

На правах рукописи

БРИЛЬ КРИСТИНА РУСЛАНОВНА

**МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ В ОЦЕНКЕ КРИТЕРИЕВ
ЖЕСТКОСТИ СТЕНКИ АОРТЫ**

3.1.25– лучевая диагностика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Москва, 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Ховрин Валерий Владиславович, доктор медицинских наук

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Синицын Валентин Евгеньевич - доктор медицинских наук, профессор, руководитель отдела лучевой диагностики Медицинского научно-образовательного центра (МНОЦ) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Фокин Владимир Александрович – доктор медицинских наук, профессор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации института медицинского образования ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет).

Защита диссертации состоится « » _____ 2023 г. в « » часов на заседании диссертационного совета (24.1.204.04) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского» по адресу: 119991, Москва, Абрикосовский пер., д. 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского» и на сайте www.med.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
доктор медицинских наук

Годжелло Элина Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Аневризма восходящей аорты (АВА) - распространенная патология, сопряженная с высоким риском развития опасных для жизни осложнений, таких как расслоение или разрыв аорты. АВА заключается в локальном или диффузном расширении аорты, при этом основной ее клинической проблемой является бессимптомность.

Текущие рекомендации по диагностике и ведению пациентов с патологией аорты предлагают использовать максимальный диаметр аорты, как единственный показатель для планового хирургического лечения (Клинические рекомендации, 2018). Однако, развитие грозных осложнений в 80% может происходить при диаметре ниже установленной границы (Reutersberg, B., 2019).

Магнитно-резонансная томография (МРТ) является современным и неинвазивным методом диагностики, позволяющим оценить гемодинамические изменения и физические свойства артериальной стенки с возможностью локального расчета биомеханических показателей жесткости стенки аорты и определением ее критических точек (Catapano F., 2020). Методы вычислительной гидродинамики на основании данных МРТ позволяют прецизионно оценить степень ремоделирования аортальной стенки, изменение скоростных параметров и параметров давления для оценки нагрузки кровотока на стенку аорты с целью предупреждения осложнения в виде dSINE (Чарчян Э.Р., 2010; Keller E., 2016; Shi Y., 2019; Bo Hwa Choi, 2021).

Таким образом, все вышеизложенное свидетельствует об актуальности разработки и внедрения нового МРТ исследования, позволяющего оценить аортальную гемодинамику и биомеханические параметры стенки аорты с целью расширения возможностей диагностики и лечения заболеваний аорты.

Цель исследования

Оценить роль биомеханических параметров жесткости стенки аорты в диагностике и лечении заболеваний аорты по данным магнитно-резонансной томографии.

Задачи исследования

1. Разработать комплексную методику магнитно-резонансной томографии для оценки изменения жесткости стенки аорты.
2. Выявить ключевые значения параметров жесткости стенки аорты у пациентов в контрольных группах и с заболеваниями аорты по данным магнитно-резонансной томографии.
3. Сравнить параметры биомеханических критериев жесткости стенки аорты в оценке лечения у пациентов с аневризмой и расслоением аорты.

Научная новизна исследования

Создан, оптимизирован и апробирован комплексный протокол МРТ аорты и сердца, позволяющий одновременно в течение одного исследования оценить биомеханические, гемодинамические параметры в аорте и функциональные параметры сердца.

Впервые в России определены и интерпретированы основные значимые диагностические МР-критерии у пациентов с заболеваниями аорты, отражающие изменения жесткости ее стенки на до- и послеоперационном этапах. Проведено сравнение МРТ параметров жесткости стенки аорты, в результате получены новые научные данные динамики изменения скоростных потоков у пациентов после хирургического лечения.

Научно обоснована ценность разработанного методологического подхода в диагностике и оценке лечения аневризмы и расслоения аорты.

Практическая значимость работы

Новый комплексный протокол МРТ аорты и сердца с определением основных критериев изменения жесткости стенки аорты может быть рекомендован для обследования на до- и послеоперационном этапах, при динамическом наблюдении в условиях стационара и амбулаторно, а также выступать методом скрининга на ранних этапах для выявления заболеваний аорты и факторов предрасположенности к ним.

Продемонстрирован способ клинического применения, подтвержденный запатентованной персонифицированной технологией магнитно-резонансной томографии аорты у пациентов с заболеваниями аорты в отделениях лучевой диагностики и кардиохирургии.

Выявленные критерии изменения жесткости стенки аорты могут быть использованы в разработке новых высокотехнологичных методов лечения и иметь большое клиническое значение.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Магнитно-резонансная томография аорты – исследование, которое обладает высокой точностью в оценке гемодинамических показателей и определении комплекса биомеханических параметров стенки аорты.
2. Применение в клинической практике разработанного комплексного протокола магнитно-резонансного исследования аорты и сердца обеспечивает безопасное исследование, без лучевой нагрузки и дополнительного контрастирования.
3. Использование магнитно-резонансной томографии для изучения патологии аорты расширяет диагностические границы обследования пациентов с заболеваниями аорты на всех этапах.
4. Разработка и внедрение комплексного метода магнитно-резонансной томографии аорты в послеоперационном периоде существенно дополняют существующий алгоритм диагностики послеоперационных осложнений.

Внедрение в клиническую практику

Результаты исследования внедрены в работу отделения рентгенодиагностики и компьютерной томографии в составе отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики, а также отделений кардиохирургии ФГБНУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского» для диагностики пациентов с различной патологией аорты при первичном обращении и динамическом послеоперационном контроле.

Степень достоверности

Полученные результаты основаны на достаточном количестве выполненных исследований с использованием современных методов статистической обработки. Итоговые данные и результаты исследования соотносятся с целью работы и поставленными задачами. Сформулированные в диссертации выводы и рекомендации аргументированы и логически вытекают из системного анализа результатов выполненных исследований.

Апробация результатов работы

Материалы и основные положения работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XVII Всероссийский конгресс «Артериальная гипертензия 2021: новое в диагностике и лечении» (Москва, март 2021 г.); Всероссийский конкурс ЛИДЕР КАЧЕСТВА в здравоохранении (ФГБУ «Национальный институт качества» Росздравнадзора) с проектом «Принципы безопасности аортографии в условиях снижения лучевой и йодной нагрузки на пациента», 3-е призовое место (Москва, 2021 г.); Кардиология на марше 2021. Ежегодная Всероссийская научно-практическая конференция и 61-я сессия ФГБУ «НМИЦ кардиологии» Минздрава России (Москва, сентябрь 2021 г.); Конгресс российского общества рентгенологов и радиологов (Москва, ноябрь 2021 г.); IX Международный конгресс и школа для врачей «Кардиоторакальная радиология» (Москва, март 2022г.); Открытая конференция молодых ученых ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ» (Москва, апрель 2022 г.); VI научно-практическая конференция с международным участием "Лучевая диагностика Смоленск 2022 - Конкурс молодых ученых" 3-е призовое место (Смоленск, сентябрь 2022); XVII Всероссийский национальный конгресс лучевых диагностов и терапевтов «Радиология - 2023» (Москва, май 2023).

Апробация диссертации состоялась на совместном заседании научной конференции лаборатории отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики, отделения реконструктивно-восстановительной сердечно-сосудистой хирургии ФГБНУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского», протокол № 7/23 от 25.05.2023 г.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 4 в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для публикаций основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата медицинских наук.

