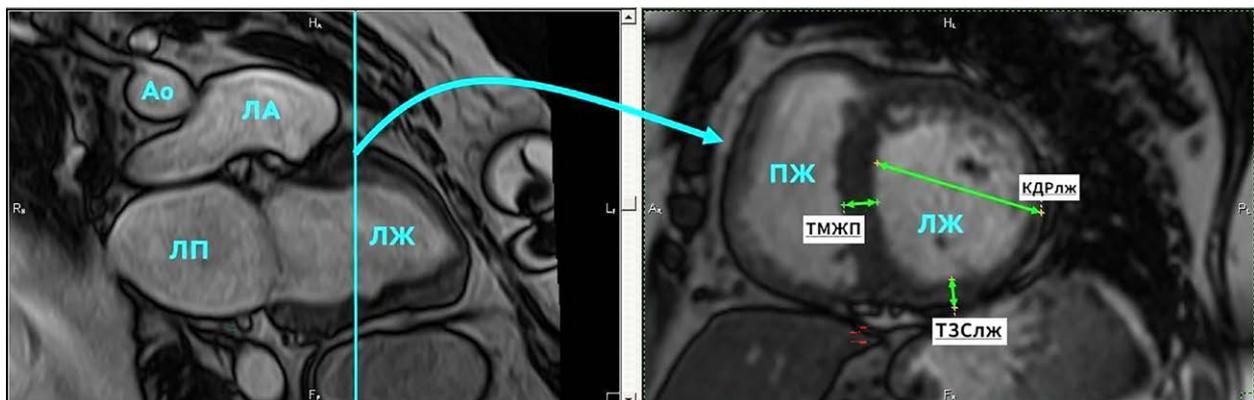
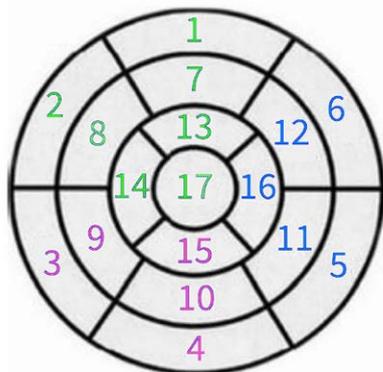


Рис. 2. Порядок определения геометрических размеров левого желудочка, в частности толщины межжелудочковой перегородки ЛЖ (ТМЖП, см), конечно-диастолического размера ЛЖ (КДР, см), толщины задней стенки ЛЖ (ТЗСЛЖ, см) по данным кино-МРТ сердца на конечно-диастолическом кадре, с расчетом в итоге массы миокарда левого желудочка как  $ММ_{лж} = 0,8 \times \{1,04 \times (ТМЖП + КДР + ТЗСЛЖ)^3 - КДР^3\} + 0,6$  (по R. Devereaux et al.)



**Рис. 3.** Бассейны кровоснабжения трех основных коронарных артерий соответственно сегментному анатомическому разбиению миокарда левого желудочка по Cerqueira et al. [10].

Зеленым цветом выделены сегменты бассейна передней нисходящей ветви левой коронарной артерии, голубым – огибающей ветви левой коронарной артерии, фиолетовым – правой коронарной артерии

когда на томосрезах функционального кино-исследования МРТ на конечно-диастолическом кадре выделяются показатели толщины миокарда межжелудочковой перегородки и задней стенки левого желудочка, как представлено на рис. 2: ТМЖП – ширина межжелудочковой перегородки, КДР – конечно-диастолический размер, ТЗСЛЖ – толщина задней стенки ЛЖ, все в сантиметрах. Тогда формула определения массы миокарда выглядит как

$$MM_{\text{лж}} = 0,8 \times \{1,04 \times (\text{ТМЖП} + \text{КДР} + \text{ТЗСЛЖ})^3 - \text{КДР}^3\} + 0,6.$$

У всех пациентов проводилась верификация величин массы миокарда левого желудочка по данным высокоразрешающего ультразвукового исследования в В-типе визуализации [11; 12] в четырех- (по длинной и короткой осям левого желудочка) и двухкамерной позициях в покое с интервалом между УЗ-исследованием и МР-томографией сердца не более 5 дней. Ранее сравнительные исследования показали достоверную и высокую степень корреляции величин массы миокарда левого желудочка по данным ультразвукового и МР-томографического обследования ( $r = 0,91, p < 0,01$ ).

