

На правах рукописи

Марченко Дарья Сергеевна

**«Оценка геометрии и особенности гемодинамики
при врожденной обструкции выводного отдела левого желудочка
с помощью магнитно-резонансной томографии»**

3.1.15. Сердечно-сосудистая хирургия

3.1.25. Лучевая диагностика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Москва – 2026

Диссертационная работа выполнена в ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева» Минздрава России

Научные руководители:

Д.М.Н.

Д.М.Н., доцент

Ковалев Дмитрий Викторович

Пурсанова Диана Манолисовна

Официальные оппоненты:

Абрамян Михаил Арамович – доктор медицинских наук, заведующий отделением экстренной кардиохирургии и интервенционной кардиологии ГБУЗ «Морозовская детская городская клиническая больница Департамента здравоохранения города Москвы»;

Ховрин Валерий Владиславович - доктор медицинских наук, главный научный сотрудник отделения рентгенодиагностики и компьютерной томографии ФГБНУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Минздрава России.

Защита диссертации состоится «18» декабря 2026 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 21.1.038.01 при ФГБУ «НМИЦ им. А.Н. Бакулева» Минздрава России по адресу: 121552, г. Москва, Рублевское шоссе, д. 135, конференц-зал №2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева» Минздрава России и на сайтах www.bakulev.ru и Высшей Аттестационной Комиссии (ВАК) <https://vak.gisnauka.ru>.

Автореферат разослан «16» ноября 2026 года

Ученый секретарь

диссертационного совета 21.01.038.01

доктор медицинских наук

Д.Ш. Газизова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования врожденной обструкции выводного отдела левого желудочка (ВОЛЖ) обусловлена высокой распространенностью данной патологии (0,6–6% среди всех врожденных пороков сердца) и значительной частотой рестеноза после коррекции (до 16–31%), что требует постоянного совершенствования диагностических и прогностических подходов (Шаталов К.В., Гамисония А.М., 2018). Традиционные методы диагностической визуализации (эхокардиография (ЭхоКг), компьютерная томография) имеют определенные ограничения в оценке геометрии и гемодинамики ВОЛЖ (Sigfusson G., 1997, Shar J.A., 2020). В связи с этим актуальным является внедрение современных неинвазивных технологий, способных комплексно оценить как анатомические, так и функциональные особенности сердца. Одним из таких методов является магнитно-резонансная томография (МРТ), особенно с использованием технологии 4D-flow, которая позволяет за одно исследование детально оценить геометрию, кровотоки и биомеханику ВОЛЖ (Markl M., 2012; Юрпольская Л.А., 2024). Однако отсутствие в России стандартизированного алгоритма такой оценки осложняет прогнозирование и профилактику повторных субаортальных обструкций. В мировой литературе исследований, комплексно оценивающих МР-параметры при врожденной обструкции ВОЛЖ, крайне мало. Стандартизация и внедрение протокола МР-исследования в клиническую практику позволит улучшить диагностическую точность и разработать персонализированные подходы к хирургической коррекции, а анализ биомеханических параметров (таких как wall shear stress (WSS) – напряжение сдвига сосудистой стенки) — прогнозировать отдалённые результаты у пациентов высокого риска.

Разработка и внедрение унифицированного алгоритма оценки геометрии и гемодинамики ВОЛЖ с помощью МРТ является актуальной задачей

современной кардиохирургии и лучевой диагностики, способной существенно улучшить результаты лечения и качество жизни пациентов с данной патологией.

Целью данного исследования явилась разработка методики комплексной МР-оценки выводного отдела левого желудочка у пациентов с врожденной обструкцией для персонализации тактики хирургического лечения.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Оценить анатомию ВОЛЖ по данным МРТ у пациентов с различными вариантами врожденной обструкции и в контрольной группе.
2. Оценить гемо-гидродинамику ВОЛЖ по данным МРТ у пациентов с различными вариантами врожденной обструкции и в контрольной группе.
3. Изучить взаимосвязь анатомии и гемо-гидродинамики ВОЛЖ по данным МРТ при врожденной обструкции.
4. Определить МР-анатомо-функциональные признаки, а также структурные изменения миокарда при обструкции ВОЛЖ, влияющие на повторное формирование обструкции после хирургического вмешательства.
5. Разработать методику и стандартизированный протокол комплексной МР-оценки ВОЛЖ у пациентов с врожденной обструкцией.

Научная новизна

Представленное исследование по разработке методики комплексной МР-оценки ВОЛЖ у пациентов с врожденной обструкцией для персонализации тактики хирургического лечения является первым в России. Проведен комплексный сравнительный анализ различных методов МР-оценки геометрии и гемодинамики ВОЛЖ у пациентов с врожденной обструкцией ВОЛЖ с подклапанным стенозом аорты (ПСА), клапанным стенозом аорты (КСА), гипертрофической кардиомиопатией (ГКМП), а также в контрольной группе. Впервые предложены и изучены все теоретически возможные виды углов ВОЛЖ, а именно 16 углов, определены наиболее информативные углы и

их пороговые значения. Установлен МР-предиктор повторного формирования подклапанной обструкции после хирургического вмешательства – уменьшенный аорто-перегородочный угол. Изучена возможность использования МРТ с применением последовательности 4D-Flow для комплексной оценки гемодинамики ВОЛЖ при различных формах обструкции ВОЛЖ. Сопоставлены измерения, полученные при 2D- и 4D-Flow. Проведен анализ и сопоставление результатов комплексной МР-оценки ВОЛЖ с интра- и постоперационными данными.

Практическая значимость

Впервые в отечественной практике проведена сравнительная оценка МР-параметров ВОЛЖ у пациентов с различными типами обструкции (ПСА, КСА, ГКМП). Определены оптимальные методики измерения и пороговые значения геометрических углов сердца (аорто-сердечного и аорто-перегородочного), обладающие прогностической значимостью для выявления обструкции. Установлено, что методика 4D-Flow МРТ превосходит 2D-оценку в точности планирования хирургического вмешательства и прогнозирования его результатов.