Основываясь на результатах исследования, получен патент «Способ определения комплекса биомеханических параметров аорты в диагностике сердечно-сосудистых заболеваний», патент на изобретение №2791391, дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений РФ 07.03.2023, приоритет изобретения от 19.04.2022 г.

Личное участие автора в получении научных результатов исследования

По изучаемой проблеме соискателем проанализирована отечественная и зарубежная литература. Автор самостоятельно проводила МРТ исследования с последующей обработкой параметров, расчетом количественных показателей, созданием электронной базы данных с динамическим наблюдением за пациентами. Автором выполнена статистическая обработка данных с последующим анализом и сравнением с данными литературы.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, выводов, практических рекомендаций, библиографического указателя и приложения. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, иллюстрирована 49 рисунками и 12 таблицами, дополнена 18 приложениями. Библиографический указатель содержит ссылки на работы 41 отечественного и 116 зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы и методы исследования. В период с 2020 г. по 2023 г. проспективно проанализированы данные 185 пациентов с различной патологией ССС. Для решения поставленных задач, все обследуемые пациенты распределены, сформированы 3 основные группы.

1. Контрольная группа – для определения величин физиологических значений параметров аорты и функции сердца. В нее вошли пациенты до 38 лет ($n=22$) и старше 38 лет ($n=21$), среди них 25 мужчин (58%) и 18 женщин (42%), средний возраст - $38,02 \pm 13,22$ лет.
2. Группа с заболеваниями миокарда – для выяснения степени структурных изменений в аорте (35 человек, из них 27 мужчин (77%) и 8 женщин (23%), средний возраст составил $57,31 \pm 11,67$), а именно с клиническими диагнозами - ишемическая болезнь сердца (ИБС) (14 человек, из которых 13 мужчин (93%) и 1 женщина (7%), средний возраст составил $54,78 \pm 13,91$ лет) и гипертрофическая кардиомиопатия (ГКМП) (21 человек, из которых 14 мужчин (67%) и 7 женщин (33%), средний возраст составил $59 \pm 9,92$ лет).

3. Группа с заболеваниями аорты до и после операции – для оценки изменений параметров жесткости стенки аорты в нескольких сегментах и динамики их изменений (107 человек, из них 92 мужчины (86%) и 15 женщин (14%), средний возраст $52,37 \pm 13$), с диагнозами аневризма восходящей аорты (55 человек (48 мужчин (87%) и 7 женщин (13%), средний возраст $79,4 \pm 14,91$, из них до операции 24, после операции 31) и расслоение аорты I-III типа по De Bakey, хроническая стадия (52 пациента, из них 44 мужчины (85%) и 8 женщин (15%), средний возраст которых составил $54,32 \pm 10,41$, до операции 14, после операции 38 человек).

В соответствии с задачами исследования у пациентов с заболеваниями аорты были определены дооперационный и послеоперационный этапы исследования. Пациенты с заболеваниями миокарда и в контрольной группах были обследованы однократно.

Для исключения зависимости вычисляемых параметров и влияния антропометрических критериев важное место в точном подборе исследуемых групп было уделено оценке площади поверхности тела (ППТ), добровольцы в контрольной группе и все пациенты не различались по ППТ, у большинства он составил более 2 м^2 .

Обследуемым пациентам была выполнена магнитно-резонансная томография аорты на томографе GE Signa Voyager (USA) с напряженностью магнитного поля 1,5Т, наличием программного обеспечения и возможностью ЭКГ-синхронизации.

Комплексное исследование сердечно-сосудистой системы было разделено и выполнялось в два этапа (Рисунок 1).

Целью выполнения первого этапа был обязательный анализ функции камер сердца по стандартному кардиологическому протоколу для общей оценки состояния ССС и возможности дальнейших построений анатомических проекций аорты.

Второй этап проводился согласно запатентованному, комбинированному протоколу МР-исследования аорты для оценки биомеханических параметров аорты, который заключался в построении аксиальных и сагиттальных изображений аорты на уровнях:

- синотубулярные гребни

- восходящая и нисходящая аорта на уровне бифуркации ствола легочной артерии

- нисходящая аорта на уровне чревного ствола в последовательностях Gradient echo (градиентного эхо) и Phase contrast magnetic resonance imaging (фазово-контрастных изображений) (Рисунок 2).

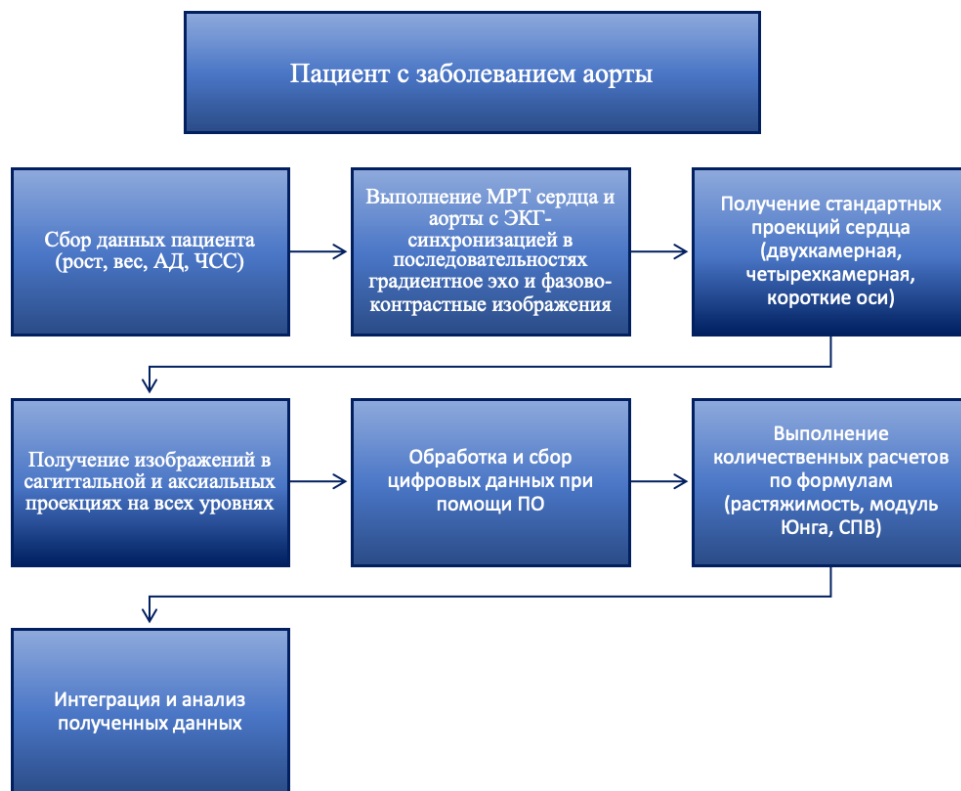


Рисунок 1 - Алгоритм персонализированного протокола МРТ аорты для пациентов с заболеваниями аорты

