

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ
«МОСКОВСКИЙ ОБЛАСТНОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
КЛИНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. М.Ф. ВЛАДИМИРСКОГО»

На правах рукописи

УСМАНОВА ЛИЛИЯ ЗУЛЬФАТОВНА

**МЕХАНИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СЕРДЦА КАК КРИТЕРИЙ
ОЦЕНКИ СОКРАТИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ МИОКАРДА
У ПАЦИЕНТОВ КАРДИОХИРУРГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ**

3.1.15 - сердечно-сосудистая хирургия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата медицинских наук

Научный руководитель:
доктор медицинских наук, профессор
Осиев Александр Григорьевич

Москва – 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	11
<hr/>	
1.1 Определение понятия, распространенность, социальная значимость.....	11
1.2 Анатомические особенности строения сердца.....	12
1.3 Механика сердца в течение сердечного цикла.....	16
1.4 Изменения механики и гемодинамики сердца у пациентов кардиохирургического профиля	21
1.5 Методы диагностики и оценки сократительной функции миокарда у кардиохирургических пациентов.....	25
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	37
<hr/>	
2.1 Материалы исследования	37
2.2 Общая характеристика исследуемой выборки.....	40
2.3 Методы обследования больных	44
2.4 Статистический анализ данных	46
ГЛАВА 3 ОЦЕНКА МЕХАНИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СЕРДЦА ПО ДАННЫМ КОРОНАРНОЙ АНГИОГРАФИИ	48
<hr/>	
3.1 Методика оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии.....	48
3.2 Компьютерная программа автоматического расчета показателей механики вращения сердца на основании данных коронарной ангиографии.....	57
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	61
<hr/>	
4.1 Диагностическая значимость нового параметра – «угла ротации сердца» – для оценки сократительной способности миокарда.....	61
4.2 Результаты изучения механики вращательного движения сердца у пациентов кардиохирургического профиля	64
4.3 Сравнительный анализ параметров сократительной функции миокарда, рассчитанных по данным коронароангиографии и Speckle-tracking эхокардиографии	70
4.4 Обсуждение результатов исследования.....	75
ВЫВОДЫ.....	88
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	90
СПИСОК ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИХ СОКРАЩЕНИЙ	91
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	93
<hr/>	

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Хроническая сердечная недостаточность (ХСН) – одно из самых тяжелых и прогностически неблагоприятных осложнений заболеваний сердечно-сосудистой системы. По данным Российских эпидемиологических исследований, распространенность ХСН в общей популяции составила 7%, в том числе клинически выраженная — 4,5 % (Хроническая сердечная недостаточность. Клинические рекомендации, 2020). Медикаментозная терапия улучшает прогноз развития сердечной недостаточности (СН), но на определенной стадии утрачивает свою эффективность, и практикующие врачи часто сталкиваются с пациентами, у которых на фоне оптимально подобранного лечения продолжают прогрессировать симптомы СН.

При прогрессировании сердечной недостаточности и неэффективности медикаментозной терапии требуется восстановление или уменьшение последствий ремоделирования миокарда хирургическими методами лечения (Шевченко Ю.Л., Бобров Л.Л., Обрезан А.Г., 2002; Ситникова М.Ю., Федотов П.А., Прокопова Л.В., 2017; Бокерия Л.А., Неминущий Н.М., Постол А.С., 2018; Сыгай А.И., Туганбеков Т., Альбазаров А., 2019; Хроническая сердечная недостаточность. Клинические рекомендации, 2020; Калюжин В.В. и др., 2021; Карташов Д.С., Бабунашвили А.М., Шумаков Д.В. и др., 2022; Oh J.K. et al., 2013).

У пациентов с тяжелой ХСН по мере прогрессирования ремоделирования левого желудочка (ЛЖ) ухудшается сократительная способность миокарда (Кулагина Т.Ю. и др., 2018; Рубаненко А.О. и др., 2019; Белов Ю.В. и др., 2021; Зябирова Р.З. и др., 2021; Бокерия Л.А. и др., 2022; Wang Y. et al., 2021). В связи с этим, оценка сократительной способности миокарда является необходимым и обязательным этапом при выборе метода лечения у данной категории пациентов. С позиции механики сердца показателями сократительной способности левого желудочка являются: деформация, скорость деформации, ротация, скорость ротации, скручивание и поворот по оси (Павлюкова Е.Н. и др., 2015; Швец Д.А.,

Поветкин С.В., 2021; Mondillo S., Galderisi M., Mele D. et al., 2011; Cameli M., Lisi M., Righini F.M. et al., 2013; Minatoguchi S., Yoshizane T., Tanaka R., et al., 2019; Yuda S., 2021).

В настоящее время эхокардиография (ЭхоКГ) предоставляет большие возможности в оценке показателей механики сердца, позволяющих определить сократительную способность миокарда у пациентов с ХСН при планировании кардиохирургических вмешательств. ЭхоКГ позволяет получить важную информацию об анатомии и функции сердца – это оценка систолической и диастолической функции ЛЖ, обнаружение нарушений локальной сократимости левого желудочка, измерение фракции выброса ЛЖ, выявление патологии клапанного аппарата сердца. В последние годы все больше используется трехмерная speckle-tracking эхокардиография (STE), которая обеспечивает более объемный и подробный анализ сердечной динамики (Берестень Н.Ф., Сандриков В.А., Федорова С.И., 2019; Tops L.F., et al., 2017; Li Y., Wan X., Xiao Q., et al., 2020; Lisi M., Cameli M., Mandoli G.E., et al., 2022).

Тем не менее, ЭхоКГ имеет ряд ограничений при проведении исследований. Прямых противопоказаний к проведению трансторакальной эхокардиографии нет, но есть ограничения, связанные с плохой визуализацией сердечных структур, что связано как с анатомическими особенностями пациента, так и с ухудшением основного изображения в связи с наличием дополнительных структур (протезы, кальциноз и другие). ЭхоКГ с контрастом, чреспищеводная ЭхоКГ, стресс-эхокардиография могут быть назначены только тем пациентам, у которых нет противопоказаний к проведению данных методов обследования.

Магнитно-резонансная томография (МРТ) сердца позволяет получить детальную информацию о морфологии сердца, внутрисердечной гемодинамике, функции желудочков, скорости и объеме кровотока по крупным сосудам, структуре миокарда. Несмотря на то, что МРТ считается «золотым стандартом» в этой области исследования, его рутинное использование ограничено высокой стоимостью, малой доступностью, относительной сложностью получения

изображений и длительным анализом данных. Существуют абсолютные противопоказания к МРТ (МРТ-несовместимые кардиостимуляторы, имплантируемые кардиовертеры-дефибрилляторы (ИКД), ресинхронизирующие устройства, металлические устройства на сосудах головного мозга, наличие металла в глазницах и другие). Также МРТ не является первоначальным исследованием в диагностике заболеваний сердца, а проводится чаще в случае неубедительных результатов ЭхоКГ (Wang J. et al., 2013).

К методам, позволяющим проводить оценку функциональных параметров левого желудочка, кроме эхокардиографии и МРТ, относятся инвазивная вентрикулография, радионуклидная вентрикулография, однофотонная эмиссионная и мультисериальная компьютерная томография.

Использование результатов коронарной ангиографии (КАГ) для оценки сократительной способности миокарда в доступной литературе не встречено.

Рентгеноконтрастная коронарная ангиография – инвазивное исследование, не относится к рутинным методам, также имеет ряд противопоказаний. Вместе с тем в настоящее время показания к проведению коронарной ангиографии постоянно расширяются. Коронарная ангиография в большинстве случаев проводится пациентам: с развитием острого коронарного синдрома (ОКС), подозрением на ишемическую болезнь сердца (ИБС) и отсутствием эффекта от проводимого лечения.

Коронарная ангиография является обязательным диагностическим методом для подтверждения диагноза ОКС или его исключения, оценки прогноза, определения показаний для инвазивного лечения и выбора метода реваскуляризации миокарда (Острый инфаркт миокарда с подъемом сегмента ST электрокардиограммы. Клинические рекомендации, 2020; Острый коронарный синдром без подъема сегмента ST электрокардиограммы. Клинические рекомендации, 2020). В большинстве случаев для пациентов с подозрением на ОКС коронарная ангиография является первичным этапом диагностики до выполнения ЭхоКГ и в таких ситуациях КАГ позволила бы повысить вероятность раннего выявления нарушения сократительной способности миокарда. Однако

КАГ в виде ангиографического изображения не позволяет определять наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда.

Исходя из вышеизложенного, актуально создание и использование в практике методики математического анализа параметров механики сердца на протяжении сердечного цикла по ангиографическим изображениям коронарных артерий, позволяющей определить наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля.

Решение этой важнейшей клинической задачи расширит современные представления о диагностических возможностях коронарной ангиографии в кардиохирургии и дополнит имеющиеся сведения о механике вращательного движения сердца.

Цель исследования: Разработка методики оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии и обоснование ее применения в практике на основе изучения сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля.

Задачи исследования

1. Разработать методику оценки механики вращательного движения сердца, основанной на математических расчетах угла ротации сердца по данным коронарной ангиографии.

2. Оценить диагностическую значимость показателя угла ротации сердца для определения сократительной способности миокарда.

3. Изучить сократительную способность миокарда у пациентов с дилатационной кардиомиопатией и аневризмой левого желудочка с помощью разработанной методики.

4. На основе использования показателя угла ротации сердца изучить сократительную способность миокарда у пациентов с протезированными клапанами сердца.

5. Провести сравнительный анализ показателей оценки сократительной способности миокарда, рассчитанных по данным КАГ (угол ротации сердца) и Speckle-tracking ЭхоКГ (глобальная продольная деформация).

Научная новизна исследования

Впервые разработана принципиально новая методика оценки механики вращательного движения сердца, основанная на математических расчетах угла ротации по движению точек на поверхности сердца, определенных на коронарограмме в двух косых проекциях, позволяющая определить наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля.

Впервые установлено, что показатель угла ротации сердца позволяет прогнозировать наличие нарушения сократительной способности миокарда с высокой аналитической чувствительностью и специфичностью.

Впервые на основе использования новой методики изучена сократительная способность миокарда у пациентов с дилатационной кардиомиопатией (ДКМП) и аневризмой левого желудочка (АЛЖ), а также у пациентов с протезированными клапанами сердца и доказано, что показатель угла ротации сердца ниже порогового значения свидетельствует о наличии нарушения сократительной способности миокарда у этих пациентов.

Впервые получены новые данные об особенностях изменения угла ротации сердца у пациентов с протезированными клапанами сердца.

Впервые установлено, что по возможности оценки сократительной способности миокарда у пациентов с ДКМП и АЛЖ показатель угла ротации сердца сопоставим с показателем глобальной продольной деформации, рассчитанным Speckle-tracking ЭхоКГ.

Практическая значимость работы

Разработанная методика оценки механики вращательного движения сердца, основанная на математических расчетах угла ротации сердца, по ангиографическим изображениям коронарных артерий на протяжении сердечного цикла, расширяет диагностические возможности коронарной ангиографии.

Показатель угла ротации сердца служит предиктором ранней диагностики нарушения сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля.

Предложенная методика для определения сократительной способности миокарда, наряду с ЭхоКГ и другими диагностическими методами, может быть использована в клинической практике для комплексной оценки функционального состояния миокарда.

Расчет угла ротации сердца при проведении диагностической коронарной ангиографии пациентам: с развитием ОКС, подозрением на ИБС и отсутствием эффекта от проводимого лечения предоставляет дополнительную информацию для планирования дообследования уже с предположением наличия нарушения сократительной способности миокарда.

Компьютерная программа для автоматического расчета угла ротации сердца на основании данных коронарной ангиографии повышает оперативность получения врачами-кардиохирургами результатов исследований, необходимых для определения тактики дальнейшего обследования и лечения пациентов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Использование разработанной методики оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии в клинической практике позволяет рассчитывать показатель угла ротации сердца и прогнозировать на его основе наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля.

2. Показатель угла ротации сердца ниже установленного порогового значения свидетельствует о наличии нарушения сократительной способности миокарда у пациентов с ДКМП и АЛЖ.

3. У пациентов с протезированными клапанами сердца показатель угла ротации сердца, определенный в послеоперационном периоде, позволяет оценить восстановление сократительной способности миокарда.

4. Диагностическая значимость угла ротации сердца в отношении определения наличия или отсутствия нарушения сократительной способности

миокарда у пациентов с ДКМП и АЛЖ сопоставима с глобальной продольной деформацией, рассчитываемой методом Speckle-tracking эхокардиографии.

Внедрение полученных результатов

1. Полученные результаты внедрены в лечебный процесс Государственного бюджетного учреждения здравоохранения Республиканский кардиологический центр Министерства здравоохранения Республики Башкортостан, г. Уфа.

2. Разработанная компьютерная программа для расчета угла ротации сердца внедрена в ГБУЗ «Республиканский кардиологический центр» Министерства здравоохранения Республики Башкортостан, г. Уфа.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достаточный объем наблюдений (120), использование современных методов обследования, тщательная статистическая обработка свидетельствуют о высокой достоверности выводов и рекомендаций. Выводы и практические рекомендации аргументированы и обоснованы.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях:

1. III Российский Форум по сердечной недостаточности и заболеваниям миокарда (09-10 октября 2018 года, г. Уфа) на тему: «Важность ранней диагностики хронической сердечной недостаточности».

2. Кардиоваскулярный саммит (27-30 апреля 2019 года, г. Сеул (Корея)) на тему: «Систолический твист сердца у пациентов с дилатационной кардиомиопатией в сравнении с пациентами без сердечной недостаточности».

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано четыре научные работы, в том числе в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (2 публикации), 1 в иностранных журналах, 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора

Лично автором проведен обзор отечественной и иностранной научной литературы, разработаны дизайн и методология исследования, сформулированы и построены математические модели, проведен сбор материала, проведены хронологические измерения координат точек на коронарограммах и расчет кинематических параметров сердца. Автором самостоятельно проводился анализ полученных результатов, статистическая обработка, сформулированы выводы, основные положения, выносимые на защиту, и практические рекомендации, подготовка научных публикаций по теме диссертации.