Разработанные практические рекомендации и протокол комплексного МРТ исследования, позволяют внедрить персонализированный подход к диагностике, стратификации риска и пожизненному наблюдению пациентов с обструкцией ВОЛЖ, что направлено на оптимизацию хирургической тактики, снижение частоты рецидивов и улучшение отдаленных результатов лечения данной категории больных.

Положения выносимые на защиту

1. У пациентов с врожденной обструкцией ВОЛЖ по данным МРТ определяются характерные изменения геометрии: достоверно более низкие значения аорто-сердечного и аорто-перегородочного углов, по сравнению с контрольной группой.

2. У пациентов с врожденной обструкцией ВОЛЖ по данным 2D- и 4D-Flow МРТ определяются характерные изменения гемо-гидродинамики: на всех трех уровнях – подклапанном, клапанном и в восходящей аорте – достоверно более высокие показатели пиковых скоростей, градиентов давления, а также напряжения сдвига стенки; объемные характеристики кровотока достоверно не различаются. Значения всех скоростных показателей на всех трех уровнях при использовании МР-методик 2D- и 4D-Flow значительно различаются.
3. Значения гемодинамических показателей и напряжения сдвига стенки по данным МРТ достоверно отличаются в группах с различными видами врожденной обструкции выводного отдела левого желудочка: при ПСА и КСА – ступенчатое нарастание всех показателей от уровня поражения к вышележащему уровню; при ГКМП – стабильно повышенные градиенты на всех трех уровнях без выраженного ступенчатого роста.
4. У пациентов с врожденной обструкцией ВОЛЖ сильной и умеренной взаимосвязи между МР-показателями геометрии и гемо-гидродинамики не выявлено.
5. Сниженный аорто-перегородочный угол при МР-оценке ВОЛЖ является предиктором повторного формирования подклапанной обструкции после хирургического вмешательства.
6. Для персонализации тактики хирургического лечения протокол комплексной МР-оценки ВОЛЖ у пациентов с врожденной обструкцией должен включать анализ: геометрии с измерением аорто-перегородочного и аорто-сердечного углов сердца, гемо-гидродинамики с определением скоростных показателей и напряжения сдвига стенки, а также тканевых характеристик миокарда с определением ECV (extracellular volume - внеклеточный объём).

Апробация работы

Апробация диссертации проведена на объединенной конференции кафедры лучевой диагностики и клинических отделений ФГБУ «НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева» Минздрава России 30 июня 2025 года.

Основные разделы работы доложены и обсуждены на шести конференциях.

Публикации результатов исследования: основное содержание диссертационного исследования полностью отражено в 13 опубликованных печатных работах: из них 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации материалов диссертации на соискание ученой степени, и 9 тезисов.

Объем и структура работы: диссертация изложена на 125 страницах компьютерного текста, состоит из оглавления, списка сокращений, введения, 5 глав, заключения, выводов, практических рекомендаций, приложений и списка литературы. В работе представлены 28 таблиц и 23 рисунка. Список литературы представлен 121 источником (27 отечественных и 94 зарубежных).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы и методы исследования

В анализ включены результаты про- и ретроспективного обследования и хирургического лечения 86 пациентов на базе НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева. Проведен анализ геометрии и гемодинамики у пациентов с обструкцией ВОЛЖ различного генеза ($n=71$) и в контрольной группе - без патологии ВОЛЖ, обследованных по поводу другой патологии ($n=15$). Пациенты с обструкцией ВОЛЖ распределены следующим образом: КСА ($n=24$); ПСА ($n=32$); ГКМП ($n=15$).

Группы с обструкцией ВОЛЖ и контрольная не имели достоверных различий по полу, возрасту, росту, весу и BSA ($p>0,05$). Клиническая

характеристика пациентов, а также результаты ЭхоКГ в группах с различными типами обструкции ВОЛЖ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика больных в группах с обструкцией ВОЛЖ (n=71).

Параметр	КСА (n = 24)	ПСА (n = 32)	ГКМП (n = 15)
Пол М:Ж, n (%)	17 (71%) : 7 (29%)	15 (47%) : 17 (53%)	8 (53%) : 7 (47%)
Возраст, лет	13 [10;15]	12 [10;15]	14 [13;17]
Сопутствующие пороки сердца, n (%)	–	11 (34%)	–
Предшествующая коррекция, n (%)	11 (50%)	20 (63%)	–
ЭхоКГ до операции			
Аортальный клапан			
3-хстворчатый	–	20 (62%)	3 (100%)
2-хстворчатый	15 (62%)	11 (34%)	–
1-створчатый	9 (38%)	1 (4%)	–
Недостаточность	22 (92%)	27 (84%)	4 (27%)
Легкая	6 (27%)	11 (41%)	4 (100%)
Умеренная	5 (23%)	13 (48%)	–
Выраженная	11 (50%)	3 (11%)	–
ФВ ЛЖ, %	69 [67; 73] 58 – 77	69 [65; 71] (43 – 79)	66 [63; 73] (63 – 83)
ГСД ЛЖ-аорта, мм.рт.ст.	62 [35; 73] (21 – 109)	71 [60; 109] (19 – 140)	62 [32; 99] (16 – 105)
<50 мм.рт.ст., n (%)	8 (33%)	3 (14%)	4 (45%)
50-100мм.рт.ст.	15 (62%)	11 (50%)	3 (33%)
>100 мм.рт.ст.	1 (5%)	8 (36%)	2 (22%)
Хирургическая коррекция, n (%)	19 (79%)	11 (34%)	3 (20%)
ЭхоКГ после операции			
п/о ФВ ЛЖ, %	62 [58; 68] (53 – 77)	62 [58; 64] (56 – 64)	60 [57; 61] (53 – 61,4)
п/о ГСД ЛЖ-аорта, мм.рт.ст.	23 [15; 30] (10 – 45)	27 [22; 31] (13 – 38)	20 [18; 21] (15 – 20)

Примечание: КСА – клапанный стеноз аорты, ПСА – подклапанный стеноз аорты, ГКМП – гипертрофическая кардиомиопатия, ГСД – градиент систолического давления, ФВ ЛЖ – фракция выброса левого желудочка.