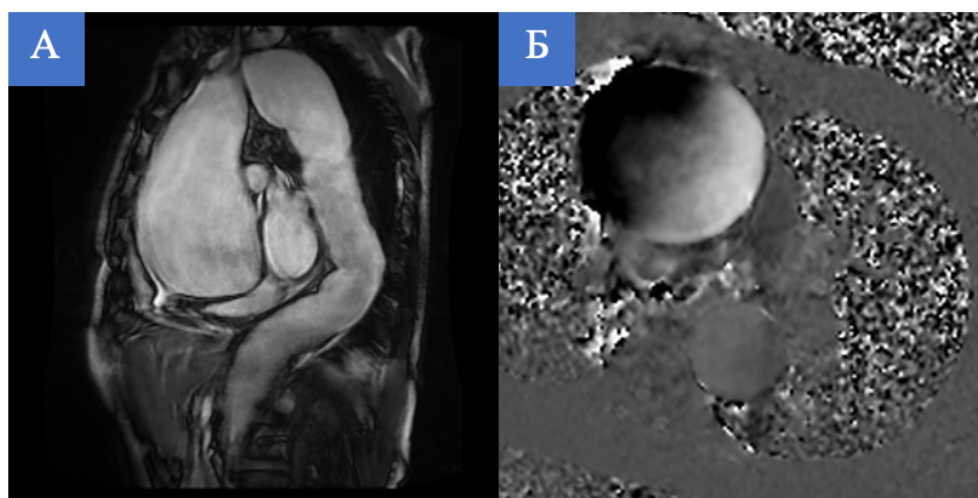


Рисунок 2 –Магнитно-резонансная томография аорты. **А** - последовательность градиентное эхо, сагиттальное изображение аорты. **Б** – фазово-контрастное изображение, аксиальное изображение восходящей и нисходящей аорты

Для достижения целей работы полученные данные МР-исследования обрабатывались в специальной версии программного обеспечения (ПО) «CVI42 (Version 5.3 Ext.4, Circle Cardiovascular Imaging Inc., Canada)». Для расчета на аксиальных изображениях последовательностей градиентное эхо и фазово-контрастные изображения проводилось ручное контурирование стенки аорты на всех вышеперечисленных уровнях во все фазы сердечного цикла. Изображения градиентное эхо использовались для точного обвода контура аорты и получения данных о ее площади, периметре и диаметре, а фазово-контрастные изображения применялись для количественной оценки параметров кровотока.

После завершения работы с ПО проводилось структурирование полученных данных, создание таблиц и графиков для дальнейшей возможности интеграции информации для протокола. Разработанный протокол включал в себя как расчётные, так и цифровые данные. Из расчётных параметров были выделены:

растяжимость стенки аорты:

$$R = \left(\frac{A_{\text{sist}}^i - A_{\text{diast}}^i}{A_{\text{diast}}^i \times АД_{\text{puls}}} \right) \times 100\% \left[\frac{\%}{\text{мм.рт.ст.}} \right], \quad (1)$$

A_{sist}^i - максимальная площадь поперечного сечения аорты в систолу;
 A_{diast}^i - минимальная площадь поперечного сечения аорты в диастолу;
 $АД_{\text{puls}}$ – артериальное пульсовое давление

модуль Юнга:

$$E = \frac{(d_{\text{diast}}^2 \cdot \pi \cdot АД_{\text{puls}}) \cdot 133.3}{h \cdot \Delta d_{\text{puls}}} \text{ [Па]}, \quad (2)$$

E – модуль Юнга;
 d_{diast} - поперечный диаметр аорты в диастолу;
 Δd_{puls} - прирост диаметра аорты в систолу;
 h - толщина стенки аорты;
 $АД_{\text{puls}}$ - пульсовое артериальное давление;
 133,3 – коэффициент перевода мм.рт.ст. в Па

скорость пульсовой волны:

$$PWS = \frac{\Delta x}{\Delta t} \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right], \quad (3)$$

Δx - расстояние между контрольными точками, расположенными в центре сечения в восходя-

¹ Формула расчета растяжимости стенки аорты (Скрипник, А. Ю., 2019)

² Формула расчета модуля Юнга (Усов В.Ю., 2021)

³ Формула расчета скорости пульсовой волны (Hrabak-Paar, M., 2020)

шей и нисходящей аорте на уровне бифуркации легочного ствола;
 Δt - временная задержка прихода пульсовой волны между контрольными точками, расположенными в центре сечения в восходящей и нисходящей аорте на уровне бифуркации легочного ствола

Расчёт скорости пульсовой волны (СПВ) выполнялся после выделения контура стенки аорты в восходящем и нисходящем ее сегментах на уровне бифуркации легочного ствола. Для каждого наблюдения проводилось построение графика зависимости скорости от времени с определением показателя Δt , как задержки прихода пульсовой волны между контрольными точками в восходящей и нисходящей аорте. Показатель Δx рассчитывался по сагиттальному изображению аорты, как расстояние между контрольными точками, расположенными в восходящей и нисходящей аорте на уровне бифуркации легочного ствола (Рисунок 3).

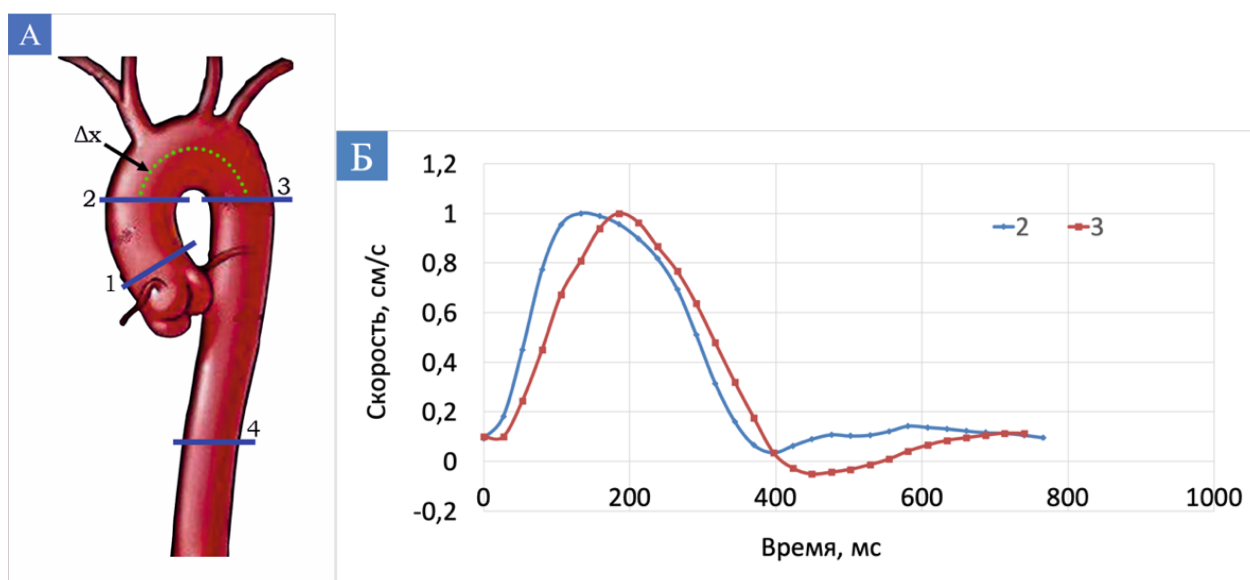


Рисунок 3 – Методика измерения скорости пульсовой волны.