### Расчет объема поврежденного миокарда

Для проведения количественной оценки объема поврежденного миокарда левого желудочка миокард ЛЖ разбивался в соответствии с классической схемой [10] на семнадцать сегментов по срезам, расположенным соответственно субаннулярно, в средней трети левого желудочка и параапикально (рис. 2, 3)

Для каждого сегмента визуально или по соотношению площадей патологического включения парамагнетика и интактного, не аккумулирующего контраст миокарда, оценивается внутрисегментная доля повреждения –  $ДП_i$ , как относительная доля в объеме сегмента, которую занимает необратимо поврежденная, т. е. аккумулирующая контраст-парамагнетик ткань [12]. Тогда если для некоторого сегмента  $i$  объем его составляет  $V_i$ , то очевидно, что при стандартном семнадцатисегментном разбиении миокарда левого желудочка

$$(\text{Объем повреждения миокарда ЛЖ}) = \sum (ДП_i * V_i). \quad (1)$$

Для левого желудочка в целом доля повреждения представляет собой отношение объема повреждения к объему миокарда левого желудочка, и в пределах данного сегмента представляет собой такой достаточно широко используемый показатель, как индекс трансмуральности (доля поражения по толщине):

$$(\text{Доля повреждения миокарда ЛЖ}) = \frac{\sum (ДП_i * V_i)}{\sum V_i}. \quad (2)$$

Поскольку миокард левого желудочка разбивается в соответствии с классическим представлением [10] на 17 сегментов, то обоснованно считать массу и соответственно объем одиночного сегмента как  $V = (MM_{\text{лж}}) / 17$ . Если сегментные доли повреждения оказываются не тождественны между собой для разных сегментов, а объем каждого сегмента одинаков в отсутствие асимметричной гипертрофии ЛЖ, то доля поврежденного миокарда левого желудочка рассчитывается технически наиболее просто с помощью научного или даже обычного калькулятора, как

$$(\text{Доля повреждения миокарда ЛЖ}) = \frac{\sum (ДП_i)}{17}. \quad (3)$$

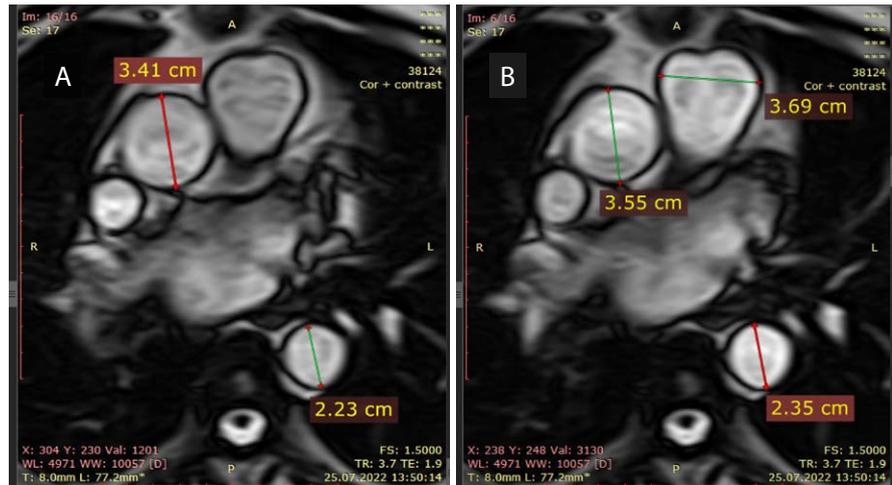
Вслед за ней проводилась ЭКГ-синхронизированная МРТ восходящей аорты на уровне ее перекреста с бифуркацией легочной артерии в аксиальной плоскости, в кино-режиме, с записью 24 кадров на сердечный цикл, с определением изменений в ходе сердечного цикла толщины стенки аорты (рис. 4, В), диаметра и поперечной площади просвета аорты на уровне исследования (рис. 4, А). Показатель механической работы левого желудочка за удар рассчитывался по классической формуле [13]:

$$A_{\text{лж\_уд}} = 0,0144 * A_{\text{д\_ср}} * УО,$$

$A_{\text{лж\_уд}}$  – работа ЛЖ за удар, в Дж,

$A_{\text{д\_ср}}$  – среднее артериальное давление, в мм рт. ст.,  
а  $УО$  – ударный объем левого желудочка, в мл. Коэф-

**Рис. 4.** Картина МР-ангиографического ЭКГ-синхронного исследования грудной аорты – поперечного среза восходящей аорты, с измерениями поперечника (А – диастола, В – систола), для последующего расчета растяжимости аорты, как детально представлено в тексте



фициент 0,0144 – для согласования единиц измерения, перевода мм рт.ст. в единицы СИ (Дж).