После проведенного МР-исследования, по результатам клинико-лабораторных данных, в исследуемой группе (n=71) хирургическое лечение проведено 33 пациентам (46%).

В группе **ПСА** у 20 из 32 (63%) пациентов ранее в анамнезе выполнялась коррекция ПСА: у 6 – только мембранэктомия, у остальных 14 –

мембранэктомия в сочетании с другими процедурами: миоэктомией по Morrow (n = 11), с пластикой дефекта межжелудочковой перегородки и шовной пластикой трикуспидального клапана (n = 1), с открытой комиссуротомией АК (n = 1) и с резекцией коарктации аорты (n = 1). После проведенного МР-исследования у 11 из 32 (34%) пациентов выполнена хирургическая коррекция порока: мембранэктомия с миоэктомией по Morrow (n=7), Konno с ПАК (n=1), модифицированная Konno с ПАК (n=1), Ozaki с миоэктомией по Morrow (n=1), миоэктомия по Morrow с ПАК (n=1).

В группе с *ГКМП* после проведенного МР-исследования 3 больным была проведена операция по коррекции порока: миоэктомия по Morrow с многокомпонентной реконструкцией митрального клапана (МК) с резекцией вторичных хорд и передней митральной створки (n=1) и миоэктомия по Morrow с протезированием МК механическим протезом (n=2).

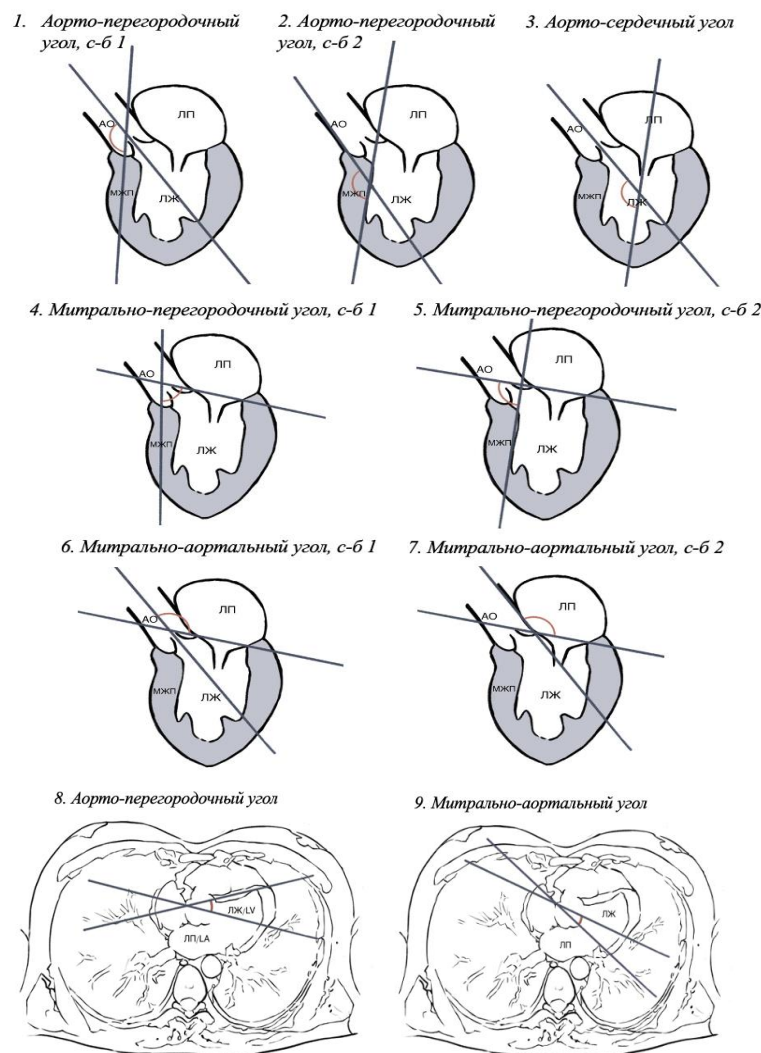
Все МР-исследования проводились на томографе Siemens AvantoFit 1,5T и Philips Achieva 3T. Протокол сканирования сердца включал: 1) кино-последовательности для оценки геометрии с измерением углов сердца, 2) 2D-и 4D-flow для оценки гемо-гидродинамики с определением скоростных показателей и напряжения сдвига стенки (WSS), 3) T1-картирование для оценки тканевых характеристик миокарда с определением ECV, 4) оценку функциональных параметров сердца.

Анализ геометрических углов сердца включил измерение четырех типов углов (аорто-перегородочный, аорто-сердечный, митрально-перегородочный, митрально-аортальный) различными способами в систолу и диастолу по 3-х камерной проекции сердца, а также двух углов по аксиальному срезу (аорто-перегородочный, митрально-аортальный) (рис. 2) – всего 16 вариантов измерений.

Для отработки методики измерения углов ВОЛЖ, проведен анализ межоператорской воспроизводимости измерений 16 геометрических углов.

Высокой межоператорской воспроизводимостью обладали следующие углы ($ICC > 0,741$, $p < 0,001$): по 3-х камерной проекции сердца – аорто-перегородочный угол измеренный первым способом в систолу и диастолу, вторым способом в диастолу, аорто-сердечный угол в систолу, митрально-перегородочный угол измеренный первым способом в систолу и диастолу; по аксиальному срезу – аорто-перегородочный и митрально-аортальный углы.