А - схематическое сагиттальное изображение аорты с уровнями исследования: 1 –синотубулярные гребни; 2 - восходящая аорта и 3 - нисходящая аорта на уровне бифуркации ствола легочной артерии; 4 - нисходящая аорта на уровне чревного ствола. Сплошной стрелкой указано определение параметра Δx ; **Б** – график зависимости скорости от времени для определения показателя Δt : 2 - кривая средней скорости в восходящей аорте, 3 - кривая средней скорости в нисходящей аорте, используемые для определения прихода переднего фронта пульсовой волны

Автоматически с помощью ПО получены следующие параметры: максимальная скорость, градиент давления и объем потока крови. Общая продолжительность МР-исследования аорты составила 20-25 минут. Все динамические МР

исследования аорты проанализированы по всем установленным в задачах параметрам, выполнен анализ динамических до- и послеоперационных изменений.

Статистическая обработка результатов выполнялась с помощью программы Statistica 13.0 (Tibco, Inc., 2018, 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 Краскелла–Уоллиса в связи с тем, что большинство параметров имеет распределение, отличающееся от нормального. Различия для показателей считали статистически значимыми при значении коэффициента достоверности $p < 0,05$. Бивариантный непараметрический анализ данных проводился с помощью статистической программы GMP-5 (США).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значения жесткости стенки аорты в контрольной группе по данным магнитно-резонансной томографии аорты

При сравнении полученных результатов в подгруппах здоровых добровольцев до и после 38 лет были выявлены статистически значимые отличия ($p < 0,001$) максимальной площади восходящей аорты (654,98 [555,52;693,67] см², против 761,62 [646,45;838,66] см²).

Статистически значимые значения максимальной скорости и градиента давления были определены в сегменте нисходящей аорты на уровне чревного ствола ($p < 0,001$) (100,51 [93,19;118,13] см/с до 38 лет и 61,95 [56,66;76,89] см/с после 38 лет), до 38 лет (4,16 [3,48;5,58] мм.рт.ст.) и после 38 лет (1,57 [1,37;2,36] мм.рт.ст.). Растяжимость и модуль Юнга, как критерии жесткости стенки аорты отличались внутри контрольной группы до 38 лет и после 38 лет (1,03[0,75;1,15]%/мм.рт.ст. и 0,20[0,16;0,27] Мпа, против 0,60 [0,45;0,81] %/мм.рт.ст и 0,37[0,30;0,51] Мпа) ($p < 0,001$). Определялась тенденция снижения растяжимости и увеличения модуля Юнга с возрастом. Так же, было отмечено снижение растяжимости в нисходящей аорте до 38 лет (0,88 [0,7;1,07] %/мм.рт.ст.) и после 38 лет (0,47 [0,29;0,79] %/мм.рт.ст.) ($p < 0,006$).

Статистически значимые отличия ($p < 0,001$) выявлены в значениях критерия СПВ в контрольной группе до 38 лет и старше 38 лет - 4,05 [3,72;5,2] см/с, против 4,70 [4,5;6,2] см/с, соответственно. Увеличение параметра СПВ в группе наблюдаемых старше 38 лет подтверждает взаимосвязь между увеличением аортальной жесткости и традиционными факторами риска сердечно-сосудистых заболеваний. При оценке отрицательного объема потока в восходящей аорте ($p < 0,001$) в группе до 38 лет и после 38 лет (1,34 [0,09;1,94] мл, против 2,64 [0;4,63] мл), была выявлена тенденция к его повышению с возрастом.

Сравнение параметров жесткости стенки аорты при заболеваниях миокарда по данным МРТ аорты

Статистически значимые различия максимальной площади сечения восходящей аорты определялась между группами с ишемической болезнью сердца (ИБС) и гипертрофической кардиомиопатией (ГКМП) - 804,32[712,36;1035,95] см², против 902,07 [781,06;1082,59] см² при $p = 0,001$ с преобладанием у пациентов с гипертрофической кардиомиопатией. При этом сравнение максимальной скорости на уровне чревного ствола, также показало значимые различия ($p < 0,001$) между группами с заболеваниями миокарда, но в группе с ИБС выявлена скорость 68,16 [64,17;74,58] см/с, а у пациентов с ГКМП она была снижена до 54,79 [51,08;66,56] см/с. Значение же градиента давления в восходящей аорте было снижено в группе с ИБС (2,31 [1,68; 3,06] мм.рт.ст.), по сравнению с группой ГКМП (2,69 [1,64; 3,78] мм.рт.ст.). Дополнительно, в обследуемых группах пациентов наблюдались значимые различия ($p < 0,001$) параметров глобальной систолической функции левого желудочка, при этом в группе с ИБС достоверное снижение фракции выброса (ФВ) $35,50 \pm 3,95\%$, в сравнении с данными ФВ группе с ГКМП – $65,28 \pm 17,44\%$

Растяжимость и показатель жесткости представленный модулем Юнга значимо отличались ($p < 0,001$) между собой при сравнении результатов в группах пациентов с ИБС 0,33 [0,18;0,68] %/мм.рт.ст и 0,77 [0,41;1,36] Мпа и с ГКМП - 0,49 [0,43;0,66] %/мм.рт.ст и 0,50 [0,37;0,64] Мпа, соответственно, согласно полученным данным подтверждая снижение растяжимости и увеличение жесткости (модуля Юнга) среди пациентов с ИБС. Этот факт объясняется вероятным сопровождением атеросклероза, повреждающего в том числе стенку у

данной группы пациентов. Статистически значимые отличия ($p < 0,001$) выявлены в значениях распространения СПВ в группе с ишемической болезнью сердца (6,00 [5,08;7,38] см/с) и у пациентов с концентрической гипертрофией миокарда 7,90 [5,2;9,2] см/с, составляя увеличение СПВ в сравнении с данными контрольной группы на 30% и 49%.

Оценка изменения жесткости стенки аорты при аневризме и расслоении аорты по данным магнитно-резонансной томографии

Максимальная площадь аорты в исследуемых группах с аневризмой и расслоением до операции, имела максимальные и достоверно высокие значения (1713,9 [1299,47; 2020,5045] см² и 1059,7 [757,19; 1361,07] см²) ($p < 0,001$).

При анализе параметров систолической функции левого желудочка в группах пациентов с аневризмой и расслоением аорты не было выявлено статистически значимых изменений: 44,2 [36,35; 62,31] мл/м² 49,3 [39,14; 57,76] мл/м² для ударного объема (УО) ($p > 0,05$); 72,9 [59,77; 112,28] мл/м² и 79,4 [72,63; 91,62] мл/м² для конечно-диастолического объема (КДО) левого желудочка ($p > 0,09$); 55,4 [49,51;60,64] мл/м² и 56,9 [53,14;62,44] для ФВ ($p > 0,05$). Несмотря на отсутствие разницы в параметрах глобальной систолической функции левого желудочка, отчетливо прослеживались изменения в скоростных параметрах потока. При оценке максимальной скорости в нисходящей аорте на уровне чревного ствола, наблюдалось ее снижение, по сравнению с контрольной группой, как в группе с аневризмой аорты 61,3 [41,91; 86,28] см/с, так и при расслоении аорты 63,0 [54,85; 69,82] см/с при $p < 0,013$.