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на 115 страницах машинописного текста, иллюстрированного 24 рисунками и 8 таблицами. Состоит из введения, обзора литературы (1-я глава), описания материалов и методов исследования (2-я глава), описания методики оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии (3-я глава), результатов собственных исследований и их обсуждения (4-я глава), выводов и практических рекомендаций. Список литературы содержит 178 источников, из них 89 отечественных и 89 зарубежных.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Определение понятия, распространенность, социальная значимость

Сердечная недостаточность определяет собой такой клинический синдром, в рамках проявления которого происходит нарушение свойственной сердцу насосной функции. Сердечная недостаточность, симптомы которой могут проявляться самым различным образом, характеризуется и тем, что для нее свойственно прогрессирование, на фоне чего пациенты постепенно утрачивают адекватную трудоспособность, а также сталкиваются со значительным ухудшением качества своей жизни.

По данным Российских эпидемиологических исследований, распространенность ХСН в общей популяции составила 7%, в том числе клинически выраженная — 4,5% [85].

Результаты исследования ЭПОХА-ХСН показали, что распространенность ХСН I–IV ФК за период с 1998 по 2017 г. увеличилась с 6,1% до 8,2%, а ХСН III–IV ФК – с 1,8% до 3,1%. Основными причинами формирования ХСН остаются артериальная гипертензия и ишемическая болезнь сердца; отмечается увеличение роли инфаркта миокарда и сахарного диабета как причин ХСН. Прогноз пациентов неблагоприятен: при ХСН I–II ФК медиана времени дожития составляет 8,4 (95% ДИ: 7,8–9,1) года, а при ХСН III–IV ФК – 3,8 (95% ДИ: 3,4–4,2) года [105].

Лечение сердечной недостаточности и в особенности ее декомпенсации – сложная задача для специалистов. Медикаментозная терапия улучшает прогноз развития сердечной недостаточности, но на определенной стадии утрачивает свою эффективность, и практикующие врачи часто сталкиваются с пациентами, у которых на фоне оптимально подобранного лечения продолжают прогрессировать симптомы СН. При прогрессировании сердечной недостаточности и неэффективности медикаментозной терапии, требуется восстановление или

уменьшение последствий ремоделирования миокарда хирургическими методами лечения [6, 54, 55, 65, 85, 88, 122].

Таким образом, хроническая сердечная недостаточность, являясь финалом сердечно-сосудистого континуума [65, 66], приводит к максимальным рискам ухудшения течения не только этиологических причин, но и декомпенсации самой ХСН, повторным госпитализациям, что значительно удорожает ведение данной категории пациентов [78].

Декомпенсация ХСН часто приводит к смертельному исходу, что становится социально-экономической проблемой для государства. Проблема профилактики декомпенсаций и создание базиса стабильного течения ХСН является одной из главнейших задач кардиологического медицинского сообщества, что заставляет считать данное направление одним из приоритетных в медицине [25].

1.2 Анатомические особенности строения сердца

Первым на мышечную природу сердца указал датский анатом Nicolaus Steno (Niels Stensen) в 1663 г. [119].

Сердце работает столь слаженно, что говорят обычно о «сердечной мышце» в единственном числе, забывая, что на деле мышечная оболочка сердца представлена рядом мышц [26]. Мышечные волокна предсердий отделены от мускулатуры желудочков плотными соединительнотканными образованиями, состоящими из правого и левого фиброзного треугольников и фиброзных колец сердечных клапанов. Эти волокнистые структуры являются местом прикрепления многих мышечных слоев миокарда. Основную толщину стенок предсердий образуют два мышечных слоя – наружный и внутренний [167].

В описаниях строения мышечных стенок желудочков имеются известные разночтения: одни авторы различают два слоя мышц, другие – три или четыре группы, а третьи называют отдельные мышцы, варьирующиеся от трех до девяти, причем под разными наименованиями [80, 156, 168].

Группа авторов [26] пишут о трехслойном строении миокарда желудочков с описанием шести парных и двух непарных мышц. Такая морфология подтверждена ими в опытах при препарировании.

Наружный слой является общим для обоих желудочков, но фактически он состоит из двух почти симметричных частей. Первая из них — передняя наружная косая мышца — прикрепляется к переднеправой полуокружности фиброзного кольца трикуспидального клапана и к основанию аорты и легочной артерии, идет в направлении справа—налево—вниз, переходит через тупой край сердца на его задненижнюю поверхность и вновь возвращается кпереди, образуя в области верхушки «vortex», после чего уходит в глубокий слой, давая начало левой глубокой прямой мышце, заканчивающейся двумя папиллярными мышцами и трабекулами левого желудочка.

Вторая часть наружного слоя — задняя наружная косая мышца — начинается от заднелевой полуокружности фиброзного кольца митрального клапана и оснований магистральных артериальных сосудов, спускается слева—направо—вниз, перебрасывается через острый край сердца вблизи верхушки, образуя в этой зоне второй, менее выраженный «vortex». После этого она продолжается в правую глубокую прямую мышцу, которая образует три сосочковые мышцы и трабекулярный внутренний рельеф правого желудочка.

Обе косые мышцы, составляющие пространственный перекрест и напоминающие своим ходом две ленты Мёбиуса, иногда называют одним термином — «наружная косая», а две глубокие прямые — «прямой мышцей». Следствием такой морфологии является функциональное единство поверхностного и глубокого мышечных слоев сердца, при котором сокращения наружных косых пучков контрбалансируют напряжение прямой мышцы, а вместе — укорачивают продольную ось желудочков и сближают их стенки в области верхушки [26, 72].

Средний слой миокарда, составляющий более 50% всей мышечной массы, наиболее развит и состоит из мощных циркулярных волокон, прикрепляющихся сверху к фиброзным кольцам атриовентрикулярных клапанов и идущих

параллельно их плоскости. Эти кольцеобразные жомы существуют отдельно для правого и левого желудочков и, кроме того, имеют в своем составе пучки, сохраняющие то же направление волокон, но переходящие из правого желудочка через межжелудочковую перегородку в левый, напоминая своим ходом букву «S». Волокна этой мышцы формируют межжелудочковую перегородку и частично заканчиваются в трабекулах и сосочковых мышцах.

В среднем слое левого желудочка имеется еще одна мышца (спираль Маккалума), которая берет начало от передней полуокружности митрального кольца, идет влево и вниз на заднюю поверхность и через межжелудочковую перегородку возвращается на переднюю стенку, проделывая аналогичный ход еще раз в направлении к верхушке. Средний мышечный слой выполняет основную нагнетательную функцию в процессе механической систолы. Глубокий мышечный слой образуется из наружных косых и ряда волокон циркулярных S-образных мышц среднего слоя [26].

Согласно общепринятой теории строения сердца, миокард ЛЖ состоит из трех мышечных слоев: тонкий наружный (поверхностный) слой, который состоит из продольных волокон, среднего, волокна которого идут циркулярно, и внутреннего продольного слоя (глубокого) [31]. Наружный слой ЛЖ представлен мышечными пучками косо ориентированных волокон, которые, начинаясь от фиброзного кольца митрального и трикуспидального клапанов, идут косо вниз, направляясь вниз к верхушке сердца, где образуют «завиток». Далее через «завиток» эти пучки переходят во внутренний (глубокий) слой миокарда. Волокна внутреннего слоя расположены продольно. За счет этого слоя образуются папиллярные мышцы и трабекулы. Наружный и внутренний продольные слои миокарда являются общими для обоих желудочков. Средний же слой, расположенный между ними, образован циркулярными пучками мышечных волокон. Он представлен отдельно для каждого желудочка сердца [52].

Однако, наряду с общепринятой теорией трехслойного строения сердца, одно из главных мест занимает теория строения сердца с позиции ленты Francisco Torrent-Guasp [172].

Теория спиральной ленты миокарда желудочков по Torrent-Guasp явилась новым понятием, обеспечившим прочное основание в понимании фундаментальных механизмов работы сердечно-сосудистой системы. F. Torrent-Guasp показал, что миокард обоих желудочков разворачивается в одну <полосу>, мышечную ленту. Мышечная лента свернута в виде спирали. При этом левый желудочек представлен двумя спиралями, внутренней и наружной, последовательное сокращение которых обеспечивает систолу и диастолу. Новая концепция анатомии и физиологии работы сердца меняет представления о механизмах развития заболеваний сердца. Сокращение ЛЖ подобно вихрю. По аналогии с механизмом ручного отжима белья. Один конец (верхушка сердца) фиксирован, другой (основание сердца) закручивается. При этом утолщаются стенки ЛЖ и основание сердца приближается к верхушке, происходит изгнание крови из ЛЖ.

Диастола - процесс обратный и тоже активный. За счет сокращения внутренней спирали ЛЖ происходит его раскручивание (разворачивание), что создает "присасывающую" силу в начале диастолы.

Структурно-функциональная специализация сердца призвана обеспечивать его главное предназначение — насосную деятельность. Хотя в реализации кровообращения принимают участие сосудистые и некоторые другие механизмы, роль сердечного насоса является определяющей.

Сократительная способность миокарда является одним из важнейших компонентов, обеспечивающих нагнетательную функцию и участвующих в регуляции сердечного дебита. Главнейшим условием эффективной работы сердца как насоса является полное соответствие сердечного выброса и венозного возврата крови при стационарном режиме работы сердца и быстрое их выравнивание при меняющихся режимах [26].

Теория желудочковой мышечной ленты представляет собой новую концепцию, обеспечивающую твердое основание для согласования некоторых важных понятий в сердечно-сосудистой медицине. Спиральная ориентация волокон обеспечивает вращение левого желудочка, которое вместе с радиальным

утолщением и продольным сокращением предполагается как необходимый компонент эффективной насосной функции левого желудочка [87].

1.3 Механика сердца в течение сердечного цикла

За прошедшие три столетия механическая работа сердца оставалась одним из наиболее интригующих аспектов для физиологов и клиницистов, изучающих этот орган. Еще в 1669 г. Lower R. было описано уникальное движение скручивания левого желудочка [131]. Британские врачи William Harvey (1578-1657) и Richard Lower (1631-1691) впервые указали на движение ЛЖ по типу «скручивания льняной ткани, чтобы отжать воду», физиологическое значение которого становится понятным только сегодня.

В изучении механики сердечных сокращений свой вклад оставили Отто Франк [119], Эрнст Старлинг [163], продолживший исследования Франка (закон Франка-Старлинга – физиологический закон, согласно которому сила сокращения волокон миокарда пропорциональна первоначальной величине их растяжения).

Функция сердца как насоса зависит от силы сокращения сердечной мышцы. Сила сокращения достигает максимума при выбросе крови из левого желудочка в аорту. Количество выброшенной крови за одну систолу, то есть систолический объём кровотока сердца, в первую очередь зависит от двух переменных: от объёма крови, которая находится в желудочке во время его сокращения, и от силы его сокращения: сила сокращений сердца прямо пропорциональна степени его растяжения притекающей кровью.

Закон Франка-Старлинга описывает отношения между систолическим объёмом кровотока сердца и конечно-диастолическим объёмом кровотока сердца. Увеличение наполнения кровью камер сердца в диастолу вызывает большее растяжение сердечной мышцы. Это ведет к увеличению систолического объёма кровотока сердца. В основе данного явления лежит более оптимальное перекрытие тонких (актиновых) и толстых (миозиновых) нитей саркомеров кардиомиоцитов при увеличении нагрузки (преднагрузки), предшествующей

сокращению сердечной мышцы. При усилении растяжения мышцы увеличивается чувствительность тропонина-С к действию ионов Ca^{2+} . Конечно-диастолический объем кровотока сердца - наиболее важная переменная, от которой зависит систолический объём кровотока сердца («ударный объём»). Поскольку выход одной половины сердца является входом для другой его половины, механизм, реализующий отношения Франка-Старлинга, обеспечивает выравнивание систолических объемов кровотока левой и правой половины сердца.

Эта зависимость была описана в 1895 г. германским физиологом Отто Франком (Otto Frank, 1865-1944), немного позже - британским физиологом Эрнестом Генри Старлингом (Starling, Ernest Henry, 1866-1927), а еще позже - германским физиологом Германом Штраубом (Hermann Straub, 1882-1938). В честь первооткрывателей эту зависимость называют «законом» Франка-Старлинга-Штрауба (Frank-Starling-Straub law). Зависимость Франка-Старлинга-Штрауба была детально исследована на сердечно-легочном препарате, модели, предложенной Э.Г. Старлингом. Эту зависимость Э.Г. Старлинг определил как одну из главных особенностей саморегуляции сердца и назвал её «законом сердца».

В соответствии с этим «законом», чем сильнее будут растянуты волокна сердечной мышцы, тем больше будет сила её сокращения. То есть чем большее количество крови притекает в полости сердца во время диастолы, тем большее её количество выбрасывается сердцем при его сокращении во время систолы. Увеличение объёма крови, притекающей к сердцу, сопровождается растяжением мышцы желудочков, а также увеличением давления крови и её объёма в диастоле (конечно-диастолическое давление и конечно-диастолический объём). Посредством механизма Франка-Старлинга-Штрауба сердце приспосабливается к перекачиванию всей поступающей к нему крови (венозный возврат). Этот механизм служит для согласования систолических объёмов кровотока правого и левого сердца. Их систолический объём кровотока может изменяться от сокращения к сокращению. Вместе с тем общий объём крови, перекачиваемой сердцем в единицу времени (объёмная скорость кровотока сердца), должен быть

одинаковым. Если систолический объём кровотока левого сердца во время какого-либо сокращения будет повышенным из-за значительного конечно-диастолического давления или объёма, то при следующем сокращении ударный объём уменьшится и будет таким же, как и выброс правого сердца.