Рисунок 2. Схематическое изображение способов измерения различных геометрических углов ВОЛЖ по 3-х камерной проекции сердца (1-7) и по аксиальной проекции сердца (8-9). Ао-аорта, ЛП-левое предсердие, ЛЖ-левый желудочек, МЖП-межжелудочковая перегородка.



Исследование гемодинамики с использованием 4D Flow MPT включало обработку данных в программном обеспечении CVI42 (Circle Cardiovascular Imaging, Канада). После сегментации зон интереса в области ВОЛЖ

выполнялся анализ скоростных параметров с визуализацией векторных полей и построением кривых. Напряжение сдвига (WSS) оценивалось по 4D-Flow, а стандартная 2D фазово-контрастная МРТ использовалась для верификации.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Оценка геометрии ВОЛЖ проводилась путём измерения 4 углов семью методами в систолу и диастолу. На первом этапе проанализированы группы: основная (n=71, с обструкцией ВОЛЖ) и контрольная (n=15). Из 15 анализируемых показателей статистически значимые различия выявлены для четырёх ($p<0,039$): аорто-перегородочного угла (способ 1, систола); аорто-сердечного угла (систола и диастола); аорто-перегородочного угла (аксиальный срез).

На втором этапе проведено попарное сравнение трех вышеперечисленных углов между контрольной группой и группами с различными типами обструкции ВОЛЖ: ПСА (n=32), КСА (n=24) и ГКМП (n=15). Общий анализ между группами выявил значимые различия ($p<0,026$) по аорто-перегородочному углу (способ 1, систола) и аорто-сердечному углу (систола, диастола). Аорто-перегородочный угол на аксиальном срезе значимых различий не показал ($p>0,05$).

При попарном сравнении двух углов в четырех подгруппах наиболее выраженные изменения геометрии выявлены в группе ПСА. Так, аорто-перегородочный угол (способ 1, систола) в группе ПСА значимо отличался от групп КСА, ГКМП и контроля ($p=0,026$; $p=0,015$; $p=0,031$, соответственно), между которыми, в свою очередь, различий не было ($p<0,05$). Объединённая группа (КСА+ГКМП+контроль, n=54) и группа ПСА (n=32) значимо различались по данному углу ($p=0,005$).

ROC-анализ для группы ПСА показал, что аорто-перегородочный угол (способ 1, систола) является значимым предиктором обструкции ($AUC=0,755$,

$p=0,005$) с оптимальным порогом $\leq 134^\circ$ (чувствительность 63%, специфичность 65%).

Аорто-сердечный угол (систола, диастола) значительно отличался в контрольной группе от всех групп с обструкцией ВОЛЖ ($p<0,05$), но не различался между типами обструкций ($p>0,05$). ROC-анализ для объединённой группы обструкции ВОЛЖ (ПСА+КСА+ГКМП) подтвердил его прогностическую значимость (AUC систола = 0,799; 95% ДИ: 0,657 – 0,940, $p < 0,001$ и AUC диастола = 0,804; 95% ДИ: 0,664 – 0,944, $p < 0,001$). При этом оптимальные пороговые значения составили $\leq 134^\circ$ в систолу (чувствительность – 80%, специфичность – 87%) и $\leq 142^\circ$ в диастолу (чувствительность – 73%, специфичность – 80%).

МР-оценка гемодинамики ВОЛЖ

Проведенный анализ показал, что МР-методики 2D и 4D - Flow не являются полностью взаимозаменяемыми для измерения скоростных характеристик – пиковой скорости кровотока и градиентов под АК, на АК и в ВА. Установлены статистически значимые различия для всех анализируемых показателей, как для абсолютных значений, так и для различных уровней изменений (под АК, на АК, в ВА), ($p<0,001$).

Вторым этапом проанализированы значения скоростных характеристик ВОЛЖ на трех уровнях: под АК, на АК и в ВА. Получены статистически значимые различия между группой пациентов с обструкцией ВОЛЖ ($n=56$) и контрольной ($n=15$) для пиковых скоростей и градиентов давления на всех изученных уровнях ($p<0,05$), однако для объемных характеристик кровотока значимых различий не выявлено ($p>0,05$).

Проведено попарное сравнение изучаемых характеристик между контрольной группой и группами с различными видами обструкции ВОЛЖ (ПСА, КСА и ГКМП). Все группы достоверно различались по показателям

скорости кровотока и градиентам давления ($p < 0,009$). Анализ пиковых скоростей кровотока и градиентов давления при различных типах обструкции выявил выраженную специфичность гемодинамических нарушений (табл. 2).

Выявлены три характерных паттерна изменения параметров от подклапанного к надклапанному уровню:

при КСА – выраженное ступенчатое нарастание скоростей и градиентов с пиком на АК и в ВА, что отражает локальный стеноз и постстенотическую турбулентность;

при ПСА – экстремальный рост показателей на АК с последующей стабилизацией, свидетельствующий о комбинированной обструкции;

при ГКМП – стабильно умеренно повышенные градиенты на всех уровнях без выраженного ступенчатого прироста, что характерно для диффузной динамической обструкции.

Таблица 2. Результаты измерения скоростных характеристик на трех уровнях ВОЛЖ в зависимости от типа обструкции ВОЛЖ и в контрольной группе