В выборке пациентов с аневризмой восходящей аорты также отмечено разделение на несколько подгрупп значений СПВ, основная из которых состояла со значительно повышенными значениями до 13 см/с, а их средняя составляющая была в пределах 7,7 см/с. В подтверждение к параллельному формированию изменений жесткости стенки аорты демонстрируется почти 3-х кратное (в сравнении с контрольной группой) увеличение модуля Юнга - 0,7 [0,41; 1,304] мПа, что также может быть сопоставимо с результатами жесткости аорты, полученной у пациентов с ИБС - 0,77 [0,41;1,36] Мпа. Таким образом, на основании сопоставления полученных с помощью данных МРТ аорты, подтверждается прямая зависимость параметров жёсткости сосудистой стенки и

распространения скорости пульсовой волны только у пациентов с аневризмой аорты и ИБС.

Значение модуля Юнга в группе с расслоением аорты составило 0,2 [0,16; 0,56] мПа и значимо не отличалось от контрольной группы - 0,20 [0,16;0,27] Мпа до 38 лет и 0,37 [0,30;0,51] Мпа старше 38 лет соответственно. Фиксация и измерение необходимых для расчета параметров жесткости аорты при расслоении проводились в истинном канале аорты, где вследствие патофизиологического процесса уже отсутствовал основной каркас стенки в виде меди и адвентиции, возможно, это и повлияло на полученный результат.

Распределение параметра СПВ в группе с расслоением аорты было практически правильное и по данным статистического анализа, основную группу составили пациенты со значениями с высокой до 20 см/с СПВ, а средние значения составили 9,7 [6,8; 12,9] см/с. В результате при сравнении с контрольной группой значения показателей СПВ при всех оцениваемых заболеваниях аорты были расценены как значительно повышенные и превышали контрольные нормальные на 46%.

При анализе градиента давления, измерения которого проводились в нисходящей аорте на уровне чревного ствола, было выявлено его значительное снижение ($p=0,001$), как в группе с аневризмой восходящей аорты, так и с расслоением аорты (1,2 [0,705; 2,975] мм.рт.ст. и 1,6 [1,202; 1,95] мм.рт.ст., соответственно), на 48% от контрольного нормального параметра при сравнении с контрольной группой до 38 лет (4,16 [3,48;5,58] мм.рт.ст.).

При оценке растяжимости восходящей аорты в группах пациентов с аневризмой восходящей аорты и расслоением аорты было выявлено закономерное снижение данного параметра 0,2 [0,15; 0,48] %/мм.рт.ст. и 0,5 [0,42; 1,024] %/мм.рт.ст. соответственно, при $p=0,018$).

Анализ параметров жесткости стенки аорты по данным МРТ при аневризме и расслоении аорты до и после операции

По результатам хирургического лечения отмечена компенсация параметров глобальной насосной функции левого желудочка (ударного и конечно-диастолического объема) без снижения фракции изгнания. В группе пациентов с аневризмой до и после операции параметры ударного объема выявлены в

значениях: 44,2 [36,35; 62,31] мл/м², против 37,1 [32,74; 46,61] мл/м². В группе с расслоением до операции и после операции этот же параметр составил 49,3 [39,14;57,76] мл/м², против 39,5 [33,35; 44,59] мл/м². Снижение индекса КДО левого желудочка до и после операции отмечено в группе расслоение до и после операции 79,4 [72,63; 91,62] мл/м², против 63,6 [59,08; 81,44] мл/м² (p=0,04), тогда как в группе с аневризмой восходящей аорты изменения были статистически не значимы - 72,9 [59,77; 112,28] мл/м², против 72,3 [64,97; 88,5] мл/м², соответственно.

Подтверждением положительного результата хирургического лечения, уменьшение значения максимальной площади в группах оперированных пациентов в сравнении с дооперационными данными представлено со статистически значимыми различиями. Среди значений группы с АВА до и после операции: 1713,9[1299,47; 2020,5045] см², против 805,3 [745,98; 954,63] см², и группы с расслоением аорты до и после операции: 1059,7 [757,19;1361,07] см², против 747,7[668,13; 868,98] см².

Значения максимальной скорости потока, после выполнения хирургического лечения, в группе с аневризмой значимо не изменились, по сравнению с показателями до операции 57,1[51,92; 79,05] см/с против 61,3 [41,91;86,28] см/с. В то время, как в группе у пациентов с расслоением аорты после операции было выявлено увеличение скорости на 20%, по сравнению с дооперационными показателями (78,6 [66,24;130,78] см/с, против 63,0 [54,85;69,82] см/с, при p=0,013).

Как уже было отмечено, до операции в группе пациентов с патологией аорты при оценке СПВ отмечены высокие показатели. В значениях в группе больных с аневризмой ВА после оперативного вмешательства отмечается продолжающаяся тенденция увеличения СПВ, объясняемая наличием дополнительного плотного каркаса протеза аорты. Анализ СПВ, проведенный у пациентов после хирургического лечения аневризмы ВА, показал равномерное распределение значений на несколько подгрупп, при этом после операции среднее значение СПВ составило 8,7 [6,5; 10,65] см/с, что больше на 12% от исходного значения до операции.

У пациентов с расслоением аорты после оперативного лечения отмечился рост скорости пульсовой волны 12,7 [7,7; 15,7] см/с, превышая дооперационные показатели СПВ, рассчитанные по данным магнитно-резонансной томографии, на 24% и увеличение модуля Юнга до 0,8 мПа.

Бивариантный анализ скорости пульсовой волны и модуля Юнга в группе пациентов с диагнозом аневризма ВА после проведенной операции реконструкции аорты показал равномерное распределение параметра СПВ. Основная подгруппа значений была зафиксирована в пределах 10 см/с при этом максимальное количество больных со значением показателя модуля Юнга в пределах 1 мПа находилось в пропорциональном зависимости (Рисунок 4).