С позиции механики сердца показателями сократительной способности ЛЖ являются: деформация, скорость деформации, ротация, скорость ротации, скручивание и поворот по оси [38, 87, 104, 130, 178].

Деформация (в англоязычной литературе этот термин носит название Strain) – это изменение длины волокна относительно его первоначальной длины, то есть это изменение мышечного волокна в конце систолы относительно его длины в диастолу. Скорость деформации в англоязычной литературе обозначена как Strain Rate (SR) [91, 108, 115, 143, 161].

Впервые понятие Strain ввели I. Mirsky и W.W. Parmley [134].

Изменение деформации в единицу времени определяется как скорость деформации (Strain Rate) и выражается как s^{-1} .

Экспериментально доказано, что в норме при достижении верхушки левого желудочка скорость деформации миокарда в систолу имеет отрицательную скорость, а во время диастолы скорость деформации приобретает положительное значение [91].

При использовании трехмерной системы координат с тремя перпендикулярными осями миокардиальная деформация может быть рассчитана для отдельных сегментов и измерена в радиальном, продольном направлении и по окружности [107, 108]. Продольное сокращение представляет движение от основания к верхушке. Радиальное сокращение по короткой оси перпендикулярно к длинной оси и эпикарду. Деформация по окружности определяется как изменение радиуса по короткой оси, перпендикулярной к радиальной и длинной осям [162]. Миокардиальные волокна укорачиваются в продольном направлении и по окружности и утолщаются в радиальном направлении. Укорочение обозначается как отрицательный SR, а удлинение – как положительное значение [107].

В систолу верхушка ЛЖ вращается против часовой стрелки (если смотреть от вершины), а основание вращается по часовой стрелке, и это движение создает скручивание ЛЖ [92, 133, 139]. R. Lower в 1669 году впервые описал скручивание ЛЖ как «скручивание льняной ткани, чтобы отжать воду» [131].

Ротация представляет вращательное движение вокруг центра в позиции короткой оси ЛЖ [7]. Если смотреть от верхушки, принято рассматривать вращение против часовой стрелки (верхушка) как положительные значения, тогда как вращение по часовой стрелке (базальные отделы) – как отрицательные величины, которые обычно выражаются в градусах.

Динамическое взаимодействие субэндокардиальных и субэпикардиальных волокон вызывают скручивание ЛЖ (Twist) во время систолы [7, 116, 136].

Скручивание ЛЖ (Twist) описывается как разница между базальной и апикальной ротацией ЛЖ, рассчитанной из двух коротких осей плоскостей поперечного сечения ЛЖ, и оценивается в градусах ($^{\circ}$) [130, 133, 166].

Ломаные движения ЛЖ состоят из систолического скручивания (Twist), скорости скручивания (Twist Rate) и диастолического раскручивания (Untwist) [164]. Скорости скручивания оцениваются в градус/с-1 ($^{\circ}/с-1$). По данным исследований А. Evangelista и соавт. [174], в конце диастолы отмечается увеличение скорости раскручивания по сравнению со скоростью скручивания; наибольшая скорость раскручивания отмечается в фазу изоволюмического расслабления и в ранний период диастолы.

Среднее значение твиста ЛЖ в здоровой популяции составляет $7,7 \pm 3,5^{\circ}$ [7, 165]. Между тем этот показатель меняется в зависимости от возраста и составляет среди лиц старше 60 лет – $10,8 \pm 4,9^{\circ}$, среди лиц от 40 до 60 лет – $8,0 \pm 3,0^{\circ}$ и у лиц моложе 40 лет – $6,7 \pm 2,9^{\circ}$.

Известно, что сокращение наклонно ориентированных волокон ЛЖ вызывает поворот (Torsion) ЛЖ по его длинной оси [112, 154]. Понятие поворота (Torsion) определяется как градиент угла вращения от основания до верхушки вдоль длинной оси левого желудочка, выраженные в градусах на сантиметр [157].

В научной литературе последних десятилетий есть сведения об изучении поцикловой механики сердца. Теория фазовой структуры сердечного цикла была создана работами К. Уиггерса (Wiggers K., 1945) [2] и получила свое развитие и практическое применение в трудах отечественных и зарубежных авторов [19, 24, 98]. Согласно В.Л. Карпману [24], сердечный цикл состоит из четырех периодов и 11 фаз.

Б.А. Константинов и соавт. [26] описывают результаты собственных исследований поцикловой механики сердца. На их взгляд, в существующей концепции фазовой структуры кардиоцикла ряд фаз выделен неоправданно, в описании других есть неточности и даже противоречия, а гидродинамическая трактовка некоторых фаз не закончена. Они считают вероятным, что основной недостаток изложенных представлений заключается в принятии авторами концепции на веру того, что систола — это только сокращение миокарда, а диастола — только пассивное расслабление.

Изучение поцикловой механики имеет прямое отношение к оценке работы, мощности и производительности сердца, позволяет судить о степени напряженности компенсаторных механизмов недостаточности насосной функции и представляется удобным для анализа сократительной способности миокарда через связь механических процессов с показателями внутрисердечной гемодинамики. Такое изучение требует идентификации фаз кардиоцикла и измерения длины миокардиального волокна, объемного кровотока, давления и «силы» [26].

Таким образом, резюмируя вышеизложенное, можно подчеркнуть, что хорошо изучена сократительная функция левого желудочка в контексте фракции выброса и движения стенки левого желудочка на сокращение и расслабление. Определены перспективные направления изучения поцикловой механики сердца с целью анализа сократительной способности миокарда через связь механических процессов с показателями внутрисердечной гемодинамики.

1.4 Изменения механики и гемодинамики сердца у пациентов кардиохирургического профиля

У больных хронической сердечной недостаточностью (ХСН) отмечается снижение деформации миокарда как в продольном, так и в радиальном и циркулярном направлениях, что может быть обусловлено изменением ориентации волокон на фоне ремоделирования миокарда [146]. Обнаружено, что более выраженное нарушение деформации миокарда наблюдается у пациентов с ХСН III-IV функциональных классов [158].

Несмотря на то, что СН обычно рассматривается как результат систолической дисфункции, рост числа пациентов с диастолической СН позволил предположить, что диастолическая и систолическая дисфункции являются фенотипическими проявлениями одного процесса [69]. Последний развивается постепенно и начинается со снижения деформации, изменений ротации, пролонгации скручивания и задержки раскручивания [106, 170].

Большинство прогрессивно развивающихся заболеваний миокарда, включая ИБС, вызывают обычно субэндокардиальную дисфункцию. Это приводит к раннему нарушению сокращения продольных волокон, что может быть выявлено даже в субклиническом состоянии. Принято считать, что переход от сокращения к расслаблению является самым уязвимым периодом кардиальной механики. На ранних стадиях заболевания расслабление желудочков на региональном или глобальном уровне становится аномально медленным с замедлением времени его начала. Функция эпикарда может остаться относительно сохраненной, а циркулярная деформация и скручивание остаются нормальными или показывают компенсаторное увеличение, обеспечивая адекватную работу ЛЖ в систолу. Однако компенсация за счет гипертрофии, уменьшая субэндокардиальное напряжение, обычно имеет вредные последствия [175].

Исследования L. Luo и соавт. [151] показали, что при гипертрофии левого желудочка локальные нарушения систолической функции выявляются рано,

несмотря на нормальные показатели глобальной фракции выброса. Так, при обследовании 20 пациентов с артериальной гипертензией выявлено снижение пиковых сегментарных скоростей систолической деформации в позициях по длинной и короткой оси левого желудочка в сравнении с соответствующими сегментами в контрольной группе.

Исследование О. Nemchyna и соавт. [118] проводилось с целью изучения влияния степени гипертрофии левого желудочка на регионарную и глобальную функцию миокарда. У пациентов со значительной гипертрофией левого желудочка (индекс массы миокарда левого желудочка больше 149 г/м^2 - у мужчин и 122 г/м^2 - у женщин) отмечается более выраженное снижение систолической функции продольных и радиальных волокон миокарда, чем при незначительной и умеренной гипертрофии левого желудочка. Однако не выявлено влияния степени гипертрофии левого желудочка на величину его систолического скручивания.

При ДКМП, в связи со значительным диффузным поражением миокарда, снижается его сократительная способность. Уменьшение сердечного выброса приводит к увеличению остаточного объема крови в желудочках, что ведет к развитию застойной сердечной недостаточности. У 60% больных в полостях желудочков на поздних стадиях болезни образуются пристеночные тромбы с последующим развитием эмболии по малому или большому кругу кровообращения. ДКМП сопровождается в определенной степени гипертрофией миокарда, которая, однако, не достигает значительной величины и не компенсирует нарушение систолической функции желудочков [50, 75].

После инфаркта миокарда в его области развивается неоднородный интерстициальный фиброз, стенка постепенно изменяет свои движения во время систолы. В результате возникает ишемическая кардиомиопатия, приводящая к увеличению объемов и расширению левого желудочка, что в конечном итоге приводит к сердечной недостаточности [102]. Форма очень зависит от свойств рубцовой ткани и воздействующих на поврежденную мышцу сердца сил [94]. Особенно быстро формируются изменения механики во время критического периода от 4-й до 6-й недели от момента инфаркта [153]. Параллельно протекают

процессы изменения структуры сердечной мышцы и рубца миокарда. Результаты некоторых исследований показывают, что процесс изменения механики левого желудочка продолжается медленно на протяжении всей жизни пациента в дальнейшем [155].

Известен закон Лапласа ($T=Pr/2h$), где при определенном давлении (P) в камере увеличение радиуса кривизны (r) и снижение толщины стенки (h) приводят к увеличению напряжения стенки сердца (T) и к дальнейшему растяжению пораженной стенки его камеры [58]. Изменение формы полости левого желудочка имеет тенденцию к образованию сферического левого желудочка, что в итоге отрицательно влияет на гемодинамику и работу сердца [145]. Вышеизложенные изменения носят сначала адаптивный характер. Увеличение камер сердца у больных сначала является компенсаторным ответом и позволяет поддерживать показатели насосной функции сердца по механизму Франка–Старлинга [2]. За счет этого возникают увеличение напряжения стенки миокарда и постепенное снижение ее сократимости. Расширение левого желудочка сопровождается уменьшением его фракции выброса. В литературе последних лет [173] предложена идея лоскута непрерывной миокардиальной мышцы желудочка (ventricular myocardial band), которая объясняет, как механизм изменения геометрии всего желудочка, так и необходимость иссечения аневризмы с целью предотвращения макроструктурных изменений [14, 121].

Приобретенные пороки сердца проявляются стойкими органическими поражениями клапанного аппарата сердца, сопровождаются нарушениями функций пораженных клапанов и внутрисердечной гемодинамики. Аортальный стеноз формируется постепенно. За это время у пациента развивается гипертрофия ЛЖ как приспособительная реакция на перегрузку сопротивлением. Со временем гипертрофированный левый желудочек утрачивает способность к компенсации, что обуславливает вторичное увеличение полости ЛЖ, снижение сократимости ЛЖ [4, 53, 176].

При аортальной недостаточности ЛЖ сильно перегружен большим объемом крови, возвращающейся обратно из аорты. При этом значительно повышается

давление наполнения ЛЖ, снижается сердечный выброс, это сопровождается увеличением конечного диастолического объема ЛЖ и левого предсердия, что создает высокий риск отека легких из-за быстрого переполнения малого круга кровообращения или кардиогенного шока из-за значительного снижения сердечного выброса. Наибольшие нарушения внутрисердечной гемодинамики возникают у пациентов с начальной гипертрофией ЛЖ при небольших размерах полости ЛЖ, а также при снижении резерва преднагрузки [4, 53].

Ревматическое поражение митрального клапана сопровождается кальцификацией и утолщением створок клапана, а также сращением комиссур и хорд. Это приводит к нарушению открытия клапана, повышению трансмитрального диастолического градиента давления и, следовательно, к повышению давления в левом предсердии, а далее в легочных венах (в том числе благодаря уменьшению податливости легочных вен и в системе легочной артерии за счет констрикции и гиперплазии комплекса интима-медиа легочных артериол. Все это создает предпосылки к развитию отека легких у данных пациентов, что, в свою очередь, зависит от легочной капиллярной проницаемости. В дальнейшем происходит уменьшение сердечного выброса, отсутствие его прироста при физической нагрузке, а также прогрессирующее увеличение давления в легочной артерии и повышение сопротивления легочных артериол [53, 54].

При недостаточности митрального клапана длительная перегрузка объемом левых камер сердца со временем приводит к их дилатации, снижению систолической функции и к увеличению конечно-систолического объема ЛЖ. Хроническая МН приводит к постепенно возрастающей нагрузке объемом на ЛЖ и развитию эксцентрической гипертрофии ЛЖ, расширению ЛП. Компенсаторное повышение КДО и ФВ служит для поддержания эффективного УО, и компенсация может длиться многие годы. Однако снижение сократительной способности ЛЖ приводит к постепенному снижению эффективного УО, повышению давления в ЛП и малом круге кровообращения и появлению симптомов ХСН. Вторичная МН любой степени, а в особенности тяжелая, за счет длительной перегрузки значительно ухудшает систолическую функцию ЛЖ.

Кроме того, тяжесть вторичной МР может со временем увеличиваться из-за прогрессирования систолической дисфункции и ремоделирования левого желудочка [4, 30, 53, 147].

1.5 Методы диагностики и оценки сократительной функции миокарда у кардиохирургических пациентов

В попытке исследовать механику сердечного сокращения были предложены многочисленные методы, такие как имплантируемые датчики, киноангиография и магнитный резонанс [47]. Первоначально вращение и скручивание ЛЖ определялись с помощью радиомаркеров, вшитых в миокард пациентов во время хирургических операций на сердце. Другим методом исследования вращения являлась сономикрометрия [8, 38, 70, 77, 87]. Эта технология требует имплантации в миокард маленьких кристаллов, движение которых прослеживается при использовании специализированных цифровых приемников. Сономикрометрия обеспечивает высокую точность и считается золотым стандартом при утверждении неинвазивных методов измерения вращения и скручивания ЛЖ [87].