Показатели <i>Me [Q1; Q3]</i>	Группа по типу обструкции				p
	1. КСА (n=21)	2. ПСА (n=21)	3. ГКМП (n=14)	4. Контроль я (n=15)	
4D-Flow MPT					
Пиковая скорость под АК (см/с)	142 [111; 225]	228 [138; 314]	141 [136; 159]	96 [88; 105]	< 0,001* p1-4; 2-4; 3-4; 1-2 < 0,006
Пиковая скорость на АК (см/с)	246 [200; 274]	308 [265; 406]	156 [145; 170]	128 [109; 146]	< 0,001* p1-4; 2-4; 1-2; 1-3; 2-3 < 0,01
Пиковая скорость в ВА (см/с)	281 [246; 305]	280 [235; 345]	140 [131; 176]	127 [114; 156]	< 0,001* p1-4; 2-4; 1-3; 2-3 < 0,001
Градиент под АК (мм рт.ст.)	8 [5; 20]	21 [8; 45]	8 [7; 10]	4 [3; 5]	< 0,001* p1-4; 2-4; 3-4; 1-2 < 0,006
Градиент на АК (мм рт.ст.)	21 [15; 30]	38 [28; 59]	10 [8; 12]	7 [5; 9]	< 0,001* p1-4; 2-4; 1-2; 1-3; 2-3 < 0,029
Градиент в ВА (мм рт.ст.)	32 [24; 37]	31 [22; 48]	8 [7; 12]	7 [5; 10]	< 0,001* p1-4; 2-4; 1-3; 2-3 < 0,002
2D-Flow MPT					
Пиковая скорость под АК (см/с)	141 [127; 207]	270 [139; 324]	153 [128; 201]	81 [64; 98]	0,012* p1-4; 2-4; 1-2 < 0,009
Пиковая скорость на АК (см/с)	261 [238; 302]	322 [243; 376]	157 [147; 182]	130 [123; 135]	< 0,001* p1-4; 2-4; 1-2; 1-3; 2-3 < 0,025
Пиковая скорость в ВА (см/с)	255 [241; 287]	220 [174; 293]	132 [120; 140]	109 [103; 116]	< 0,001* p1-4; 2-4; 1-3; 2-3 < 0,003
Градиент под АК (мм рт.ст.)	8 [6; 17]	31 [10; 47]	9 [7; 16]	3 [2; 4]	0,004* p2-4; 1-2 < 0,004
Градиент на АК (мм рт.ст.)	26 [23; 36]	41 [23; 57]	10 [9; 13]	7 [6; 7]	< 0,001* p1-4; 2-4; 1-2; 1-3; 2-3 < 0,024

Градиент в ВА (мм рт.ст.)	26 [23; 33]	19 [12; 36]	7 [6; 8]	5 [4; 5]	< 0,001* $p_{1-4}; 2-4; 1-3; 2-3 < 0,002$
------------------------------	----------------	----------------	-------------	-------------	--

* – сравнение общее, различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$).

Анализ напряжения сдвига WSS

Проведён анализ максимальных (max) и средних (avg) значений WSS на трёх уровнях ВОЛЖ (под АК, на АК и в ВА). Выявлены статистически значимые различия между группой обструкции ВОЛЖ ($n=56$) и контролем ($n=15$) для всех измеренных параметров WSSmax и WSSavg на всех трёх уровнях ($p < 0,026$). Значения WSS в группе обструкции ВОЛЖ были достоверно выше (табл. 3).

Таблица 3. WSS на трех уровнях (подклапанный, клапанный, в ВА) в контрольной группе ($n=15$) и в группах по типу обструкции ВОЛЖ

WSS, Па Me [Q1; Q3]	Группа по типу обструкции				p
	1. КСА (n=21)	2. ПСА (n=21)	3. ГКМП (n=14)	4. Контроль я (n=15)	
WSS max					
под АК	0,20 [0,16; 0,28]	0,29 [0,24; 0,44]	0,33 [0,21; 0,38]	0,16 [0,12; 0,18]	< 0,001* p _{2-4; 3-4; 1-2} < 0,037
на АК	0,31 [0,22; 0,45]	0,42 [0,30; 0,54]	0,35 [0,27; 0,40]	0,25 [0,18; 0,34]	0,030* p ₂₋₄ = 0,018
в БА	0,37 [0,22; 0,46]	0,43 [0,32; 0,54]	0,34 [0,28; 0,37]	0,27 [0,18; 0,36]	0,017* p ₂₋₄ = 0,010
WSS average					
под АК	0,10 [0,08; 0,12]	0,13 [0,11; 0,17]	0,09 [0,06; 0,10]	0,08 [0,07; 0,09]	< 0,001* p _{2-4; 2-3} < 0,007
на АК	0,12 [0,11; 0,17]	0,16 [0,11; 0,18]	0,08 [0,08; 0,09]	0,08 [0,07; 0,12]	< 0,001* p _{2-4; 1-3; 2-3} < 0,022
в БА	0,14 [0,11; 0,19]	0,14 [0,12; 0,19]	0,08 [0,07; 0,09]	0,08 [0,07; 0,11]	< 0,001* p _{1-4; 2-4; 1-3; 2-3} < 0,005

* – сравнение общее, различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$).

Оценка WSS max WSS avg в группах с различными типами обструкции ВОЛЖ выявила дифференцирующие паттерны гемодинамического стресса на различных уровнях ВОЛЖ. **На подклапанном уровне:** максимальные значения WSSmax зарегистрированы при ПСА и ГКМП, значимо превышая КСА и контроль. WSSavg была достоверно повышена только при ПСА. **На клапанном уровне:** WSSmax была максимальна при ПСА. Ключевым

дифференцирующим параметром выступила WSSavg, стабильно повышенная при ПСА и КСА, но остававшаяся в пределах нормы при ГКМП.

На уровне ВА: WSSmax была повышена при ПСА и КСА. WSSavg оставалась низкой при ГКМП, значимо отличаясь от повышенных значений при ПСА и КСА.

Определены пороговые значения WSSmax и WSSavg для прогнозирования обструкции ВОЛЖ (Табл. 4).

Таблица 4. Результаты ROC-анализа для определения пороговых значений в прогнозировании обструкции ВОЛЖ

Показатель	Пороговое значение, Па	Чувствительность, %	Специфичность, %	AUC
ПОД АК				
WSSmax	0,22	66	87	0,785
WSSavg	0,10	64	87	0,756
НА АК				
WSSmax	0,32	63	67	0,698
WSSavg	0,10	64	67	0,688
В ВА				
WSSmax	0,29	70	60	0,710
WSSavg	0,10	63	67	0,733

Оценка взаимосвязи скоростных показателей ВОЛЖ с WSS

Корреляционный анализ выявил системные закономерности взаимосвязей между пиковыми скоростями, градиентами давления и параметрами напряжения сдвига на разных уровнях ВОЛЖ, демонстрируя ключевые дифференцирующие паттерны ($r > 0,36$, $p < 0,011$).