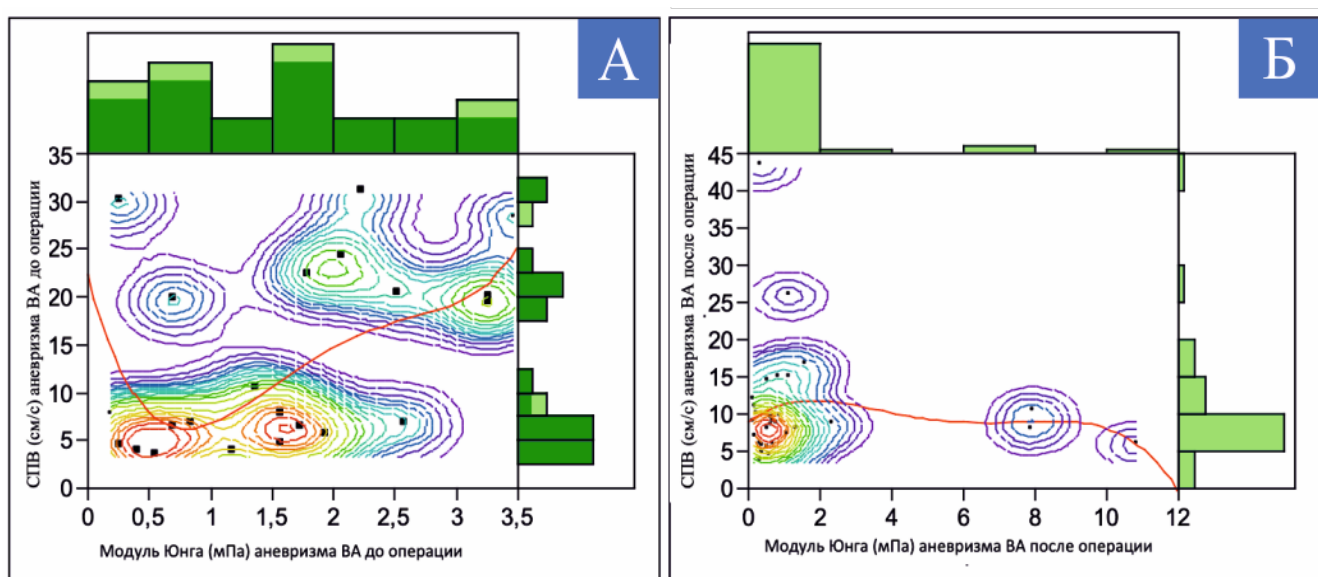


Рисунок 4 - Непараметрический бивариантный анализ параметров скорости пульсовой волны и модуля Юнга в группе аневризма восходящей аорты. **А**- до операции (n=24), **Б** -после операции (n=31)

В установленном сегменте нисходящей аорты на уровне чревного ствола производился сбор МРТ данных для определения градиента давления у пациентов с аневризмой и расслоением аорты. В группе АВА до и после операции градиент давления значимо не отличался 1,2 [0,705; 2,975] мм.рт.ст., против 1,3 [1,07;2,5] мм.рт.ст., в то время как в группе пациентов с расслоением аорты отмечалось его значительное увеличение, после операции - 1,6 [1,202; 1,95] мм.рт.ст., против 2,1 [1,76;6,84] мм.рт.ст. соответственно (Рисунок 5).

Анализ корреляционной связи между параметрами ФВ и градиентом давления у пациентов в группе с РА после операции показал, что при ФВ <56,72 %

регистрируемой после операции, градиент давления увеличивался практически в два раза (среднее значение 6,38 мм.рт.ст.), в то время как при ФВ >56,72 % градиент давления составлял 2,85 мм.рт.ст.

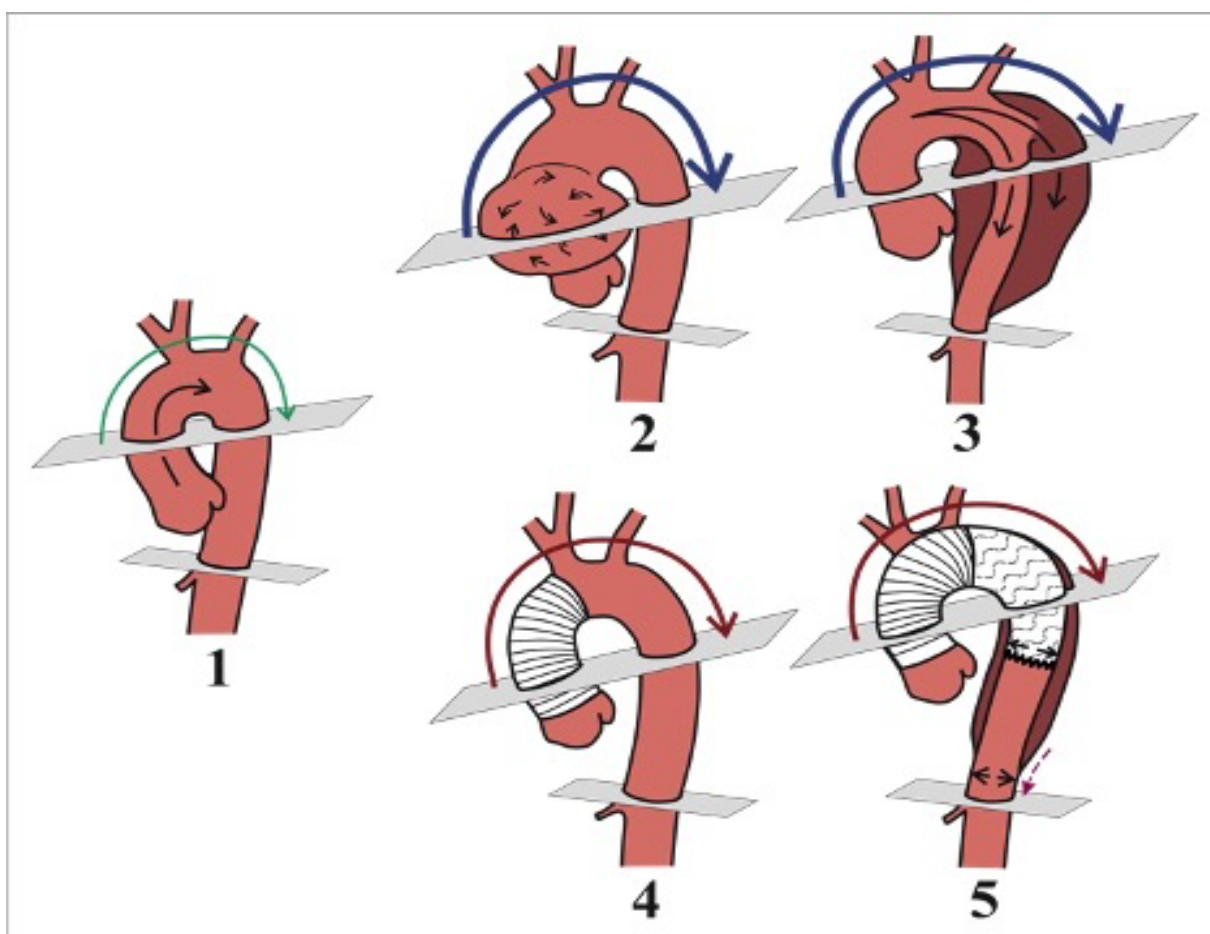


Рисунок 5 - Схематическое изображение: **1** - нормальная аорта, **2** – аневризма восходящей аорты, **3** – расслоение аорты I типа по DeBakey, **4** – протезирование восходящего отдела аорты, **5** – гибридная операция по методике Frozen Elephant Trunk. Сплошными линиями указаны уровни исследования, пунктирной стрелкой указано увеличение максимальной скорости кровотока на уровне чревного ствола; горизонтальными стрелками указано изменение градиента давления на уровне дистального края стента и уровне чревного ствола; дугообразными разноцветными стрелками указана изменяющаяся скорость пульсовой волны в контрольной группе и в группе с патологией аорты

После операции в группе с расслоением аорты приведены данные пациентов, которым была выполнена гибридная операция по методике «замороженный хобот слона» (Frozen Elephant Trunk). Уровень исследования (нисходящая аорта, чревной ствол) располагался в непосредственной близости с дистальным краем стента. Увеличение параметров максимальной скорости и градиента давления у данной

категории пациентов, возможно, связано с «резким перепадом», возникающим при переходе потока крови из стента аорты в нативный сегмент нисходящей аорты.