Вентрикулография позволяет оценить сокращение, а не вращение, инвазивна, большое количество контраста [21, 27, 62].

МРТ долгие годы считалась стандартом неинвазивной оценки сердечной биомеханики [68, 104]. Только магнитно-резонансная томография с мечеными молекулами позволяла выполнить точный анализ нескольких компонентов деформации, которые характеризуют динамику миокарда. Хотя магнитно-резонансная томография с мечеными молекулами считается золотым стандартом в этой области исследования, ее рутинное использование ограничено высокой стоимостью, малой доступностью, относительной сложностью получения изображений и длительным анализом данных. Ограничением для проведения МРТ также является невозможность выполнения исследования

пациентам с имплантированными кардиостимуляторами или кардиовертерами-дефибрилляторами [109, 158, 159].

В настоящее время развитие современных ультразвуковых технологий привело к появлению совершенно новых подходов к оценке функционального состояния сердца. Эхокардиографическое исследование идеально подходит для оценки сердечной механики в связи с её динамической природой. В связи с тем, что в течение многих десятилетий эхокардиография была единственным методом динамической визуализации сердца, вполне естественно, что новые, более автоматизированные техники сложного анализа сердечной механики были разработаны исследователями и производителями ультразвукового оборудования. Два таких метода исследования являются доминантными на арене эхокардиографии: (1) доплерографическое измерение скорости ткани, что часто называется тканевой доплерографией или миокардиальной доплерографией, а также (2) speckle tracking на основе измерений смещения. Оба типа таких измерений предоставляют информацию о большом количестве параметров функции миокарда [51].

Тканевая доплерография (Doppler Tissue Imaging (DTI) – измерение скорости ткани. С первых попыток реализации концепции трекинга движения ткани с помощью ультразвуковой доплерографии и дальнейшего развитие DTI за последние два десятилетия этот метод визуализации использовался многими исследователями для более глубокого понимания сердечной патофизиологии и тестирования ряда потенциально новых методов диагностики. Хотя многие из этих методов остаются ограниченными на исследовательском поприще, некоторые из них получили широкое признание и стали основным инструментом в арсенале клинической эхокардиографии [86, 149]. Тканевое доплеровское исследование (ТДИ) миокарда предназначено для количественной оценки его функции и прежде всего деформационных свойств с помощью технологий стрейна (ϵ) и стрейн рейта (SR) [99].

В режиме импульсно-волновой доплерографии ультразвуковые импульсы испускаются неоднократно на определенной частоте повторения вдоль одной

линии сканирования, а возвращающееся эхо регистрируется в заданное время после генерирования каждого импульса, что позволяет определить расстояние между мишенью и датчиком. Амплитуда зарегистрированных эхо-сигналов в течение времени преобразуется в спектр скорости с использованием быстрого преобразования Фурье [18, 47].

В режиме цветной доплерографии регистрируется эхо вдоль всей линии сканирования, которое разделяется на несколько диапазонов. Чтобы определить фазовый сдвиг между импульсами всех диапазонов, используется алгоритм автокорреляции для преобразования фазовых сдвигов в значения скорости, которые отображаются как цветные наложения на изображении [38].

Тканевая доплерография базируется на основе тех же принципов, что и импульсно-волновая и цветная доплеровская эхокардиография для кровотока. Чтобы отличить сигналы, исходящие при смещении ткани и кровотока, используется так называемый фильтр стенки, который является фильтром высоких частот и используется для изображения скоростей крови, или фильтр низких частот, который используется для отображения скорости смещения ткани. Так как интенсивность сигналов, которые генерируются миокардом выше, чем от кровотока, скорости кровотока обычно превышают скорость смещения миокарда [1].

Speckle-tracking эхокардиография – новая сложная эхокардиографическая техника, которая работает со стандартным 2-мерным изображением, лишенная ограничений доплеровских технологий, обеспечивает всесторонний анализ глобальной и регионарной деформации миокарда во всех пространственных плоскостях. Кроме того, speckle-tracking эхокардиография позволяет оценить ЛЖ ротационную и торсионную динамику – параметры функции ЛЖ, которые до внедрения этой методики анализировались исключительно с помощью МРТ [51].

Суть метода заключается в том, что акустические маркеры случайным образом равномерно распределяются по всему миокарду. Размер каждого пятна составляет от 20 до 40 пикселей (точек). Положение каждого пятна определяется

и точно прослеживается на последовательных кадрах. Таким образом, можно определить расстояние, на которое перемещается пятно от кадра к кадру. Зная частоту смены кадров, можно определить скорость движения пятна. С целью повышения качества отслеживания пятнистых структур применяется высокая частота смены кадров - 60-100 кадров в секунду. Особенности движения сердца, вращение в грудной клетке, а также дыхательная экскурсия грудной клетки могут приводить к смещению пятен из плоскости сканирования. Однако эти изменения не успевают произойти в значимом количестве между двумя последовательными кадрами. Таким образом, по движению пятнистых структур можно получить данные о скорости, деформации и скорости деформации всех участков миокарда. Техника вычисления деформации по двумерному изображению значительно проще, чем при использовании тканевой доплерографии, так как при этом отсутствуют ограничения, связанные с параллельностью движения объекта и ультразвукового луча. Для последующих вычислений достаточно одного сердечного цикла. Обработка ультразвуковых изображений проводится в режиме offline [87, 90, 152].

В течение последних лет растет доказательная база, которая показывает хорошее технико-экономическое обоснование, воспроизводимость и точность speckle-tracking эхокардиографии при различном клиническом применении [15, 87, 104, 118, 125, 132, 137, 148, 165, 169, 177].

Тем не менее, использование в клинической практике speckle-tracking эхокардиографии имеет ряд ограничений. Субоптимальный трекинг эндокардиальной границы может быть проблемой при выполнении STE. Другим важным ограничением метода является его чувствительность к акустической тени или реверберации, что может привести к недооценке истинной деформации. Поэтому, когда данные о деформации появляются в нефизиологическом варианте, качество сигнала или неоптимальный трекинг следует рассматривать в качестве потенциальных причин. Алгоритмы трекинга используют пространственное сглаживание и априорные данные «обычной» функции ЛЖ, которые могут

ошибочно указывать на региональную дисфункцию или повлиять на соседние сегментные значения деформации [11, 37].

При использовании STE для измерения скручивания ЛЖ качество изображения в базальной плоскости короткой оси ЛЖ может быть ограничением. Это отчасти связано с акустическими проблемами: глубиной расположения базальной части желудочка и необходимостью широкого угла сектора обзора для визуализации всего основания ЛЖ [37].

Кроме того, измерения осложняются из-за движения за пределы плоскости исследования, когда основание опускается к вершине в систолу. Из-за того, что вращение ЛЖ увеличивается к вершине, очень важно стандартизировать изображение в апикальной плоскости по короткой оси. Зачастую легче всего найти правильную циркулярную апикальную проекцию по короткой оси, наклоняя датчик из апикальной четырехкамерной плоскости, а, не перемещая его в апикальном направлении вдоль парастернальной линии по короткой оси сердца. Это также увеличивает шанс захвата циркулярной апикальной проекции по короткой оси, когда эндокард почти смыкается в конце систолы. Данные о глобальной деформации могут быть неточными, если слишком много значений сегментной деформации отбрасывается из-за неоптимального трекинга. Это особенно верно при локальных заболеваниях миокарда, когда значения деформации распределены неравномерно [70].

Существенным недостатком текущего использования 2D STE является разница в аппаратах различных производителей, что приводит к тому, что анализ STE осуществляется на данных, хранящихся в собственном линейном (полярном) формате сканирования, который не может быть проанализирован с помощью программного обеспечения других производителей. Существует несколько вариантов анализа, которые основаны на данных, хранящихся в растровом (декартовом) цифровом изображении и в формате DICOM, но на сегодняшний день существует только ограниченный опыт перекрестного сравнения различных изображений от различных производителей. Этот вопрос нуждается в дальнейшем исследовании, прежде чем STE может стать основным методом исследования. В

настоящее время на решение этой проблемы направлены совместные усилия Американского общества эхокардиографии (ASE), Европейской ассоциации эхокардиографии (ЕАЕ) и ультразвуковой промышленной индустрии [70].

Недавно разработанная трехмерная speckle-tracking техника показала многообещающие предварительные результаты в оценке данных 3-мерных изображений. Это еще одно технологическое направление, которое, предположительно, обеспечит более объемный и подробный анализ сердечной динамики, в результате чего эхокардиография приблизится к самому продвинутому методу визуализации, при этом сохранив возможность ее выполнения у постели больного. Но эта новая методика также не лишена проблем при проведении исследований [37].

Главной проблемой метода 3D STE является его зависимость от качества изображения. Случайный шум и относительно низкое временное и пространственное разрешение влияют на его способность определять границы эндокарда и эпикарда. Эти проблемы в основном влияют на связь локальных особенностей на изображении от кадра к кадру, что приводит к субоптимальному трекингу миокарда. Как и с 2D STE, качество трекинга должно быть тщательно проверено и скорректировано при необходимости [17, 37].

В заключение следует отметить, что на сегодняшний день доступными неинвазивными методами, применяемыми в клинической практике, предоставляющими дополнительные возможности в оценке функции миокарда при различной кардиологической патологии, являются: МРТ, доплерографическое измерение скорости ткани и speckle – tracking ЭхоКГ на основе измерений смещения.

Несмотря на то, что МРТ считается золотым стандартом в этой области исследования, её рутинное использование ограничено высокой стоимостью, малой доступностью, относительной сложностью получения изображений и длительным анализом данных.

Тканевая доплерография (Doppler Tissue Imaging), как и любая методика, основанная на эффекте Допплера, может по определению только измерять

скорости вдоль ультразвукового луча, в то время как компоненты скорости, которые расположены перпендикулярно к лучу, остаются незамеченными. К тому же параметры деформации при цветной доплерографии и параметры SR имеют много шума, и, как следствие, для правильной их интерпретации, а также распознавания артефактов необходимы подготовка и опыт.

В настоящее время Speckle-tracking эхокардиография считается перспективным методом исследования состояния сердца, особенно в оценке функции левого желудочка. Важным является то, что STE может использоваться не только для диагностики, но и для оценки прогноза. В то же время необходимы дальнейшие исследования, в том числе – многоцентровые, для изучения диагностической точности и воспроизводимости показателей STE. Кроме того, программное обеспечение STE различных фирм-производителей эхокардиографической аппаратуры нуждается в стандартизации. Тем не менее, оценка деформации миокарда и скручивания ЛЖ с помощью STE может быть весьма полезной в целом ряде клинических ситуаций как вспомогательный инструмент количественной характеристики функции миокарда и сердца в целом.

Резюмируя проведенный обзор научной литературы, можно подчеркнуть, что распространенность и неблагоприятный прогноз ХСН является одной из основных проблем общественного здравоохранения РФ, так как для хронической сердечной недостаточности свойственно прогрессирование, на фоне которого больные постепенно утрачивают адекватную трудоспособность, а также сталкиваются со значительным ухудшением качества своей жизни.

Лечение сердечной недостаточности и в особенности ее декомпенсация – сложная задача для специалистов. Медикаментозная терапия улучшает прогноз развития сердечной недостаточности, но на определенной стадии утрачивает свою эффективность, и практикующие врачи часто сталкиваются с пациентами, у которых на фоне оптимально подобранного лечения продолжают прогрессировать симптомы СН. При прогрессировании сердечной недостаточности и неэффективности медикаментозной терапии требуется восстановление или

уменьшение последствий ремоделирования миокарда хирургическими методами лечения.

Проблема профилактики декомпенсаций и создание базиса стабильного течения ХСН является одной из главнейших задач кардиологического медицинского сообщества, что заставляет считать данное направление одним из приоритетных в медицине

За прошедшие три столетия механическая работа сердца оставалась одним из наиболее интригующих аспектов для физиологов и клиницистов, изучающих этот орган. Еще в 1669 г. Lower R. было описано уникальное движение скручивания левого желудочка [131]. Британские врачи William Harvey (1578-1657) и Richard Lower (1631-1691) впервые указали на движение ЛЖ по типу «скручивания льняной ткани, чтобы отжать воду», физиологическое значение которого становится понятным только сегодня.

В изучении механики сердечных сокращений свой вклад оставили Отто Франк [119], Эрнст Старлинг [163], продолживший исследования Франка (закон Франка-Старлинга – физиологический закон, согласно которому сила сокращения волокон миокарда пропорциональна первоначальной величине их растяжения).

В последние десятилетия изучению механики сердца в течение сердечного цикла посвящены множество исследований. Хорошо изучена сократительная функция левого желудочка в контексте фракции выброса и движения стенки левого желудочка на сокращение и расслабление. Определены перспективные направления изучения поцикловой механики сердца с целью анализа сократительной способности миокарда через связь механических процессов с показателями внутрисердечной гемодинамики.

Структурно-функциональная специализация сердца призвана обеспечивать его главное предназначение — насосную деятельность. Хотя в реализации кровообращения принимают участие сосудистые и некоторые другие механизмы, роль сердечного насоса является определяющей. Сократительная способность миокарда является одним из важнейших компонентов, обеспечивающих нагнетательную функцию и участвующих в регуляции сердечного дебита.

Главнейшим условием эффективной работы сердца как насоса является полное соответствие сердечного выброса и венозного возврата крови при стационарном режиме работы сердца и быстрое их выравнивание при меняющихся режимах [26]. С позиции механики сердца показателями сократительной способности ЛЖ являются: деформация, скорость деформации, ротация, скорость ротации, скручивание и поворот по оси [87, 130, 178].