На подклапанном уровне выявлены наиболее значимые взаимосвязи, где WSSavg демонстрирует максимальные в когорте положительные корреляции ($p < 0,001$) со скоростью ($r = 0,567$) и градиентом ($r = 0,565$), подтверждая критическую роль этого сегмента в генезе обструкции. На клапанном уровне WSSavg проявляет более сильные корреляции с гемодинамическими 4D-параметрами ($r = 0,591$ со скоростью, $r = 0,580$ с градиентом, $p < 0,001$), чем максимальное напряжение (WSSmax, $r = 0,443$ и $0,444$, соответственно,

$p < 0,001$), что указывает на превосходство WSSavg в оценке хронического гемодинамического воздействия. Для 2D-параметров сила корреляции существенно слабее ($r < 0,373$, $p = 0,004$), что подтверждает преимущество 4D-визуализации для точной оценки биомеханических нагрузок. *Надклапанный уровень* характеризуется устойчивыми корреляциями WSS avg со скоростью ($r = 0,580$, $p < 0,001$) и градиентом ($r = 0,590$, $p < 0,001$), отражающими влияние постстенотической турбулентности, при этом переход к 2D-оценке сохраняет силу связи для WSSavg ($r = 0,509$ и $0,510$, соотв., $p < 0,001$).

Оценка взаимосвязи гемодинамических показателей ВОЛЖ с геометрическими параметрами

Проведенный анализ показывает, что уменьшение аорто-перегородочного угла, измеренного первым способом в систолу, статистически значимо связано с усилением гемодинамических показателей в подклапанной зоне аортального тракта ($r = -0,26$, $p = 0,03$), что частично подтверждает его роль как анатомического предиктора субаортальной обструкции. Обнаружены значимые обратные корреляции с пиковой скоростью под АК (4D) ($r = -0,26$, $p = 0,03$) и градиентом в этой зоне ($r = -0,26$, $p = 0,03$). Эти данные согласуются с патофизиологическим механизмом: сужение угла способствует турбулентному потоку крови в подклапанном пространстве.

Для аорто-сердечного угла в диастолу обнаружены обратные слабые корреляции с пиковой скоростью на клапане ($r = -0,26$, $p = 0,03$) и под клапаном ($r = -0,26$, $p = 0,03$). В систолу значимые связи были слабее (градиент под клапаном: $r = -0,23$, $p = 0,06$), что указывает на фазо-зависимый характер влияния.

Анализ МР-предикторов рецидива стеноза в группе ПСА

В группе с рецидивом субаортальной обструкции ($n=22$) средние значения аорто-перегородочного угла (способ 1, систола) и аорто-сердечного

угла в систолу были достоверно ниже, чем у пациентов без рецидива ($n=10$) (120° против 130° и 126° против 133° , соответственно, $p<0,05$). Однофакторный логистический анализ подтверждает их значимость: уменьшение аорто-перегородочного угла ($\beta = -1,273$; ОШ = 0,280; 95% ДИ 0,079–0,994; $p = 0,05$) и аорто-сердечного угла ($\beta = -1,259$; ОШ = 0,263; 95% ДИ 0,069–0,983; $p=0,03$) ассоциировано с повышением риска рестеноза, что отражает косвенное изменение пространственной структуры аорты и основания сердца в фазе выброса. Индексированный конечно-диастолический объем левого желудочка показал положительную ассоциацию с исходом ($\beta = 0,942$; ОШ = 2,56; $p = 0,06$), тогда как скорость потока и градиент статистически значимой связи с развитием рестеноза не продемонстрировали.

Установлено, что аорто-перегородочный угол, измеренный первым способом в систолу, является статистически значимым предиктором субаортального рестеноза (AUC = 0,732; 95% ДИ: 0,531 – 0,933, $p = 0,04$). При этом оптимальное пороговое значение составило $\geq 127^\circ$ (чувствительность– 86,4%, специфичность– 50%).

Оценка пациентов до и после операции по устранению ПСА (n=9)

Анализ аорто-перегородочного угла (с-б 1, систола) и аорто-сердечного угла (систола) статистически значимой разницы у пациентов до и после операции по устранению ПСА не выявил ($p>0,05$).

Операция по коррекции ПСА продемонстрировала значимое улучшение ключевых гемодинамических показателей, что подтверждается статистически значимым снижением скоростей и градиентов под АК ($p<0,05$): с 270 до 160–152 см/с; с 29 до 10 мм рт.ст., соответственно. На других уровнях – на АК и в ВА – также отмечалось улучшение скоростных показателей ($p<0,05$): медианы пиковой скорости снизились на 110–149 см/с; медианы градиента – на 23–26 мм рт.ст.

WSS max после операции достоверно уменьшился во всех зонах ($p < 0,02$): под AoКл (с 0,37 до 0,24), на AoКл (с 0,47 до 0,41), над AoКл (с 0,38 до 0,32). WSS avg также снизился ($p < 0,04$): под AoКл (с 0,11 до 0,08), на AoКл (с 0,14 до 0,11), над AoКл (с 0,13 до 0,11).

Постоперационно ФВ ЛЖ снизилась с 83% до 72% ($p = 0,008$), что коррелирует с обратной высокой связью с предоперационным ECV базальных сегментов ($r = -0,861$; $p = 0,006$) и свидетельствует о нарушении сократительной функции ЛЖ.

Оценка пациентов до и после операции по устранению КСА (n=9)

Анализ геометрических и гемодинамических характеристик проведен на 9 пациентах, которым была выполнена MPT с 4D-Flow до и после операции Ozaki. Значимого изменения геометрии ВОЛЖ после операции выявлено не было: аорто-перегородочный (способ 1, систола) и аорто-сердечный (систола) углы достоверно не изменились ($p > 0,05$).