На основе этих измерений и линейной биофизической модели [7] рассчитывалась величина поперечной растяжимости аорты [8]:

$$\text{Растяжимость} = [(S_{\text{сисст}} - S_{\text{диаст}}) / S_{\text{диаст}}],$$

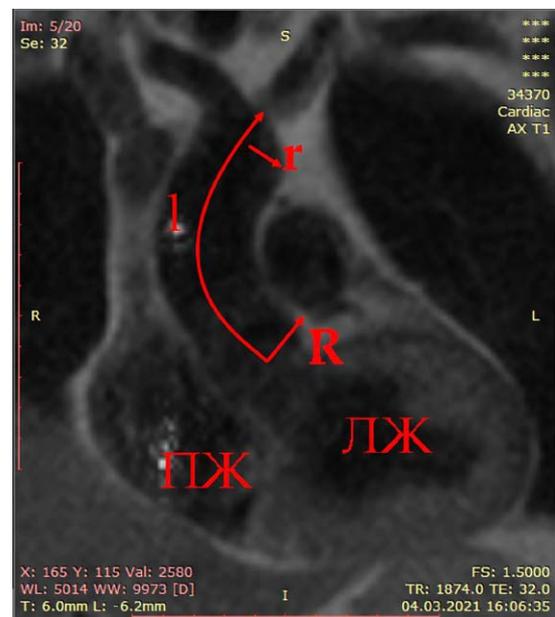
где  $S_{\text{сисст}}$  и  $S_{\text{диаст}}$  – площадь поперечного сечения аорты в систолу и диастолу соответственно, как представлено на рис. 4.

Рассчитывался объем восходящей аорты по протяженности – от надклапанного уровня до середины дуги аорты (между брахиоцефальным стволом и устьем левой общей сонной артерии) в систолу и диастолу. Поскольку аорта в восходящем колене представляет собой деформированный – несжимаемо изогнутый усеченный конус протяженностью  $l$  (длина участка «аортальный клапан – середина дуги аорты»), – как показано на рис. 5), с радиусом оснований, определяемых по поперечным срезам в кино-режиме: нижнего –  $R$  и верхнего –  $r$ . Тогда объем усеченного конуса – восходящего колена аорты с высокой точностью составляет, как хорошо известно [14]:

$$V = 1/3 \pi l (R^2 + Rr + r^2).$$

По разнице систолического и диастолического объемов восходящей аорты определялась величина систолического объемного расширения аорты ( $\Delta V_{\text{сисст}}$  мл), которая определяет объем крови, доступный для коронарного кровоснабжения миокарда в диастолическую фазу сердечного цикла, когда как раз и осуществляется основное кровоснабжение миокарда [5].

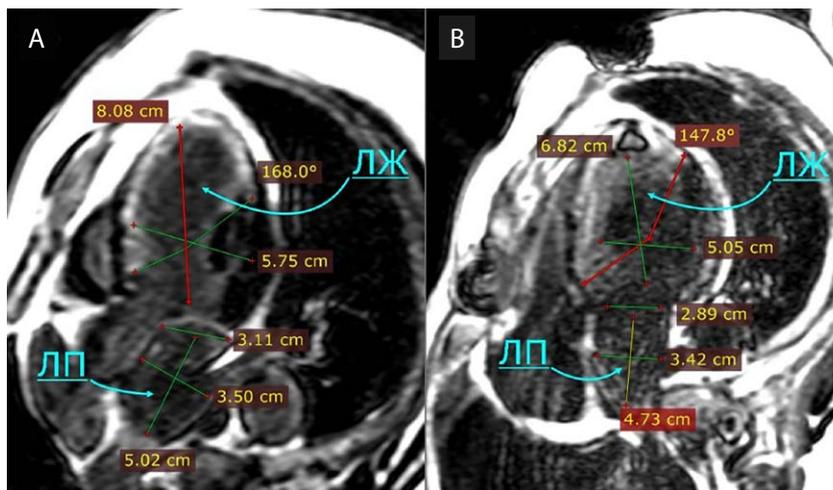
Статистическая обработка результатов проводилась с использованием параметрических (Стьюдента) и непараметрических (Манна–Уитни) критериев с помощью пакета программ для статистической обработки и визуализации данных Origin 6.1 (Origin Lab., Texas).



**Рис. 5.** Картина измерений поперечных размеров ( $r$  и  $R$ ) и длинника ( $l$ ) восходящей аорты при расчете внутриаортального объема восходящей аорты в систолу и диастолу и показателя  $\Delta V_{\text{сисст}}$  мл

**Рис. 6.** Картина МР-томографических изменений при исследовании с ПМКУ до (А) и после (В) операции Дора.

ЛП – левое предсердие,  
ЛЖ – левый желудочек сердца.  
Можно видеть выраженное уменьшение участка аневризмы ЛЖ, отмечено здесь по угловой протяженности на этом срезе. Также отмечается уменьшение в размерах и объемах как левого желудочка (КДО до операции – 142 мл, после операции – 118 мл), так и левого предсердия (56 и 43 мл соответственно). Уменьшение поперечника митрального клапана с 3,1 до 2,9 см