У больных хронической сердечной недостаточностью отмечается снижение деформации миокарда как в продольном, так и в радиальном и циркулярном направлениях, что может быть обусловлено изменением ориентации волокон на фоне ремоделирования миокарда [146]. Обнаружено, что более выраженное нарушение деформации миокарда наблюдается у пациентов с ХСН III-IV функциональных классов [158].

При ДКМП, в связи со значительным диффузным поражением миокарда, снижается его сократительная способность. Уменьшение сердечного выброса приводит к увеличению остаточного объема крови в желудочках, что ведет к развитию застойной сердечной недостаточности. ДКМП сопровождается в определенной степени гипертрофией миокарда, которая, однако, не достигает значительной величины и не компенсирует нарушение систолической функции желудочков [50, 75].

После инфаркта миокарда в его области развивается неоднородный интерстициальный фиброз, стенка постепенно изменяет свои движения во время систолы. В результате возникает ишемическая кардиомиопатия, приводящая к увеличению объемов и расширению левого желудочка, что в конечном итоге приводит к сердечной недостаточности [102]. Форма очень зависит от свойств рубцовой ткани и воздействующих на поврежденную мышцу сердца сил [94]. Особенно быстро формируются изменения механики во время критического периода от 4-й до 6-й недели от момента инфаркта [153]. Параллельно протекают процессы изменения структуры сердечной мышцы и рубца миокарда. Результаты некоторых исследований показывают, что процесс изменения механики левого

желудочка продолжается медленно на протяжении всей жизни пациента в дальнейшем [155].

Приобретенные пороки сердца проявляются стойкими органическими поражениями клапанного аппарата сердца, сопровождаются нарушениями функций пораженных клапанов и внутрисердечной гемодинамики.

Таким образом, у пациентов с тяжелой ХСН по мере прогрессирования ремоделирования левого желудочка ухудшаются показатели сократительной способности миокарда. В связи с этим, оценка сократительной способности миокарда является необходимым и обязательным этапом при выборе метода лечения у данной категории пациентов.

В настоящее время существует несколько современных диагностических методов, позволяющих эффективно проводить оценку функциональных параметров сердца. К ним относятся: ЭхоКГ, МРТ, инвазивная вентрикулография, радионуклидная вентрикулография, однофотонная эмиссионная и спиральная компьютерная томография.

Эхокардиография предоставляет большие возможности в оценке показателей механики сердца, позволяющих определить сократительную способность миокарда у пациентов с ХСН при планировании кардиохирургических вмешательств. ЭхоКГ позволяет получить важную информацию об анатомии и функции сердца – это оценка систолической и диастолической функции ЛЖ, обнаружение нарушений локальной сократимости левого желудочка, измерение фракции выброса ЛЖ, выявление патологии клапанного аппарата сердца. В последние годы все больше используется трехмерная speckle-tracking эхокардиография (STE), которая обеспечивает более объемный и подробный анализ сердечной динамики.

Магнитно-резонансная томография (МРТ) сердца позволяет получить детальную информацию о морфологии сердца, внутрисердечной гемодинамике, функции желудочков, скорости и объеме кровотока по крупным сосудам, структуре миокарда. К методам, позволяющим проводить оценку функциональных параметров левого желудочка, кроме эхокардиографии и МРТ,

относятся инвазивная вентрикулография, радионуклидная вентрикулография, однофотонная эмиссионная и мультисериальная компьютерная томография.

В доступной литературе исследований, посвященных оценке сократительной способности миокарда по данным коронарной ангиографии, не встречено.

Рентгеноконтрастная коронарная ангиография – инвазивное исследование, не относится к рутинным методам, также имеет ряд противопоказаний. Вместе с тем в настоящее время показания к проведению коронарной ангиографии постоянно расширяются. Коронарная ангиография в большинстве случаев проводится пациентам: с развитием ОКС, подозрением на ишемическую болезнь сердца и отсутствием эффекта от проводимого лечения.

Коронарная ангиография является обязательным диагностическим методом для подтверждения диагноза ОКС или его исключения, оценки прогноза, определения показаний для инвазивного лечения и выбора метода реваскуляризации миокарда [40, 41, 91, 170].

На самом деле, в отличие от острого коронарного синдрома, еще целый ряд заболеваний сердца сопровождается симптомами, похожими на ОКС, и изменениями на ЭКГ. Среди них: миокардиты, кардиомиопатии, тахиаритмии, стресс-индуцированная кардиомиопатия Тако-Тсубо, тяжелый аортальный стеноз или выраженная аортальная регургитация. У больных, доставленных в стационар с остро возникшей болью в грудной клетке, ожидаемая частота выявления заболеваний сердца, отличных от ОКС, может достигать до 15% [57, 95].

В большинстве случаев для пациентов с подозрением на ОКС коронарная ангиография является первичным этапом диагностики до выполнения ЭхоКГ и в таких ситуациях КАГ позволила бы повысить вероятность раннего выявления нарушения сократительной способности миокарда. Однако КАГ в виде ангиографического изображения не позволяет определять наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда.

Таким образом, анализ литературы свидетельствует об отсутствии способов оценки сократительной способности миокарда по данным диагностической рентгеноконтрастной коронарной ангиографии.

Исходя из вышеизложенного, актуально создание и использование в практике методики математического анализа параметров механики сердца на протяжении сердечного цикла по ангиографическим изображениям коронарных артерий, позволяющей определить наличие или отсутствие сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля.

Решение этой важнейшей клинической задачи расширит современные представления о диагностических возможностях коронарной ангиографии в кардиохирургии и дополнит имеющиеся сведения о механике вращательного движения сердца.

Представленные в данной главе сведения подтверждают важность и актуальность избранной темы диссертационного исследования.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Материалы исследования

Дизайн исследования

Исследование проводилось с 2017 г. по 2022 г. на базе ГБУЗ Республиканский кардиологический центр МЗ Республики Башкортостан, г. Уфа. В исследование были включены 120 пациентов, отобранные неслучайной целевой выборкой из базы данных пациентов, которым выполнена диагностическая коронарная ангиография (1920 пациентов).

Данное исследование является одноцентровым клиническим исследованием с ретроспективным включением пациентов. Протокол данного исследования был одобрен на заседании независимого комитета по этике при ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского 23 декабря 2021 года, протокол № 19. Дизайн исследования представлен на рисунке 1.

Критерии включения: возраст более 18 лет, пациенты с дилатационной кардиомиопатией, пациенты с аневризмой левого желудочка, пациенты, которым проводилось кардиохирургическое вмешательство, пациенты без заболеваний сердца.

Критерий исключения: пациенты с нарушением проводимости и ритма сердца.



Оцениваемые факторы

клинические (возраст, ритм сердца, электрическая ось сердца, наличие нарушений ритма по электрокардиограмме или холтеровскому мониторингованию, артериальное давление по методу Короткова, наличие гипертрофии левого желудочка, частота сердечных сокращений, стадии хронической сердечной недостаточности, наличие артериальной гипертонии)
инструментальные (результаты электрокардиографии, эхокардиографии, Speckle-tracking эхокардиографии, коронарной ангиографии, проведенных в диагностических целях)

Исследуемые явления

Механика сердечных сокращений.
Новые показатели оценки сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля.

Статистический анализ:

ранговый критерий Крускала-Уоллиса, непарный двухвыборочный критерий Уилкоксона, корреляционный анализ по Спирмену, метод анализа ROC-кривых

Рисунок 1 - Дизайн исследования.

В ходе исследования проводился ретроспективный анализ данных кардиохирургических пациентов (в том числе оперированных) по архивным историям болезни: клинических (возраст, пол, ритм сердца, электрическая ось сердца, наличие нарушений ритма по электрокардиограмме или холтеровскому мониторингованию, артериальное давление по методу Короткова, наличие гипертрофии левого желудочка, частота сердечных сокращений, стадии хронической сердечной недостаточности, наличие артериальной гипертензии); результатов инструментальных обследований (электрокардиографии, эхокардиографии, Speckle-tracking эхокардиографии, коронарной ангиографии). По данным эхокардиографии определялись: конечно-диастолический размер (КДР), конечно-систолический размер (КСР), ФВ ЛЖ, наличие ГЛЖ, степень поражения аортального клапана, наличие или отсутствие зон а-/гипокинеза.

Сведения о диагнозе также получены по архивным историям болезни. В рамках данного исследования задача верификации диагноза ХСН не ставилась.

Коронарная ангиография проводилась с использованием ангиографической рентгеновской установки Phillips Allura. Механика вращательного движения сердца изучалась с помощью, разработанной нами методики, основанной на математических расчетах угла ротации сердца по данным коронарной ангиографии, позволяющей определить наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда (Патент на изобретение № 2679875. Дата регистрации 13 февраля 2019 г. Официальный бюллетень "Изобретения (заявки и патенты)" – 2019 // Реферативный журнал "Изобретения Российской Федерации" – 2019). По данным КАГ рассчитывался φ [град.] – угол ротации сердца – и на его основе оценивалась механика вращательного движения миокарда.

Основная конечная точка: диагностическая информативность выявления нарушения сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля при использовании коронарной ангиографии.

Статистическая обработка результатов исследования проводилась с использованием программных пакетов MS Excel 2010 и R. Использовались:

ранговый критерий Крускала-Уоллиса, непарный двухвыборочный критерий Уилкоксона, корреляционный анализ по Спирмену, метод анализа ROC-кривых.

2.2 Общая характеристика исследуемой выборки

В исследование были включены 120 пациентов в возрасте от 32 лет до 71 года с целью оценки показателей механики вращательного движения сердца, отобранные неслучайной целевой выборкой из числа пациентов (1920 человек), которым на базе ГБУЗ Республиканский кардиологический центр МЗ РБ, г. Уфа была выполнена диагностическая КАГ в период с 2016 по 2021 годы.

В соответствии с задачами исследования пациенты были разделены на четыре группы: 1) пациенты с дилатационной кардиомиопатией; 2) пациенты с аневризмой левого желудочка; 3) кардиохирургические пациенты (с протезированием аортального и митрального клапанов сердца); 4) контрольная группа (пациенты у которых при обследовании не выявлены заболевания сердца). Демографическая характеристика включенных в исследование пациентов представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Демографическая характеристика пациентов, включенных в исследование Me [q1; q3]

Показатели	Группы пациентов, включенных в исследование			
	ДКМП (n=30)	АЛЖ (n=30)	*Кардиохирургические (n=30)	**Контрольная (n=30)
Половое соотношение (муж.:жен.)	28:2	21:9	19:11	13:17
Возраст, лет	59 [55; 62]	57,5 [55; 65]	66 [60; 69]	53 [44,5; 58,8]
Примечания: *- пациенты с протезированными клапанами сердца **- пациенты без заболеваний сердца				

В контрольной группе соотношение мужчин к женщинам – 13:17, возраст пациентов на момент исследования - от 35 до 69 лет, медиана возраста составила 53 [44,5; 58,8].

В группе пациентов с ДКМП соотношение мужчин к женщинам – 28:2, основную часть пациентов составили мужчины. Возраст пациентов на момент

исследования был от 32 лет до 71 года (медиана - 59 [55; 62]), отличия от контрольной группы статистически незначимы ($p>0.05$).

В группе пациентов с АЛЖ возраст пациентов на момент исследования был от 30 лет до 71 года, медиана возраста составила 57,5 [55; 65], отличия от контрольной группы статистически незначимы ($p=0.03$). Соотношение мужчин к женщинам – 21:9, основную часть пациентов также составили мужчины.

В группе кардиохирургических пациентов соотношение мужчин к женщинам – 19:11, основную часть пациентов составили мужчины. Медиана возраста пациентов на момент исследования составляла 66 [60; 69]. В связи, с более старшим, чем в контрольной группе, возрастом пациентов в кардиохирургической группе были выявлены статистически значимые различия между этими группами ($p<0,05$).

В связи с более молодым возрастом пациентов в контрольной группе, были выявлены небольшие различия между исследуемыми группами (Рисунок 2).

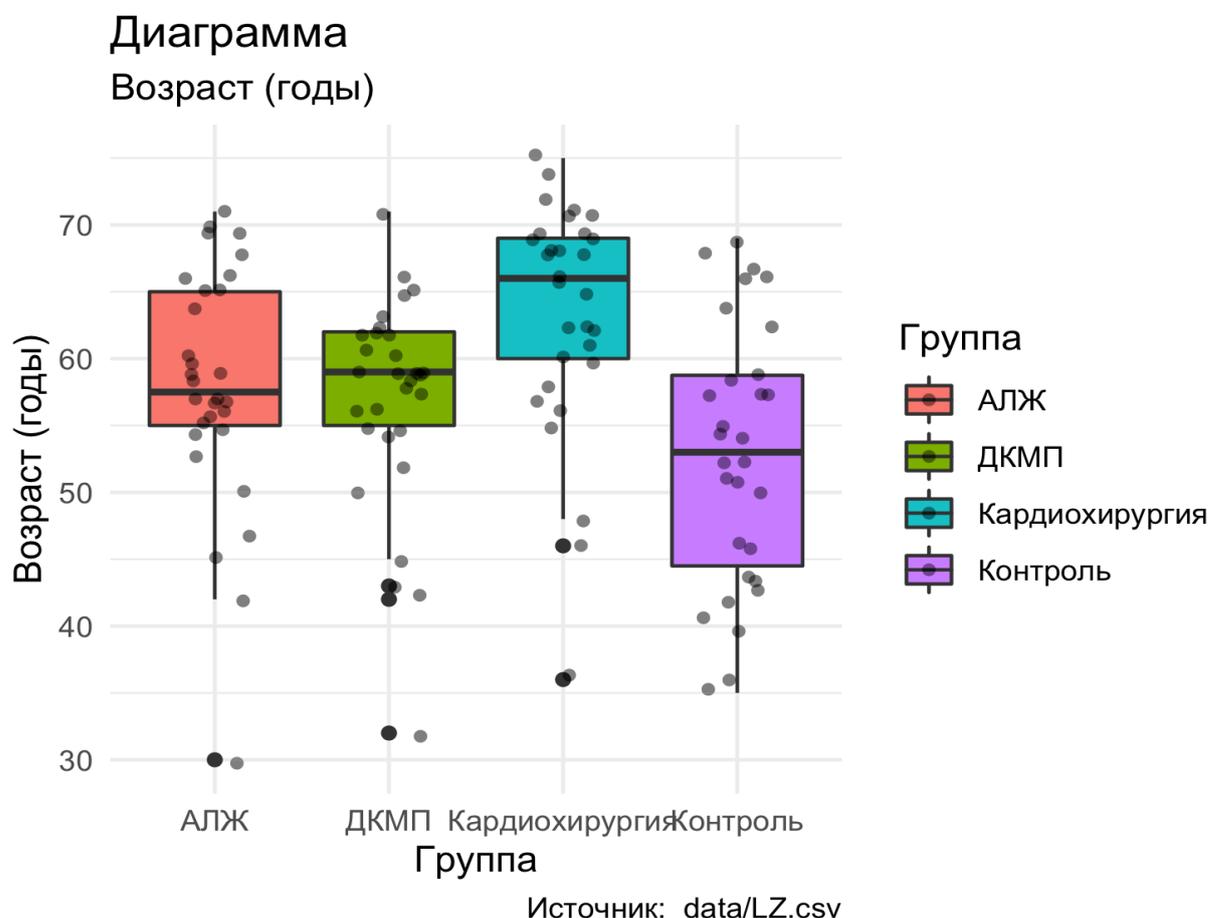


Рисунок 2 - Диаграмма возраста включенных в исследование пациентов.