Операция по коррекции КСА продемонстрировала значимое улучшение ключевых гемодинамических показателей, что подтверждается статистически значимым снижением скоростей и градиентов на двух уровнях ($p < 0,02$): на АК с 293-231 до 219-198 см/с; с 37-21 до 23-12 мм рт.ст., соответственно; также в ВА с 335-264 до 211 см/с; с 45-28 до 20-18 мм рт.ст., соответственно. На подклапанном уровне значимых различий не выявлено ($p > 0,05$). Анализ WSS также показал статистически значимое снижение показателей на уровне АК и в ВА ($p < 0,02$); под АК значимых различий не выявлено ($p > 0,05$).

После операции отмечалось снижение ФВ ЛЖ с 73% до 56% ($p = 0,06$), при этом выявлена тенденция к корреляции данного снижения с повышенными предоперационными значениями ECV ($r = -0,82$, $p = 0,09$) и временем T1-релаксации базальных сегментов ($p > 0,05$).

ВЫВОДЫ

1. МР-оценка анатомии ВОЛЖ показала характерные изменения геометрии при врожденной обструкции: достоверно более низкие значения аорто-сердечного (измеренного в систолу и диастолу) и аорто-перегородочного (в систолу) углов, по сравнению с контрольной группой ($p < 0,04$). Анализ разных типов обструкции – подклапанном, клапанном стенозах и ГКМП – показал: для аорто-сердечного угла (в систолу и диастолу) значимые различия с контрольной группой для каждого из типов обструкции ($p < 0,04$) и без значимых различий между собой/типами ($p > 0,05$); снижение аорто-перегородочного угла (в систолу) является специфичным только для подклапанного стеноза (медиана 131°): значения достоверно отличались ($p < 0,04$) от контрольной группы и от других типов обструкции – клапанного стеноза и ГКМП, при этом между собой эти две группы и контрольная достоверно не различались ($p > 0,05$).
2. МР-оценка гемо-гидродинамики ВОЛЖ при 2D- и 4D-Flow показала, что для врожденной обструкции, по сравнению с контрольной группой, на всех трех уровнях – подклапанном, клапанном и надклапанном – характерно значимое увеличение показателей ($p < 0,04$): пиковых скоростей (156–271 против 81–130 см/сек, соотв.) и градиентов давления (10–30 против 3–7 мм рт.ст., соотв.), а также напряжения сдвига стенки (0,11–0,38 против 0,08–0,27 Па, соотв.); для объемных характеристик кровотока значимых различий выявлено не было ($p > 0,12$). Установлены значимые различия при использовании МР-методик 2D- и 4D-Flow для скоростных показателей на всех трех уровнях ($p < 0,001$).
3. Комплексная МР-оценка гемодинамических показателей и напряжения сдвига стенки при обструкции ВОЛЖ показала ступенчатое нарастание всех показателей (пиковой скорости, градиента давления и напряжения сдвига стенки) от уровня поражения к вышележащему уровню: при подклапанном

стенозе – к уровню аортального клапана, при клапанном стенозе – к уровню восходящей аорты. Для ГКМП характерны стабильно повышенные градиенты на всех трех уровнях без выраженного ступенчатого роста, с максимальными значениями на подклапанном уровне и отсутствием значимого прироста при переходе к клапанному уровню.

4. Установлена умеренная корреляционная взаимосвязь между скоростными показателями (пиковых скоростей и градиентов давления) и показателями напряжения сдвига стенки на всех трех уровнях ВОЛЖ – подклапанном, клапанном и в восходящей аорте (r от 0,4 до 0,6; $p < 0,01$).

5. У пациентов с врожденной обструкцией ВОЛЖ сильной и умеренной взаимосвязи между МР-показателями геометрии и гемо-гидродинамики не выявлено; определена слабая отрицательная корреляция ($r < -0,27$, $p < 0,04$) для аорто-перегородочного угла в систолу со скоростными показателями на подклапанном уровне, для аорто-сердечного угла в диастолу – на всех трех уровнях ВОЛЖ (подклапанном, клапанном и в восходящей аорте).

6. Установлен МР-предиктор повторного формирования подклапанной обструкции после хирургического вмешательства: аорто-перегородочный угол в систолу менее 127° (с чувствительностью 86% и специфичностью 50%, $AUC = 0,732$).

7. После хирургического устранения подклапанной и клапанной обструкции по данным МРТ определено значимое снижение гемодинамических характеристик ВОЛЖ (пиковой скорости и градиента давления, $p < 0,04$) и напряжения сдвига стенки ($p < 0,04$) при неизменности геометрических характеристик ($p > 0,05$); установлена сильная отрицательная взаимосвязь между тканевым показателями миокарда ECV и фракцией выброса левого желудочка ($r = -0,86$; $p = 0,09$).

8.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Алгоритм обследования пациентов с врожденной обструкцией ВОЛЖ рекомендовано дополнить проведением комплексной МРТ, включающей: 1) кино-последовательности для оценки геометрии с измерением углов сердца, 2) 2D- и 4D-flow для оценки гемо-гидродинамики с определением скоростных показателей и напряжения сдвига стенки (WSS), 3) T1-картирование для оценки тканевых характеристик миокарда с определением ECV, 4) оценку функциональных параметров сердца.
2. МР-диагностику одностворчатого АК следует дополнительно подтверждать данными эхокардиографии.
3. Для МР-оценки геометрии ВОЛЖ при его обструкции рекомендуется определение двух углов в трехкамерной плоскости: 1) аорто-перегородочного в систолу — между линией, проведенной вдоль оси восходящей аорты перпендикулярно середине аортального клапана, и линией, проведенной посередине межжелудочковой перегородки; 2) аорто-сердечного в систолу и диастолу — между линией, проведенной вдоль оси восходящей аорты перпендикулярно середине аортального клапана, и линией, проведенной от верхушки левого желудочка перпендикулярно к митральному клапану.
4. Для прогнозирования обструктивного поражения ВОЛЖ пациентов группы риска рекомендуется использование аорто-сердечного угла с пороговыми значениями в систолу $\leq 134^\circ$ и в диастолу $\leq 142^\circ$.
5. Для прогнозирования рецидива подклапанной обструкции ВОЛЖ после операции рекомендуется использование аорто-перегородочного угла в систолу с пороговым значением $\leq 127^\circ$.
6. Для МР-оценки гемо-гидродинамики ВОЛЖ при обструкции рекомендуется проводить: для измерения пиковой скорости и градиентов давления — 2D фазово-контрастную последовательность или 4D-Flow, для