С помощью ROC- анализа основных МР-критериев продемонстрировано, что «градиент давления на чревном стволе» и «максимальная скорость на уровне чревного ствола» имеют хорошее качество предсказания положительного результата сосудистой реконструкции при хирургическом лечения расслоения аорты при статистически значимой ($p=0,001$ и $p=0,006$) AUC 0,722 и 0,701, соответственно (Рисунок 6). Низкий показатель чувствительности и специфичности определяет ограниченность протяжения сканируемой области, связанной с невозможностью за один сердечный цикл фиксации других уровней аорты, более протяженных, что связано с техническими особенностями проведения МРТ.

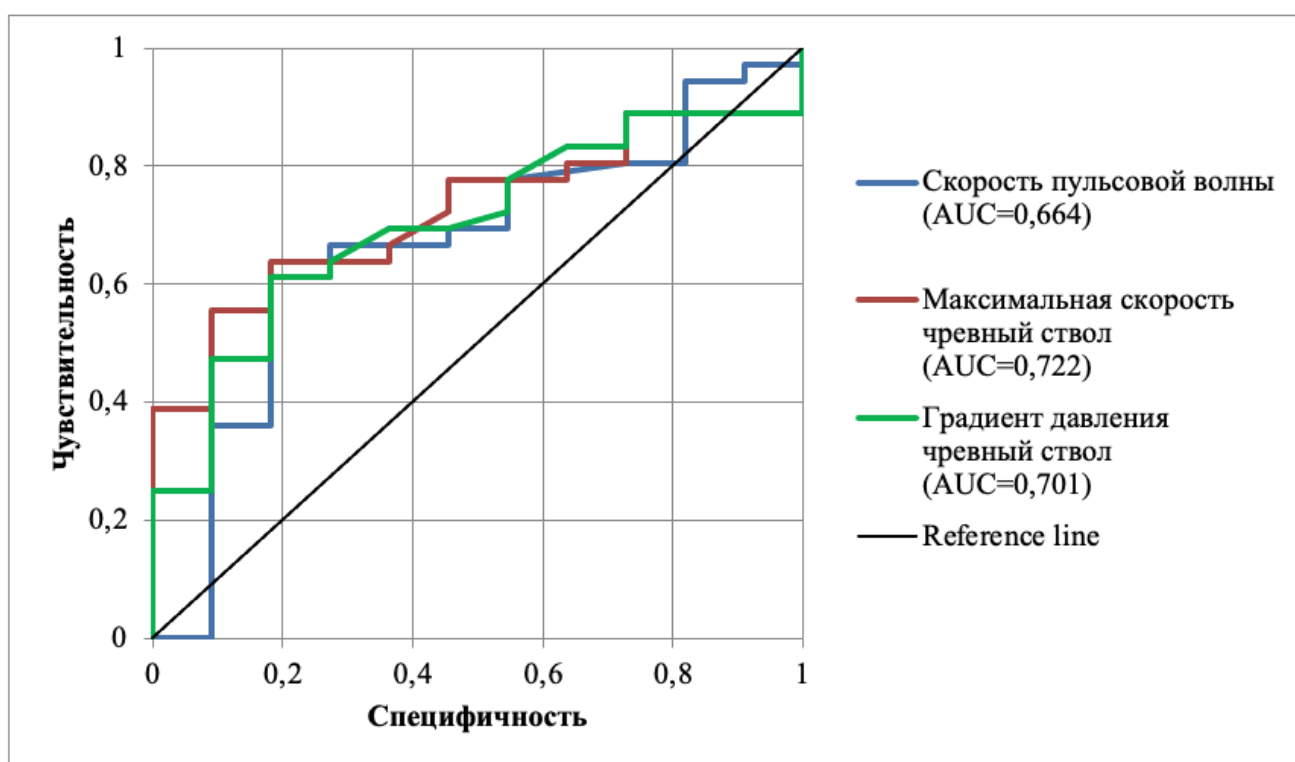


Рисунок 6 - ROC- анализ основных МР-критериев изменения жесткости стенки при расслоении аорты

Рассматривая динамику изменения параметров растяжимости, отмечено его снижение до операции в группе пациентов с аневризмой восходящей аорты 0,2 [0,15;048] %/мм.рт.ст. Однако, после выполнения хирургического лечения он значимо не изменился и составил 0,3 [0,24; 0,59] %/мм.рт.ст. ($p>0,05$).

Аналогичные данные получены и в отношении критерия модуля Юнга. В группе пациентов с аневризмой восходящей аорты он был увеличен до операции 0,7 [0,41;1,304] мПа и не изменился после операции 0,6 [0,38; 0,68] мПа ($p>0,05$).

В группе с расслоением аорты критерий растяжимости стенки аорты показал низкие показатели как на дооперационном этапе, так и после выполнения хирургического лечения - 0,5 [0,42; 1,024] %/мм.рт.ст., против 0,4 [0,20; 0,47]%/мм.рт.ст. ($p=0,01$). Модуль Юнга в группе обследуемых пациентов с диагнозом расслоение аорты не был значимо увеличен до операции, однако, показал высокие показатели после операции: 0,2 [0,16;0,56] мПа, против 0,5 [0,39; 0,83] мПа ($p<0,05$).

Выявленное взаимоотношение положительного и отрицательного объемов потока и его направленности на уровне синотубулярных гребней при сравнении группы пациентов с аневризмой восходящей аорты на этапах до и после операции продемонстрировало количественное изменение, определяющее мнение о положительном результате хирургического лечения. Положительный объем потока, количественно определенный в группе до операции, был выше, чем после операции 144,1[98,4; 172,84] мл против 85,6 [74,66; 96,86] мл ($p\leq 0,01$). Значимые изменения отрицательного объема потока крови (не истинной регургитации) с тенденцией к уменьшению, после хирургического лечения, были отмечены в группе с аневризмой восходящей аорты до и после операции: 25,9 [12,73; 76,53] мл, против 12,7 [8,65; 14,36] мл ($p\leq 0,01$).

Для более детальной оценки направленности потока, ретроспективно, с помощью применения цветового картирования, на систолическом пике были проанализированы МР-исследования добровольцев из контрольной группы ($n=10$), пациентов с АВА до операции ($n=10$) и пациентов с аневризмой восходящей аорты после протезирования восходящего отдела аорты ($n=10$). По результатам ретроспективного анализа было выявлено равномерное распределение положительного объема потока, занимающее центральное положение в ВА для контрольной группы 59,34 [81,71; 110,51] мл для добровольцев до 38 лет и 89,97 [76,96;104,2] мл для добровольцев после 38 лет, ($p<0,001$). В то время, как у пациентов, с аневризмой, до выполнения хирургического лечения положительный объем потока был увеличен 144,1

[98,4; 172,84] мл, имел неравномерное распространение и занимал эксцентричное положение, преимущественно в левую заднюю и левую переднюю стенку аорты (Рисунок 7). После протезирования восходящего отдела аорты объем потока значительно уменьшался 85,6 [74,66; 96,86] мл ($p < 0,001$), его распространение и направленность нормализовалась, приближаясь к значениям контрольной группы.