Проводился статистический анализ влияния возраста исследуемых пациентов на угол вращения сердца (Рисунок 3). В результате анализа выявлено, что возраст пациентов, включенных в наше исследование не влияет на угол ротации сердца ($R = -0,099$, $p = 0,28$).

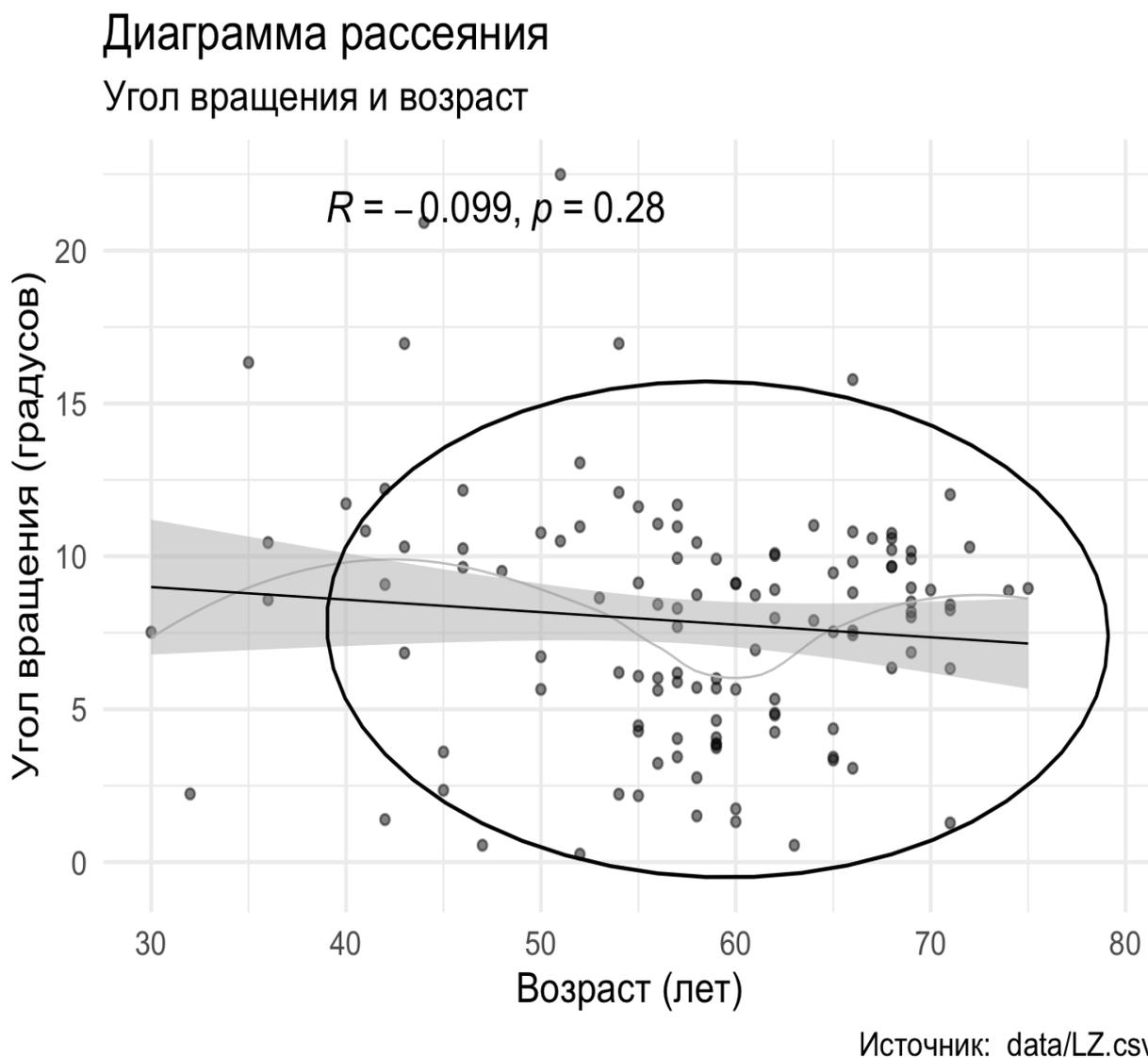


Рисунок 3 - Диаграмма зависимости угла вращения сердца от возраста включенных в исследование пациентов.

Характеристика клинических данных пациентов, включенных в исследование, представлена в таблице 2.

Таблица 2 - Характеристика клинических данных пациентов, включенных в исследование Me [q1; q3]

Показатели	Группы пациентов, включенных в исследование			
	ДКМП (n=30)	АЛЖ (n=30)	*Кардиохирургические (n=30)	**Контрольная (n=30)
Стадия сердечной недостаточности (Н.Д. Стражеско, В.Х. Василенко)				
ХСН I стадия	-	10 (33,3 %)	30 (100%)	-
ХСН IIА стадия	10 (33,3%)	12 (40 %)	-	-
ХСН IIБ стадия	20 (66,7%)	8 (26,7 %)	-	-
Фракция выброса левого желудочка				
ФВ ЛЖ (Me)	30 [27; 33,8]	42,5 [30,8; 46,0]	64 [59,3; 66,8]	65 [62; 67,5]
ХСН _н ФВ (<40%)	28 (93%)	12 (40%)	-	-
ХСН _п ФВ (40-49%)	2 (7%)	17 (56,67%)	2 (7%)	-
ХСН _с ФВ (50% и более)	-	1 (3,33%)	28 (93%)	-
ФВ ЛЖ в норме (55% и более)	-	-	-	30 (100%)
КДР (Me)	6,35 [6,02; 6,6]	5,4 [5,1; 6,3]	5,1 [4,9; 5,4]	4,8 [4,6; 4,97]
КСР (Me)	5,2 [4,8; 5,6]	3,95 [3,7; 4,5]	3,4 [3,03; 3,5]	3,1 [3; 3,3]
Примечания: *- пациенты с протезированными клапанами сердца **- пациенты без заболеваний сердца				

В группе ДКМП тяжесть клинических проявлений по стадиям ХСН выглядит следующим образом: IIА ст. – 10 (33,3%), IIБ ст. - 20 (66,7%), медиана ФВ ЛЖ составила 30 [27; 33,8], пациентов с низкой ФВ ЛЖ (менее 40%) – 28 (93,0%), с промежуточной ФВ ЛЖ (от 40% до 49%) – 2 (7%). КДР - 6,35 [6,02; 6,6], КСР - 5,2 [4,8; 5,6] (Таблица 2).

У пациентов, включенных в группу АЛЖ, тяжесть клинических проявлений по стадиям ХСН распределилась следующим образом: I ст. – 10 (33,3%), IIА ст. – 12 (40,0%), IIБ ст. – 8 (26,7%), медиана ФВ ЛЖ составила 42,5 [30,8; 46,0], пациентов с низкой ФВ ЛЖ (менее 40%) - 12(40,0%), с промежуточной ФВ ЛЖ (от 40% до 49%) – 17 (56,67%), с сохраненной ФВ – 1 (3,33%). КДР - 5,4 [5,1; 6,3], КСР - 3,95 [3,7; 4,5] (Таблица 2).

У всех пациентов, включенных в группу кардиохирургических пациентов, ХСН соответствовал стадии I – 30 (100,0%). Медиана ФВ ЛЖ составила 64 [59,3;

66,8], пациентов с промежуточной ФВ ЛЖ (от 40% до 49%) – 2 (7%), с ФВ ЛЖ в пределах нормы (55% и более) - 28 (93,0%). КДР - 5,1 [4,9; 5,4], КСР - 3,4 [3,03; 3,5] (Таблица 2).

В контрольную группу включены пациенты без заболеваний сердца, что подтверждается клиническими данными, приведенными в таблице 2. Фракция выброса левого желудочка у всех пациентов $\geq 55\%$ (в пределах нормы), медиана - 65 [62; 67,5]. КДР - 4,8 [4,6; 4,97], КСР - 3,1 [3; 3,3] (Таблица 2).

2.3 Методы обследования больных

В ретроспективный анализ были включены данные клинических и инструментальных обследований, проведенных в диагностических целях в ГБУЗ Республиканский кардиологический центр МЗ Республики Башкортостан, г. Уфа.

Коронарная ангиография проводилась с использованием ангиографической рентгеновской установки **Phillips Allura**.

Механика вращательного движения сердца изучалась с помощью, разработанной нами методики, основанной на математических расчетах угла ротации по движению точек на поверхности сердца, определенных на коронарограмме в двух косых проекциях, позволяющей определить наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда (Патент на изобретение № 2679875 Российская Федерация «Способ ранней ангиографической диагностики сердечной недостаточности»).

По данным видеосъемок, сделанных при проведении КАГ, производился математический расчет угла ротации сердца по движению точек на поверхности сердца, определенных на коронарограмме в двух косых проекциях.

Исходные данные для расчета угла ротации сердца были получены в результате хронологических измерений координат точек, сделанных в серии фотографических изображений в течение сердечного цикла (систола, диастола), записанных с частотой съемки 24 кадра в 1 секунду.

Угол ротации сердца (φ) рассчитывался специально разработанной программой для ЭВМ на основании занесенных в файл результатов хронологических измерений.

Электрокардиограмма регистрировалась в покое, в 12 отведениях на кардиографе **SCHILLER**.

Были проанализированы следующие патологические изменения ЭКГ:

- патологический зубец Q;
- блокада левой ножки или передней ветви левой ножки пучка Гиса;
- признаки гипертрофии миокарда ЛЖ;
- неспецифические изменения сегмента ST-T или волны T;
- длительность интервала QRS более 0,12 м/сек;
- длительность скорректированного интервала QT более 440 м/сек для мужчин и более 450 для женщин.

Трансторакальная эхокардиография выполнялась на сканере **Philips IE 33**.

Учитывались следующие параметры:

- диаметр аорты, легочного ствола;
- наличие признаков кальциноза стенок аорты, структур сердца;
- размеры, объемы и индексы в пересчете на площадь поверхности тела желудочков и предсердий;
- толщина стенок сердца;
- фракция выброса левого желудочка по методу Simpson;
- показатель интеграла линейной скорости кровотока в выносящем отделе левого желудочка (VTI ВТЛЖ);
- наличие стенозирования клапанов сердца по максимальному и среднему градиенту, а также площадь открытия клапанов;
- наличие клапанной недостаточности;
- наличие дополнительных ЭХО-структур в полостях сердца;
- наличие дефектов перегородок сердца, иных аномальных потоков при доплерографии;

- скорости раннего (Е) и предсердного (А) наполнения ЛЖ;
- признаки легочной гипертензии;
- определение градиента трикуспидальной недостаточности и учет диаметра и коллабирования на вдохе нижней полой вены.

Глобальная продольная деформация миокарда определялась методом **Speckle-tracking ЭхоКГ** на Philips.

За нормальное среднее значение продольной глобальной деформации принимались показатели, рекомендованные для приборов фирмы Phillips ($18,9 \pm 2,5\%$) [141].

2.4 Статистический анализ данных

Собранный материал вносили в общую научную таблицу, где каждому наблюдению (пациенту) соответствовала одна-единственная строка, содержащая 56 столбцов с полученными значениями. В научную карту включены следующие показатели: номер коронарограммы, дата рождения, пол, диагноз, данные координат точек для расчета угла ротации, данные углов косых проекций, радиусы сердца, угол ротации, КДР, КСР, фракция выброса, степень поражения коронарных артерий, степень поражения клапанов, стадия ХСН, наличие гипертонической болезни (ГБ), стадия гипертонической болезни, наличие ИБС, электрическая ось сердца (ЭОС), наличие зон акинеза, гипокинеза, наличие гипертрофии левого желудочка.

Оформленный таким образом материал позволил производить статистическую обработку, включая сравнения зависимых и независимых групп, корреляционный анализ, нелинейное оценивание.

Статистическая обработка результатов исследования проводилась с использованием программных пакетов MS Excel 2010, R и StatTech v. 2.8.8. Использовались: ранговый критерий Крускала-Уоллиса, непарный двухвыборочный критерий Уилкоксона, корреляционный анализ по Спирмену (оценивали коэффициент корреляции r и уровень достоверности корреляционного уравнения). Для оценки диагностической значимости количественных признаков

при прогнозировании определенного исхода применялся метод анализа ROC-кривых. Разделяющее значение количественного признака в точке cut-off определялось по наивысшему значению индекса Юдена.