## Результаты

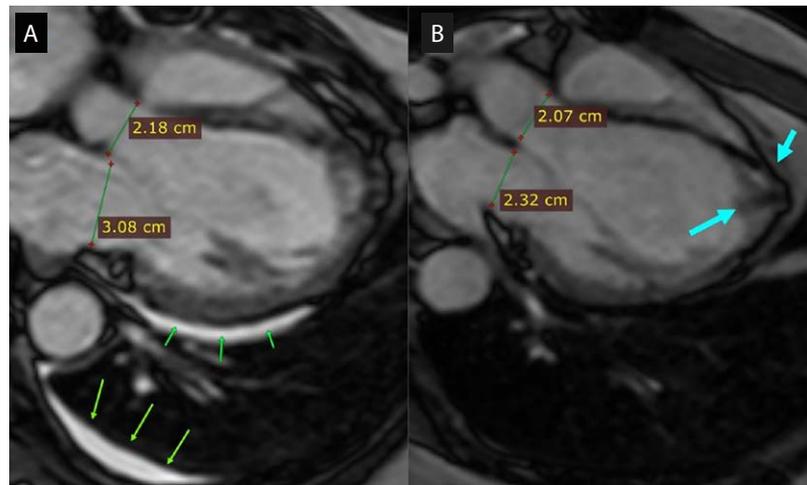
Изолированный, не включающий в себя анализ чисто клинических данных у наших пациентов был малоинформативен. Однако заметим здесь, что имевшийся у 15 из 24 пациентов незначительный по объему – до 100 мл – трансудат в перикардиальной

и плевральных полостях, в после операционном периоде регрессировал (рис. 7). Наибольший интерес представляли результаты количественной обработки показателей механической насосной функции левого желудочка и состояния эластической функции аорты, которые последовательно представлены в таблице.

Результаты анализа биомеханических показателей левого желудочка после операции В. Дора, выполненной по поводу обширной постинфарктной аневризмы левого желудочка, по данным МРТ сердца с парамагнитным контрастным усилением

Показатель	Конечно-диастолический объем КДО, мл	Ударный объем УО <sub>лж'</sub> , мл	Фракция выброса ЛЖ ФВ <sub>лж'</sub> , %	Масса миокарда ЛЖ ММ <sub>лж'</sub> , г	Доля повреждения ЛЖ, как доля фиброзной ткани аневризмы в общей массе миокарда ЛЖ, %	Митральный клапан, мм	Объем левого предсердия V <sub>лп'</sub> , мл	Работа ЛЖ за удар A <sub>лжуд'</sub> , г*м	АЛЖ УД / КДО, г*м/мл	Систолическое растяжение аорты ΔV <sub>сис'</sub> , мл	ΔV <sub>сис'</sub> / ММ <sub>лж'</sub> , мл/г	Растяжимость аорты по диаметру, %	
Контрольная группа – здоровые, n = 12	98 ± 12	59 ± 12	59,1 ± 7,4	173 ± 12	0	23 ± 2	62,5 ± 7,0	156,3 ± 12,1	1,53 ± 0,07	20 ± 5,5	0,116 ± 0,02	0,18 ± 0,03	
Контрольная группа с перенесенным инфарктом миокарда, нетрансмуральным, без формирования аневризмы, n = 23	124 ± 15	67 ± 9	52,3 ± 7,9	187 ± 14	0 (10 ± 3)	25 ± 6	71,3 ± 9,2	135,2 ± 15,7	1,07 ± 0,09	14,7 ± 7,5	0,079 ± 0,03	0,12 ± 0,04	
Пациенты с обширной аневризмой, с операцией Дора, n = 24	До операции	228,8 ± 62,5	87,1 ± 21,2	42,6 ± 10,6	284 ± 17,9	42 ± 7	31 ± 3,2	83,6 ± 23,9	115 ± 38,9	0,56 ± 0,16	14,9 ± 5,56	0,052 ± 0,01	0,104 ± 0,027
	После операции	182,5 ± 46,7	85,3 ± 19,4	48,0 ± 10,8	260 ± 17,6	33,8 ± 10	25 ± 2,8	68,1 ± 15,1	119,6 ± 25,4	0,68 ± 0,17	21,1 ± 4,1	0,081 ± 0,02	0,139 ± 0,040
Достоверность различия показателей, полученных до и после операции Дора	< 0,05	> 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,02	< 0,01	< 0,01	> 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	

**Рис. 7.** Картина изменений у того же пациента, что и на рис. 5, со стороны левого предсердия и аорты. До (А) и после (В) операции Дора. Можно видеть уменьшение размеров поперечников митрального и аортального клапанов. Впрочем, в данном случае аортальный клапан не расширен и до операции, препятствий на уровне выводного тракта нет. Обращает внимание также исчезновение после операции трансудата в перикардиальной (короткие стрелки) и плевральной (длинные стрелки) полостях. На послеоперационном скане толстыми стрелками отмечена заплата после резекции аневризмы по Дору



В первую очередь представляют интерес величины классических объемных и массовых показателей левого желудочка, определенные у наших пациентов средствами МР-томографии сердца в динамике их наблюдения при выполнении операции Дора. До операции величина КДО<sub>лж</sub> составляла у пациентов, перенесших операцию Дора, значительно больше 200 мл за счет того, что 30–40% поверхности левого желудочка представляла трансмурально поврежденная мышечная ткань, т. е. собственно аневризма, которая затем и удалялась субтотально и замещалась меньшим по объему и протяженности синтетическим фрагментом в ходе операции Дора. В результате происходило значительное, более чем на 20 % уменьшение КДО<sub>лж</sub> до величин около 175–180 мл (см. таблицу), что уже само по себе способствует улучшению работы по механизму Франка–Старлинга. Типичную визуальную картину изменений по данным МРТ можно видеть на рис. 6 и 7.