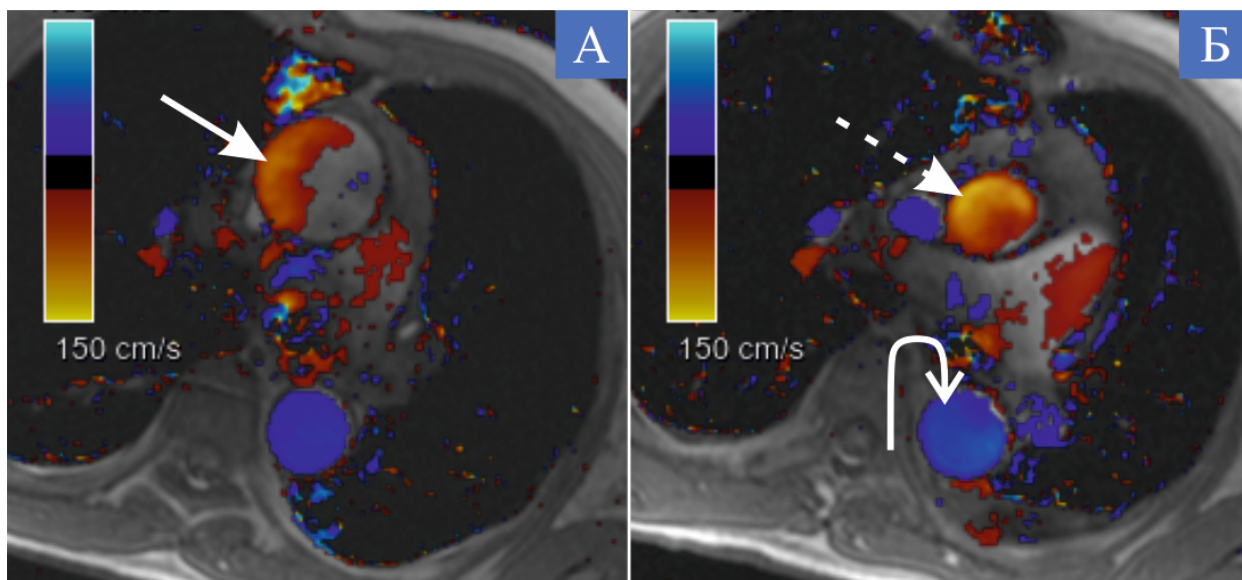


Рисунок 7 – Магнитно-резонансная томография аорты, цветное картирование, аксиальный срез. **А** – аневризма восходящей аорты до протезирования. Сплошной стрелкой указана локальная направленность кровотока в левый сектор аорты. **Б** – восходящая аорта после протезирования, пунктирной стрелкой указано равномерное распределение потока в протезированной восходящей аорте. Развернутой стрелкой указан равномерный «отрицательный» поток в нисходящей аорте

ВЫВОДЫ

1. Биомеханические параметры жесткости стенки аорты, представленные данными магнитно-резонансной томографии, расширяют возможности предоперационной диагностики и анализа результатов лечения аневризмы и расслоения аорты.
2. Комплексная методика магнитно-резонансной томографии аорты объединяет в одном исследовании необходимые данные систолической функции левого желудочка и точное измерение необходимых биомеханических пара-

метров, максимально точно отражающих процессы изменения эластических свойств стенки аорты, улучшающих диагностику заболеваний аорты.

3. Анализ данных магнитно-резонансной томографии определил критерии патологических изменений, достоверно ($p < 0,01$) возникающих в стенке аорты при отметке площади аорты более 761 см^2 , растяжимости ниже $0,6 \text{ \%}/\text{мм.рт.ст.}$, изменении модуля Юнга выше $0,3 \text{ МПа}$, увеличении скорости пульсовой волны выше $4,7 \text{ см/с}$, изменения градиента давления от уровня $2,3 \text{ мм.рт.ст.}$ и максимальной скорости 62 см/с . При этом выявлено повышение на 46% значений скорости пульсовой волны, почти 3-х кратное повышение жесткости аорты и снижение на 48% значений градиента давления в нисходящей аорте при аневризме и расслоении.
4. По данным ROC-анализа предсказания положительного результата сосудистой реконструкции при хирургическом лечении расслоения аорты ($p = 0,001$ и $p = 0,006$) AUC $0,722$ и $0,701$ для градиента давления и максимальной скорости в нисходящей аорте, при чувствительности и специфичности параметров скорости пульсовой волны, градиента давления и скорости (60% , 61% и 64% , соответственно). Данные увеличения градиента давления в два раза у пациентов с расслоением аорты, после гибридных операций при фракции выброса $< 56,72\%$, пропорциональная зависимость скорости пульсовой волны и высоких значений модуля Юнга $0,5-1 \text{ МПа}$, определяют направление дальнейшего изучения адаптации аорты после операции и улучшения результатов ее хирургического лечения по данным магнитно-резонансной томографии.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Протокол комплексного обследования пациентов с аневризмой и/или расслоением аорты рекомендовано дополнить проведением магнитно-резонансной томографии аорты и сердца с определением биомеханических показателей сосудистой стенки.

2. Для оценки восстановления гемодинамики и сравнения полученных данных на до- и послеоперационном этапах целесообразно анализировать скорость распространения пульсовой волны в дуге аорты, максимальную скорость кровотока в «критических точках», градиент давления на уровне дистального края стента, положительные и отрицательные объемы в восходящей аорте.
3. Учитывая полное отсутствие лучевой нагрузки и безопасность, разработанная методика может быть внедрена в повседневную клиническую практику в ведущих специализированных центрах, как вариант скрининга «скрытых» заболеваний аорты и выявления предрасположенности к ним.
4. Разработанные МР-критерии изменения жесткости стенки аорты в перспективе могут быть использованы в разработке высокотехнологичного поколения протезов аорты, максимально приближенных к нативным биомеханическим показателям.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Малахова М.В., Прохорова Е.А., Куличкин А.С., **Бриль К.Р.**, Ван Е.Ю., Дзеранова А.Н., Галян Т.Н., Ховрин В.В., Чарчян Э.Р. Диагностика отрыва клапаносодержащего кондуита восходящего отдела аорты и его успешное хирургическое лечение. Вестник рентгенологии и радиологии. 2021; 102(6): 383–9. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2021-102-6-383-389>
2. 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. DOI: 10.18705/2311-4495-2021-6-43-58.

3. **Бриль К.Р.**, Ховрин В.В. Магнитно-резонансная томография в оценке критериев жёсткости стенки аорты. Digital Diagnostics. 2022;3;1S:10-11.
4. **Бриль К.Р.**, Пронкин А.А., Галян Т.Н., Малахова М.В., Усов В.Ю., Ховрин В.В. 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>
5. **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):115-123. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-2-115-123>
6. Патент «Способ определения комплекса биомеханических параметров аорты в диагностике сердечно-сосудистых заболеваний», патент на изобретение №2791391, дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений РФ 07.03.2023, приоритет изобретения от 19.04.2022 г.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АВА - аневризма восходящей аорты
ГКМП - гипертрофическая кардиомиопатия
ИБС - ишемическая болезнь сердца
КДО - конечно-диастолический объем
МРТ - магнитно-резонансная томография
РА - расслоение аорты
СПВ - скорость пульсовой волны
УО - ударный объем
ФВ - фракция выброса