ГЛАВА 3 ОЦЕНКА МЕХАНИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СЕРДЦА ПО ДАННЫМ КОРОНАРНОЙ АНГИОГРАФИИ

3.1 Методика оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии

Разработанная нами методика оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии достигается путем получения математического описания трехмерной картины процессов скручивания и сокращения сердца по радиусу и оси при сжатии и расслаблении сердца с помощью коронарной ангиографии в двух проекциях. Новая методика основана на математических расчетах угла ротации по движению точек, определенных на поверхности сердца (Рисунок 4, 5).

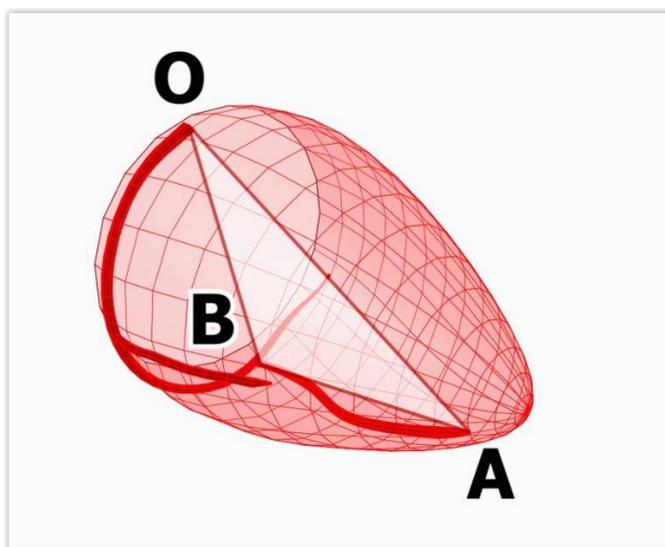


Рисунок 4 – Вращение сердца вокруг оси
(систола).

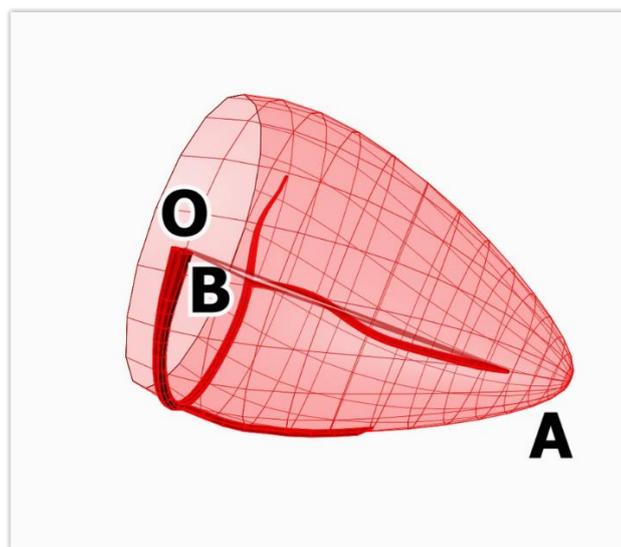


Рисунок 5 - Вращение сердца вокруг оси
(диастола).

Условно неподвижные точки: O - устье правой коронарной артерии, A - верхушка сердца. Точки O и A определяют ось сердца, которая проходит через аорту и верхушку. Третья точка B (амплитудная и равноудалённая от точек O и A) выбирается на правой коронарной артерии в месте разделения ПКА.

Для получения трехмерной картины процесса ротации сердца по радиусу и оси (при сжатии и расслаблении сердца) производилась киносъемка в двух косых проекциях.

Исходными данными для расчета кинематических параметров сердца являются хронологические измерения координат точек, сделанных в серии фотографических изображений в течение сердечного цикла. Для фотографирования использовалось встроенное в ангиографическую установку записывающее устройство с частотой съемки 24 кадра в 1 секунду (Рисунок 6, 7, 8, 9).

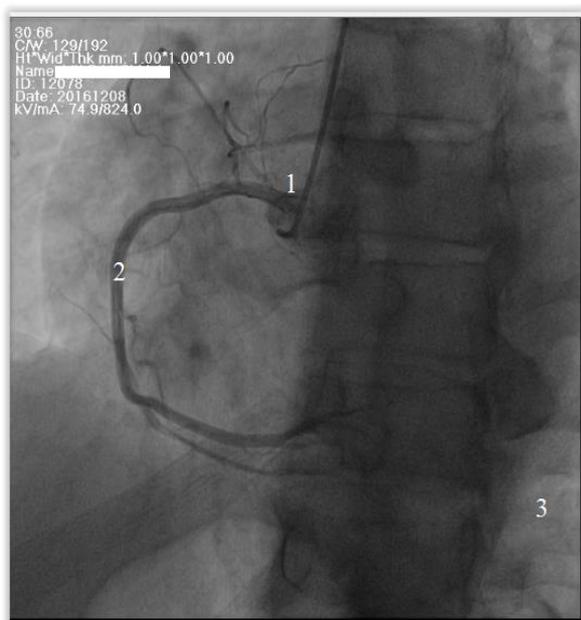


Рисунок 6 - Первая косая проекция
(систола).

Координаты точек: **1** – xO, yO; **2** – xB, yB;
3 – xA, yA.

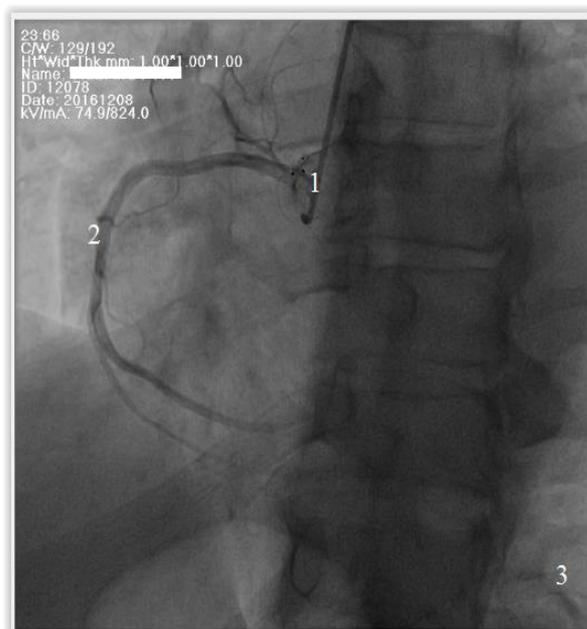


Рисунок 7 - Первая косая проекция
(диастола).

Координаты точек: **1** – xO, yO; **2** – xB, yB;
3 – xA, yA.

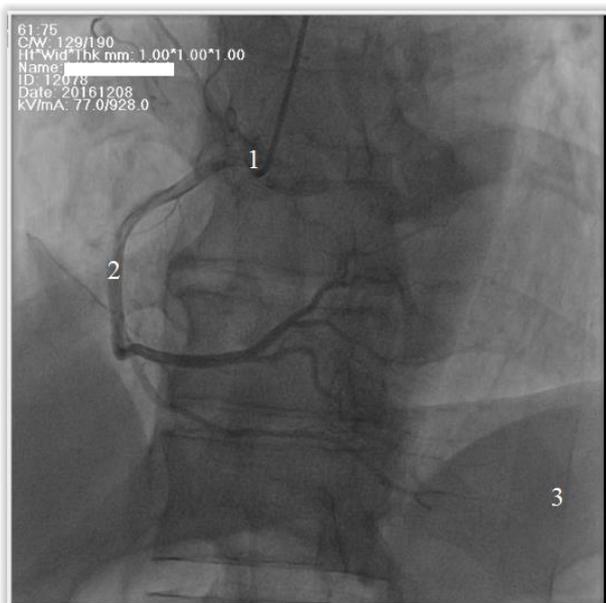


Рисунок 8 - Вторая косая проекция
(систола).

Координаты точек: **1** – x_O, y_O ; **2** – x_B, y_B ;
3 – x_A, y_A .

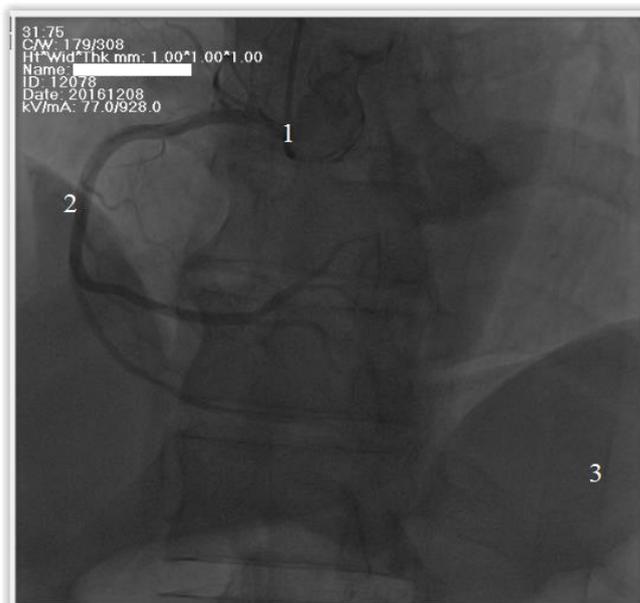


Рисунок 9 - Вторая косая проекция
(диастола).

Координаты точек: **1** – x_O, y_O ; **2** – x_B, y_B ;
3 – x_A, y_A .

На полученных изображениях выбираются координаты точек в систолу и диастолу. Координаты условно неподвижных точек сердца: $O(x, y)$ – устье правой коронарной артерии (ПКА), $A(x, y)$ - координаты точек на верхушке сердца; $B(x, y)$ - на ПКА в начальный и конечный моменты времени t_1 и t_2 на косых проекциях.

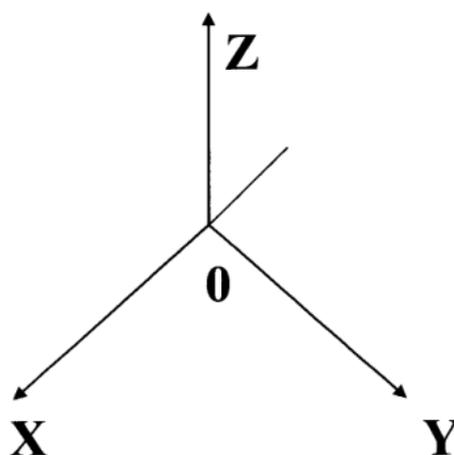


Рисунок 10 - Расположение осей базовой системы координат.

Расчеты всех геометрических и кинематических параметров сердца ведутся в некоторой базовой системе прямоугольных декартовых координат $OXYZ$. При этом принято, что ось OX проходит по срединной линии аорты до верхушки сердца. Ось OY проходит через центр фиброзного кольца, перпендикулярно оси OX , а ось OZ - перпендикулярно осям OX и OY , так, что образует с ними «левую тройку векторов» (Рисунок 10).

Следует отметить, что выбираемые прямоугольные системы координат не влияют на результаты расчетов параметров сердца.

Для получения трехмерной картины процесса ротации сердца по радиусу и оси (при сжатии и расслаблении сердца) производится киносъемка камерой в двух косых проекциях.

1. Первая косая проекция с углами съемки α и β (система координат $Ox_{\alpha_1\beta_1}y_{\alpha_1\beta_1}z_{\alpha_1}$), $\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq 90^\circ$; $\beta_1 \neq \beta_2 \neq 90^\circ$. Угол α отсчитывается в положительном направлении, то есть против часовой стрелки, от оси OZ в вертикальной плоскости YOZ , а угол β - от оси OX в положительном направлении в вертикальной плоскости XOZ (Рисунок 11).

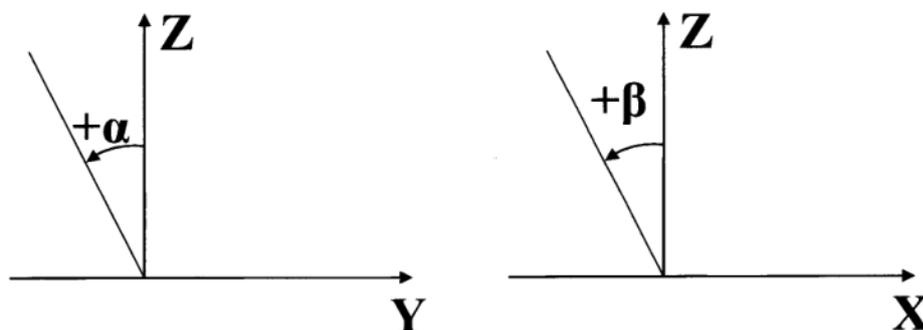


Рисунок 11 - Знаки углов съемки сердца для получения косых проекций.

2. Какая-нибудь другая косая проекция (система координат, $OX_{\alpha_2\beta_2}Y_{\alpha_2\beta_2}Z_{\alpha_2}$), получаемая под углом $\alpha_2 \neq \alpha_1 \neq 90^\circ$ к оси OZ в плоскости YOZ и под любым углом β к оси OX в плоскости XOY (Рисунок 11).

Исходными данными для расчета угла ротации сердца являются:

1) координаты условно неподвижных точек сердца $O_1(X_{O\alpha_1\beta_1}, Y_{O\alpha_1\beta_1})$ и $O_2(X_{O\alpha_2\beta_2}, Y_{O\alpha_2\beta_2})$ на косых проекциях;

2) координаты точек на верхушке $A_1(X_{O\alpha_1\beta_1}, Y_{O\alpha_1\beta_1})$ и $A_2(X_{O\alpha_2\beta_2}, Y_{O\alpha_2\beta_2})$ на косых проекциях;

3) координаты точек $B1_{\alpha_1\beta_1}(X_{B1\alpha_1\beta_1}, Y_{B1\alpha_1\beta_1})$, $B2_{\alpha_1\beta_1}(X_{B2\alpha_1\beta_1}, Y_{B2\alpha_1\beta_1})$ и $B1_{\alpha_2\beta_2}(X_{B1\alpha_2\beta_2}, Y_{B1\alpha_2\beta_2})$, $B2_{\alpha_2\beta_2}(X_{B2\alpha_2\beta_2}, Y_{B2\alpha_2\beta_2})$ на правой коронарной артерии (ПКА) в начальный и конечный моменты времени t_1 и t_2 на косых проекциях,

Расчет угла ротации сердца проводится в следующем порядке.