Одновременно с этим несколько уменьшалась и масса миокарда левого желудочка, что вполне очевидно – благодаря резекции большей части аневризмы в ходе операции Дора. Исходно она была статистически значимо больше, чем в группах сравнения, за счет большей дилатации и, вероятно, также – компенсаторной гипертрофии ЛЖ.

В ходе исследования с контрастным усилением, когда парамагнетик визуализирует распределение фиброзных структур по миокарду ЛЖ [16], оказалось, что они статистически значимо уменьшаются в объеме – в частности такой показатель, как доля (отношение) поврежденного миокарда относительно общей массы миокарда левого желудочка, в результате операции Дора (см. таблицу, рис. 6, 7). В группе сравнения объем аневризмы составлял

по определению 0, поскольку аневризма как таковая у этих пациентов не сформировалась. Также имелось статистически значимое увеличение после операции Дора ФВ<sub>лж</sub>, с прогностически неблагоприятных 42 % в среднем по группе, до 48 %, которые ассоциируются с существенно лучшим прогнозом. Также статистически значимо увеличивались показатели ФВ<sub>лж</sub> и индекса механизма Франка–Старлинга – отношения механической работы по изгнанию крови левым желудочком за удар к конечно-диастолическому объему ( $A_{уд}/КДО$ ).

Достаточно неожиданным и исходно непрогнозируемым для нас оказался благоприятный эффект операции Дора на аппарат митрального клапана и левого предсердия. В частности, оказалось, что диаметр митрального клапана в результате операции Дора статистически значимо уменьшался (отметим здесь, что у наших пациентов имплантация специализированных митральных колец не проводилась) по сравнению с таковыми в контрольных группах, а вследствие этого улучшались (снижались) и величины объема левого предсердия (см. таблицу).

Как можно видеть, операция Дора приводила к статистически значимому уменьшению КДО и в еще большей степени – к уменьшению конечно-систолического объема, т. е. практически у всех пациентов увеличивалась фракция выброса левого желудочка. Происходило это (см. таблицу) за счет уменьшения участка рубцовой ткани, удаляемого в результате хирургических этапов операции Дора ( $r = 0,49, p < 0,05$ ).

У пациентов после операции Дора статистически значимо выше, чем до нее, были показатели растяжимости восходящей аорты и соответствен-

но снижены показатели жесткости восходящей аорты как основного резервуара для эффективного коронарного кровоснабжения в диастолу, поэтому выше были и показатели растяжения аорты в систолу. Практически у всех пациентов после проведения операции Дора показатель относительного расширения по диаметру увеличивался на 10 % и более, а у четверти от всего количества обследованных – более 20 %.

Таким образом, обобщенным результатом операции Дора у наших пациентов были: статистически значимое улучшение показателей сократимости, прямо зависевшее от улучшения коронарной гемодинамики, нормализация функционирования митрального клапана и левого предсердия и – что тоже крайне важно – улучшение функционирования аортальных биофизических эластических механизмов, большее систолическое расширение аорты и улучшение гемодинамического обеспечения коронарного кровотока.

## Обсуждение

Наиболее заметное, более чем на 20 % уменьшение КДО<sub>лжк</sub> до 75–180 мл, очевидно означало выраженный регресс гиперрастяжения левого желудочка и переход его в область нормального функционирования кривой Франка-Старлинга [7; 15].

Поскольку оказалось, что фиброзные патологические структуры в толще миокарда ЛЖ статистически значимо уменьшаются в результате операции Дора в объеме, это верифицировало эффективность и техническую безупречность резекции аневризматического фиброзного выпячивания. Интегральным показателем, верифицирующим улучшение биомеханики левого желудочка, здесь было значительное и статистически значимое увеличение ФВ<sub>лжк</sub> как отмечалось выше, с прогностически неблагоприятных 42 % в среднем до существенно более прогностически благоприятных 48 % [1]. Одновременное с этим и коррелировавшее с приростом ФВ<sub>лжк</sub> ( $r = 0,52, p < 0,05$ ) увеличение индекса ( $A_{уд}/КДО$ ) также однозначно указывает на выраженную нормализацию регуляции сократимости ЛЖ согласно закону Франка – Старлинга [15].