показателя напряжения сдвига стенки – 4D-Flow. Измерения всех перечисленных показателей необходимо проводить на трех уровнях ВОЛЖ – подклапанном, клапанном и надклапанном – с учетом их ступенчатого изменения.

7. Для прогнозирования обструктивного поражения ВОЛЖ пациентов группы риска рекомендуется использование показателя напряжения сдвига стенки с пороговыми значениями: на подклапанном уровне – $WSS_{max} \geq 0,22$ Па и $WSS_{avg} \geq 0,10$ Па; на клапанном уровне – $WSS_{max} \geq 0,32$ Па и $WSS_{avg} \geq 0,10$ Па; в восходящей аорте – $WSS_{max} \geq 0,29$ Па и $WSS_{avg} \geq 0,10$ Па.

8. При выявлении по данным МРТ аорто-перегородочного угла $\leq 127^\circ$ у пациентов с рецидивом подклапанной обструкции ВОЛЖ после ранее выполненного хирургического вмешательства необходимо рекомендовать смену тактики хирургического лечения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Определение диапазона референсных значений нативного времени T1-, T2-релаксации миокарда параметрических карт в модификации MOLLY на магнитно-резонансной томографии 1,5 Тл. / **Марченко Д.С.**, Александрова С.А., Глазкова Е.Ю., Матаева Т.В., Шляппо М.А., Асланиди И.П., Дорофеев А.В. // Креативная кардиология. 2024; 18(1): 36-43.
2. Оценка геометрии выводного отдела левого желудочка у пациентов с субаортальной обструкцией с помощью магнитно-резонансной томографии. / **Марченко Д.С.**, Александрова С.А., Ковалев Д.В., Пурсанова Д.М., Самсонов В.Б., Матаева Т.В., Дорофеев А.В., Асланиди И.П. // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2025; 26(3): 190-199.
3. Врожденная обструкция выводного отдела левого желудочка: патогенез и современные методы оценки. / **Марченко Д.С.**, Александрова С.А., Ковалев

Д.В., Пурсанова Д.М., Матаева Т.В., Дорофеев А.В., Асланиди И.П. // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2025; 26(6): 491-501.

4. Случай успешной коррекции врожденного комбинированного аортального порока с измененной геометрией выводного отдела левого желудочка. / Самсонов В.Б., Ковалев Д.В., Донцова В.И., Параскевова Д.П., **Марченко Д.С.** // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2025; 67(6): 746-753.

5. Оценка геометрии и гемодинамики выводного отдела левого желудочка у пациентов без врожденной обструкции при помощи магнитно-резонансной томографии. / **Марченко Д.С.**, Ковалев Д.В., Матаева Т.В., Александрова С.А., Дорофеев А.В., Асланиди И.П. // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2023; 24(3): 123.

6. Сравнительная оценка геометрии выводного отдела левого желудочка у пациентов с врожденной патологией левых отделов сердца и без ВПС с помощью МРТ. / **Марченко Д.С.** // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2023; 24(6): 233.

7. Оценка диапазона норм значений нативного времени T1-, T2-релаксации параметрических карт на магнитно-резонансном томографе 1,5 т. / **Марченко Д.С.**, Александрова С.А., Глазкова Е.Ю., Матаева Т.В., Шляппо М.А., Асланиди И.П. // Научно-практический рецензируемый журнал Лучевая диагностика и терапия. 2023; S14: 35-36.

8. Оценка гемодинамики у пациентов с обструкцией выводного отдела левого желудочка методом 4D-Flow. / **Марченко Д.С.**, Александрова С.А., Ковалев Д.В., Матаева Т.В., Асланиди И.П. // Конгресс российского общества рентгенологов и радиологов. Сборник тезисов. 2024: 194-195.

9. Роль МРТ в оценке послеоперационного периода у пациентов после коррекции врожденных пороков сердца. / **Марченко Д.С.**, Александрова С.А.,

Ковалев Д.В., Асланиди И.П. // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2024; 25(3): 119.

10. Воспроизводимость методики измерения углов при оценке геометрии выводного отдела левого желудочка с помощью МРТ. / **Марченко Д.С.**, Александрова С.А., Ковалев Д.В., Пурсанова Д.М., Дорофеев А. В., Асланиди И.П. // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2025; 26(3): 111.

11. Assessment of Left Ventricular Outflow Tract Geometry in Patients with Subaortic Obstruction using MRI. / **D. Marchenko**, S. Alexandrova, D. Kovalev, T. Mataeva, I. Aslanidis // Электронная Online платформа epos.myESR.org. 2025. C-25271. DOI: 10.26044/ecr2025/C-25271

12. Оценка геометрии и гемодинамики у пациентов с врожденной субаортальной обструкцией выводного отдела левого желудочка до и после оперативного вмешательства при помощи МРТ. / **Марченко Д.С.**, С.А. Александрова, Д.В. Ковалев, Самсонов В.Б., Дорофеев А.В., Асланиди И.П. // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2025; 26(6):104.

13. МРТ сердца в оценке гемодинамики у пациентов с врожденной обструкцией ВОЛЖ при помощи 4D-Flow. /**Марченко Д.С.** // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2025; 26(6): 214.