Также можно видеть, что удаление при операции Дора паразитного афункционального объема соединительной ткани аневризмы сопровождается снижением биомеханической растягивающей нагрузки на клапанное кольцо, его уменьшением в размерах, а вследствие этого и уменьшением левого предсердия (см. таблицу). В настоящее время продолжается исследование характеристик систолического (регургитационного) и диастолического (нормального) потоков че-

рез митральный клапан у таких пациентов с помощью фазово-контрастных протоколов МРТ, которые на время представляемого здесь исследования были доступны не полностью.

Полученные нами данные о геометрической растяжимости аорты по диаметру и увеличении восходящей аорты в систолу показывают, что реконструкция по Дору приводит к улучшению и этих показателей, в частности к увеличению объема крови, находящегося в аорте в диастолу и доступного для коронарного кровоснабжения миокарда, которое носит почти исключительно диастолический характер по времени сердечного цикла [5; 6]. Значительный, более чем на треть, прирост  $V_{csm}$  позволяет утверждать, что удаление аневризматического фиброзного участка приводит к улучшению функционирования всего клапанно-аортального комплекса, за счет чего происходит увеличение объема крови в аорте до величин контрольной группы – улучшается и глобальная сократимость ЛЖ. Условия функционирования непораженного, оставшегося сохранным миокарда, таким образом заметно улучшаются в соответствии с законом Франка–Старлинга [15].

Безусловно, при этом важнейшим фактором, лежащим в основе улучшения кровоснабжения и функционирования миокарда, является собственно аортокоронарное шунтирование, которое было выполнено у всех пациентов одновременно с операцией Дора. Существенное улучшение функции левого желудочка также было связано со снижением или полным исчезновением митральной регургитации. Это достигалось за счет уменьшения диаметра клапана и полного смыкания створок, что делало заброс крови из левого желудочка в левое предсердие гемодинамически незначимым по сравнению с прямым выбросом в аорту.

Статистически значимое повышение растяжимости и снижение жесткости восходящей аорты, наблюдавшиеся у пациентов после операции, а также увеличение показателя относительного расширения на 10–20 % и более, зафиксированное у большинства из них, вероятно, обусловили положительные изменения коронарного кровотока уже в раннем послеоперационном периоде. Существенно, что у части этих пациентов в раннем послеоперационном периоде выполнялась такая процедура, как вспомогательная баллонная внутриаортальная контрпульсация, которая ранее была предложена как единственный метод, способный уменьшить жесткость атеросклеротически пораженной стенки восходящей аорты [9].

В рамках настоящего исследования было затруднительно точно определить относительную роль внутриаортальной контрпульсации и собственно хирургической реконструкции операции Дора в улучшении

биомеханики аорты и коронарного кровообращения, однако сам эффект повышения растяжимости стенки и улучшения коронарного кровоснабжения при операции Дора несомненен. Ранее такой возможный лечебный эффект внутриаортальной контрпульсации у пациентов с распространенным атеросклерозом аорты в отношении улучшения показателей эластичности и коронарного кровоснабжения прямо предсказывался по данным патофизиологического анализа состояния различных биомеханических параметров восходящей аорты [8].

Отмеченная статистически значимая корреляционная связь между степенью улучшения состояния миокарда, с одной стороны, и отношением систолического прироста внутриаортального объема к массе миокарда левого желудочка, с другой стороны, патофизиологически очевидна, поскольку этот индекс характеризует количество крови коронарного кровоснабжения, доступной для осуществления работы единицы массы миокарда левого желудочка [5; 16; 17]. Соответственно, прирост этого показателя прямо определяет возможность улучшения механической функции миокарда ЛЖ и, в частности, работы левого желудочка за удар и увеличение порога толерантности к физической нагрузке. Прирост работы левого желудочка за удар после операции Дора также фактически определялся степенью растяжимости восходящей аорты. Таким образом, улучшение эластичности аорты у пациентов, перенесших обширный инфаркт миокарда с формированием аневризмы ЛЖ и нуждающихся в ее устранении – выполнении операции Дора, выступает важнейшим базовым фактором этого улучшения, а выполнение в ходе операции такого этапа, как шунтирование пораженных коронарных артерий, обеспечивает доставку расширенного объема артериальной крови к собственно постстенотическим участкам пораженных артерий при их минимальном сосудистом сопротивлении на нестенозированном участке.

Исследование имеет ряд ограничений. Прежде всего, оно носило одноцентровый характер, что связано с уникальной позицией ФГБУ «НМИЦ им. акад. Е.Н. Мешалкина» в части объемов кардиохирургической помощи. Ни в одном другом, даже ведущем, кардиологическом учреждении не выполняется сопоставимого количества операций Дора с необходимым инструментальным обследованием. Во-вторых, очевиден первоначальный характер полученных данных, которые в последующих исследованиях будут дополнены более детальным анализом в зависимости от локализации аневризмы, детального анализа наличия и характера артериальной гипертензии и сахарного диабета, других биомеханически существенных факторов.

## Заключение

Таким образом, можно утверждать, что операция Дора не только является биомеханически рациональным и обоснованным в своей эффективности вмешательством, улучшающим показатели сократительной функции левого желудочка, но и сопровождается улучшением показателей биомеханики аорты, в частности лучшим ее комплайнсом, механической объемной растяжимостью и за счет этого улучшением систолического растяжения, с последующим диастолическим улучшением коронарного кровоснабжения. Одновременно в результате операции Дора отмечалось и улучшение гемодинамической ситуации в области митрального клапана – левого предсердия.

## Список литературы / References

1. Бокерия Л.А., Семенов В.Ю., Милиевская Е.Б., Скопин А.И., Голубев Н.А., Прянишников В.В. Хирургическое и интервенционное лечение пациентов с ишемической болезнью сердца в Российской Федерации (статистика: 1996-2022 годы). *Грудная и сердечно-сосудистая хирургия*. 2024;66(3):291-301. <https://doi.org/10.24022/0236-2791-2024-66-3-291-301>. EDN KDWONA.  
Bockeria L.A., Semenov V.Yu., Milievskaya E.B., Skopin A.I., Golubev N.A., Pryanishnikov V.V. Surgical and interventional treatment of patients with coronary heart disease in Russian Federation (1996–2022). *Russian Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2024;66(3):291-301 (in Russ.). <https://doi.org/10.24022/0236-2791-2024-66-3-291-301>. EDN KDWONA.
2. Протопопов А.В., Сирота Д.А., Жульков М.О., Агаева Х.А. 65 лет «открытой» хирургии аневризм левого желудочка с использованием искусственного кровообращения: Д. Кули, К. Лиллихай, Б.В. Петровский. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2024;13(2):93-100. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2024-13-2-93-100> - EDN ZLDUDY.  
Protopopov A.V., Sirota D.A., Zhulkov M.O., Agaeva Kh.A. Sixty-five years of surgical treatment of left ventricular aneurysm using cardiopulmonary bypass: D. Cooley, C. Lillehei, Boris V. Petrovsky. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2024;13(2):93-100. (in Russ.) <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2024-13-2-93-100>. EDN ZLDUDY.
3. Ragino Yu.I., Stryukova E.V., Murashov I.S., Polonskaya Ya.V., Volkov A.M., Kashtanova E.V., Kurguzov A.V., Chernjavskii A.M. Association of coagulation factors with the presence of unstable atherosclerotic plaques in coronary arteries. *Russian Journal of Cardiology*. 2018;23(8):21-24. (in Russ.)- <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2018-8-21-24>. EDN XXRFQD.
4. Богунецкий А.А., Александрова Е.А., Усов В.Ю., Шипулин В.М. МРТ сердца с контрастным усилением: роль оценки показателей сократительной функции и доли жизнеспособного миокарда левого желудочка в прогнозировании послеоперационной динамики у больных с ишемической кардиомиопатией. *Медицинская визуализация*. 2014;(4): 99-106. – EDN SNIDPR.  
Bogunetsky A.A., Aleksandrova E.A., Ussov W.Yu., Shipulin V.M. Delayed Enhancement Cardiovascular Magnetic

- Resonance Imaging: the Role of Assessment of Contractile Function and Myocardial Viability of the Left Ventricle in Predicting Postoperative Dynamics in Patients with Ischemic Cardiomyopathy. *Medical Visualization*. 2014;(4):99-106. EDN SNIDPR.
- Карпман В.Л., Любина Б.Г. *Динамика кровообращения у спортсменов*. М.: ФиС, 1982. 135 с.  
Karpman V.L., Lyubina B.G. *Dinamika krovoobrascheniya u sportsmenov*. Moscow: PhiS, 1982. 135 p. (in Russ.)
  - Лищук В.А. *Математическая теория кровообращения*. М.: Медицина, 1991. 256 с.  
Lishchuk V. A. *Mathematical Theory Matemicheskaya teoriya krovoobrascheniya*. Moscow: Meditsina, 1991. 256 p. (in Russ.)
  - Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У. *Механика кровообращения*. М.: Мир. 1983. 624 с.  
Caro C. G., Pedley T. J., Schroter R. C., Seed W. A. *The mechanics of the circulation*. Moscow. Mir Publ. house, 1983. 624 p. (in Russ.)
  - Усов В.Ю., Игнатенко Г.А., Берген Т.А., Шелковникова Т.А., Бриль К.Р., Ховрин В.В., Максимова А.С., Беличенко О.И., Труфанов Г.Е. 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 W.Yu., Ignatenko G.A., Bergen T.A., Shelkovnikova T.A., Bril K.R., Khovrin V.V., Maksimova A.S., Belichenko O.I., Trufanov G.E. 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). *Translyatsionnaya meditsina (Translational Medicine)*. 2021;8(6):43-58. (in Russ.): <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2021-6-43-58>
  - Усов В.Ю., Игнатенко Г.А., Максимова А.С., Бабокин В.Е., Лишманов Ю.Б., Труфанов Г.Е., Чернявский А.М. 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;22(1):41-51. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2023-22-1-41-51>. – EDN SFDXVN.  
Ussov W.Yu., Ignatenko G.A., Maksimova A.S., Babokin V.E., Lishmanov Yu.B., Trufanov G.E., Cherniavsky A.M. 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 hemodynamics and microcirculation*. 2022;21(4):41-51. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2022-21-4-41-51>. EDN SFDXVN.
  - Cerqueira M.D., Harp G.D., Ritchie J.L. Quantitative gated blood pool tomographic assessment of regional ejection fraction: definition of normal limits. *J Am Coll Cardiol*. 1992;20(4):934-941. [https://doi.org/10.1016/0735-1097\(92\)90196-t](https://doi.org/10.1016/0735-1097(92)90196-t)
  - Sveric K.M., Cansiz B., Winkler A., Ulbrich S., Ende G., Heidrich F., Kaliske M., Linke A., Jellinghaus S. Accuracy of Devereaux and Teichholz formulas for left ventricular mass calculation in different geometric patterns: comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *Sci Rep*. 2023;13(1):14089. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41020-9>
  - Усов В.Ю., Игнатенко Г.А., Берген Т.А., Максимова А.С., Лишманов Ю.Б., Труфанов Г.Е., Чернявский А.М. МРТ с контрастным усилением в оценке повреждения стенки восходящей аорты, объема инфарктирования сердечной мышцы и прогноза у постинфарктных пациентов. *Лучевая диагностика и терапия*. 2023;14(s):111-112. EDN LPAIPM.  
Usov V.Yu., Igatenko G.A., Bergen T.A., Maksimova A.S., Lishmanov Yu.B., Trufanov G.E., Cherniavsky A.M. contrast-enhanced mri in analysis of relationship between wall damage of the ascending aorta, volume of myocardial infarction and the functional prognosis in patients after acute myocardial infarction. *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2023; 14(s):111-112. (in Russ.)
  - Сиваченко Т.П., Белоус А.К., Зозуля А.А. *Радиокордиография*. Киев: Здоровье, 1987. 132 с.  
Sivachenko T.P., Belous A.K., Zozulya A.A. *Radiocardiography*. Kiev: Zdorovye Publ., 1987. 132 p. (in Russ.)
  - Зельдович Я.Б. *Высшая математика для начинающих и ее приложения к физике*. М.: Наука. 1963. 623 с.  
Zeldovich Ya. B. *Higher mathematics for beginners and its applications to physics*. Moscow: Nauka, 1963. 623 p. (in Russ.)
  - Усов В.Ю., Архангельский В.А., Федоренко Е.В. Оценка жизнеспособности поврежденного миокарда у кардиохирургических больных: сравнение возможностей магнитно-резонансной и эмиссионной томографии. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2017; 3:124-133. EDN SZNVVB.  
Ussov W.Yu., Arkhangelsky V.A., Fedorenko E.V. Detection of myocardial viability in ischaemic damage in cardiac surgery: comparison of possibilities of magnetic resonance and emission tomography. *Complex problems of cardiovascular diseases*. 2017; 3:124-133. EDN SZNVVB.
  - Шелковникова Т.А., Пушникова Е.Ю., Баев А.Е., Рябов В.В., Усов В.Ю. МР-томографические варианты картины повреждения миокарда и легких у пациентов, перенесших новую коронавирусную инфекцию (COVID-19) - два типичных клинических примера. *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*. 2022; 37(1):135-141. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2022-37-1-135-141>. EDN GJTVMT.  
Shelkovnikova T.A., Pushnikova E.Yu., Baev A.E., Ryabov V.V., Usov V.Yu. 2022. Vol. 37. No. 1. pp. 135-141. MR tomographic variants of the picture of myocardial and lung damage in patients who have suffered a new coronavirus infection (COVID-19); two typical clinical examples. *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2022; 37(1):135-141. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2022-37-1-135-141>. EDN GJTVMT.
  - Шурупова И.В. *Позитронно-эмиссионная томография в оценке жизнеспособности миокарда у пациентов с различными формами коронарной недостаточности и дилатационной кардиомиопатией: специальность 14.01.13 «Лучевая диагностика, лучевая терапия», 14.01.05 «Кардиология»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора медицинских наук*. М., 2011. 48 с. EDN QHQEYR.  
Shurupova I. V. Positron emission tomography in assessing myocardial viability in patients with various forms of coronary insufficiency and dilated cardiomyopathy : specialty 14.01.13 "Radiation diagnostics, radiation therapy", 14.01.05 "Cardiology" : abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Medical Sciences. Moscow, 2011, 48 p. (in Russ.)