Пересчитываются координаты точек $O_{\alpha_1\beta_1}(x_{O\alpha_1\beta_1}, y_{O\alpha_1\beta_1})$, $O_{\alpha_2\beta_2}(x_{O\alpha_2\beta_2}, y_{O\alpha_2\beta_2})$, $A_{\alpha_1\beta_1}(x_{A\alpha_1\beta_1}, y_{A\alpha_1\beta_1})$, $A_{\alpha_2\beta_2}(x_{A\alpha_2\beta_2}, y_{A\alpha_2\beta_2})$, $B1_{\alpha_1\beta_1}(x_{B1\alpha_1\beta_1}, y_{B1\alpha_1\beta_1})$, $B2_{\alpha_1\beta_1}(x_{B2\alpha_1\beta_1}, y_{B2\alpha_1\beta_1})$, $B1_{\alpha_2\beta_2}(x_{B1\alpha_2\beta_2}, y_{B1\alpha_2\beta_2})$ и $B2_{\alpha_2\beta_2}(x_{B2\alpha_2\beta_2}, y_{B2\alpha_2\beta_2})$ из систем координат $OX_{\alpha_1\beta_1}Z_{\alpha_1\beta_1}$ и $OX_{\alpha_2\beta_2}Z_{\alpha_2\beta_2}$ в системы координат $OX_{\alpha_1}Z_{\alpha_1}$ и $OX_{\alpha_2}Z_{\alpha_2}$ по формулам, вывод которых приведен ниже.

Расчет координат x_0 и z_α некоторой точки в системе координат OXZ_α .

Из рисунка 12 видно, что $OR = x_0$; $OM = x_{\beta_1}$, $OH = x_{\beta_2}$.

1) Из $\triangle OAR$: $OA = \frac{OR}{\cos \beta_1} = \frac{x_0}{\cos \beta_1}$; (1) $\frac{AR}{OR} = \frac{AR}{x_0} = \operatorname{tg} \beta_1$, т.е. $AR = x_0 \operatorname{tg} \beta_1$ (2),

2) Из

$\triangle OBR$: $OB = \frac{OR}{\cos \beta_2} = \frac{x_0}{\cos \beta_2}$; (3) $\frac{BR}{OR} = \frac{BR}{x_0} = \operatorname{tg} \beta_2$, т.е. $BR = x_0 \operatorname{tg} \beta_2$ (4),

$$3) \quad AM = OM - OA = x_{\beta_1} - \frac{x_0}{\cos \beta_1} \quad (5)$$

$$4) \quad BH = OH - OB = x_{\beta_2} - \frac{x_0}{\cos \beta_2} \quad (6)$$

$$5) \text{ Из } \triangle AMC: \frac{AM}{AC} = \sin \beta_1 \quad (7)$$

$$6) \text{ Из } \triangle BHC: \frac{BH}{BC} = \sin \beta_2 \quad (8)$$

$$7) \quad AC = RC - AR = z_\alpha - x_0 \operatorname{tg} \beta_1 \quad (9),$$

$$BC = RC - BR = z_\alpha - x_0 \operatorname{tg} \beta_2 \quad (10).$$

8) Подставляя (6) и (10) в (8), получим

$$\frac{x_{\beta_1} - \frac{x_0}{\cos \beta_1}}{z_0 - x_0 \operatorname{tg} \beta_1} = \sin \beta_1 \quad (11)$$

9) Подставляя (5) и (9) в (7), получим

$$\frac{x_{\beta_2} - \frac{x_0}{\cos \beta_2}}{z_0 - x_0 \operatorname{tg} \beta_2} = \sin \beta_2 \quad (12)$$

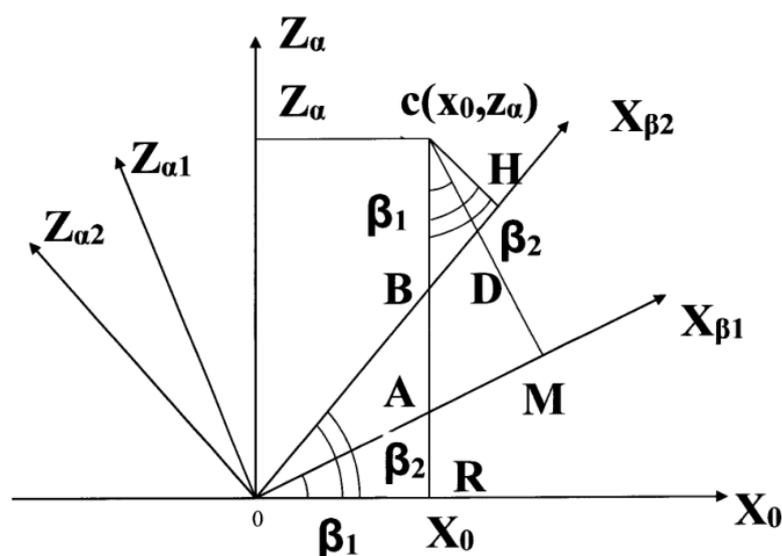


Рисунок 12 - К выводу формулы для расчета координат x_0 и z_α в системе координат OXZ_α .

10) Решая совместно систему уравнений (11) и (12), получим формулы для нахождения координат z_α и x_0

$$z_\alpha = \frac{x_{\beta_2} \cdot \cos \beta_1 - x_{\beta_1} \cdot \cos \beta_2}{\sin \beta_2 \cdot \cos \beta_1 - \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_2} \quad (14)$$

$$x_0 = \frac{x_{\beta_1} - z_\alpha \cdot \sin \beta_1}{\cos \beta_1} \quad \text{или} \quad x_0 = \frac{x_{\beta_2} - z_\alpha \cdot \sin \beta_2}{\cos \beta_2} \quad (15)$$

Итак, координаты $x_{00}, x_{A0}, x_{B10}, x_{B20}$ для точек O, A, B1 и B2 можно рассчитать по формулам:

$$\begin{aligned} x_{o0} &= \frac{x_{o\beta_1} - z_{o\alpha} \cdot \sin \beta_1}{\cos \beta_1}, & z_{o\alpha} &= \frac{x_{o\beta_2} \cdot \cos \beta_1 - x_{o\beta_1} \cdot \cos \beta_2}{\sin \beta_2 \cdot \cos \beta_1 - \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_2} \\ e \quad x_{A0} &= \frac{x_{A\beta_1} - z_{A\alpha} \cdot \sin \beta_1}{\cos \beta_1}, & z_{A\alpha} &= \frac{x_{A\beta_2} \cdot \cos \beta_1 - x_{A\beta_1} \cdot \cos \beta_2}{\sin \beta_2 \cdot \cos \beta_1 - \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_2} \\ x_{B10} &= \frac{x_{B1\beta_1} - z_{B1\alpha} \cdot \sin \beta_1}{\cos \beta_1}, & z_{B1\alpha} &= \frac{x_{B1\beta_2} \cdot \cos \beta_1 - x_{B1\beta_1} \cdot \cos \beta_2}{\sin \beta_2 \cdot \cos \beta_1 - \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_2} \\ x_{B20} &= \frac{x_{B2\beta_1} - z_{B2\alpha} \cdot \sin \beta_1}{\cos \beta_1}, & z_{B2\alpha} &= \frac{x_{B2\beta_2} \cdot \cos \beta_1 - x_{B2\beta_1} \cdot \cos \beta_2}{\sin \beta_2 \cdot \cos \beta_1 - \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_2} \end{aligned} \quad (16)$$

2. Рассчитываются координаты y_0 и z_0 точек O, A, B1 и B2 в базовой системе координат с помощью данных, измеренных в косых проекциях под углами α_1 и α_2 . Поскольку координата x в этих проекциях не изменяется, то базовые координаты x_0 искомым точек уже определены. Формулы для расчета координат y_0 (17) и z_0 (18) уже были выведены и выглядят аналогично формулам (16) с учетом того, что координата z_0 есть проекция координаты z_β на ось OZ, т.е. $z_0 = z_\alpha \cos \beta$. Итак,

$$\begin{aligned} y_{o0} &= \frac{y_{o\alpha_1} - z_{o\beta} \cdot \sin \alpha_1}{\cos \alpha_1}, & z_{o\beta} &= \frac{y_{o\alpha_2} \cdot \cos \alpha_1 - y_{o\alpha_1} \cdot \cos \alpha_2}{\sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2} \\ y_{A0} &= \frac{y_{A\alpha_1} - z_{A\beta} \cdot \sin \alpha_1}{\cos \alpha_1}, & z_{A\beta} &= \frac{y_{A\alpha_2} \cdot \cos \alpha_1 - y_{A\alpha_1} \cdot \cos \alpha_2}{\sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2} \\ y_{B10} &= \frac{y_{B1\alpha_1} - z_{B1\beta} \cdot \sin \alpha_1}{\cos \alpha_1}, & z_{B1\beta} &= \frac{y_{B1\alpha_2} \cdot \cos \alpha_1 - y_{B1\alpha_1} \cdot \cos \alpha_2}{\sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2} \end{aligned} \quad (17)$$

$$y_{B20} = \frac{y_{B2\alpha_1} - z_{B2\beta} \cdot \sin \alpha_1}{\cos \alpha_1}, \quad z_{B2\beta} = \frac{y_{B2\alpha_2} \cdot \cos \alpha_1 - y_{B2\alpha_1} \cdot \cos \alpha_2}{\sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}$$

где

$$z_{o0} = z_{o\beta} \cos \beta; \quad z_{a0} = z_{a\beta} \cos \beta; \quad z_{B10} = z_{B1\beta} \cos \beta; \quad z_{B20} = z_{B2\beta} \cos \beta,$$

(18)

где $\beta = \beta_1$ или $\beta = \beta_2$.

2. Расчет угла ротации сердца:

Для расчета пространственных геометрических параметров, таких как:

- 1) $|O_1A_1|$ - длина оси сердца от точки O_1 до точки A_1 ;
- 2) $|R_{B1}|$ - расстояние от точки B_1 до оси сердца O_1A_1 ;
- 3) φ - угол поворота радиус-вектора \vec{R}_B от точки B_1 до точки B_2 ,

использовались формулы аналитической геометрии в пространстве R^3 [123].

1. Длина оси сердца O_1A_1 рассчитывалась как расстояние между точками O_1 и A_1

$$|O_1A_1| = \sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2},$$

где $l_1 = x_{o1} - x_{A1}$, $m_1 = y_{o1} - y_{A1}$, $n_1 = z_{o1} - z_{A1}$ - координаты направляющего вектора прямой O_1A_1 .

Аналогично, длина оси сердца O_2A_2 рассчитывалась как расстояние между точками O_2 и A_2

$$|O_2A_2| = \sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2},$$

где $l_2 = x_{o2} - x_{A2}$, $m_2 = y_{o2} - y_{A2}$, $n_2 = z_{o2} - z_{A2}$ - координаты направляющего вектора прямой O_2A_2 .

2. Расстояние от точки B_1 до оси сердца O_1A_1 рассчитывалось как длина вектора $\vec{R}_{B1} = \{x_{o1} - x_{1_{oa}}, y_{o1} - y_{1_{oa}}, z_{o1} - z_{1_{oa}}\}$,

где $(x_{1_{oa}}, y_{1_{oa}}, z_{1_{oa}})$ - координаты проекции точки B_1 на прямую O_1A_1 :

$$x_{1_{oa}} = x_{o1} - p_{01} \cdot \cos \gamma_1$$

$$y_{1_{oa}} = y_{o1} - p_{01} \cdot \cos \gamma_2$$

$$z1_{oa} = z_{o1} - p_{01} \cdot \cos \gamma_3$$

$$p_{01} = \frac{l_1(x_{o1} - x_{01}) + m_1(y_{o1} - y_{01}) + n_1(z_{o1} - z_{01})}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}},$$

где

$$\cos \gamma_1 = \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}; \quad \cos \gamma_2 = \frac{m_1}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}; \quad \cos \gamma_3 = \frac{n_1}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}$$

Аналогично, расстояние от точки B_2 до оси сердца O_2A_2 рассчитывалось как

$$\text{длина вектора } \bar{R}_{B2} = \{x_{02} - x_{2_{oa}}, y_{02} - y_{2_{oa}}, z_{02} - z_{2_{oa}}\},$$

где $(x_{2_{oa}}, y_{2_{oa}}, z_{2_{oa}})$ - координаты проекции точки B_2 на прямую O_2A_2 :

$$x_{2_{oa}} = x_{02} - p_{01} \cdot \cos \gamma_{12}$$

$$y_{2_{oa}} = y_{02} - p_{01} \cdot \cos \gamma_{22}$$

$$z_{2_{oa}} = z_{02} - p_{01} \cdot \cos \gamma_{32}$$

$$p_{02} = \frac{l_2(x_{o2} - x_{02}) + m_2(y_{o2} - y_{02}) + n_2(z_{o2} - z_{02})}{\sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}},$$

где

$$\cos \gamma_{12} = \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}}; \quad \cos \gamma_{22} = \frac{m_2}{\sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}}; \quad \cos \gamma_{32} = \frac{n_2}{\sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}}$$

3. Угол поворота радиуса-вектора \bar{R}_B от точки B_1 до точки B_2 ,

В пункте 2 были найдены координаты радиусов-векторов точек B_1 и B_2

$$\bar{R}_{B1} = \{x_{01} - x_{1_{oa}}, y_{01} - y_{1_{oa}}, z_{01} - z_{1_{oa}}\} = \{x_{1R}, y_{1R}, z_{1R}\}$$

$$\bar{R}_{B2} = \{x_{02} - x_{2_{oa}}, y_{02} - y_{2_{oa}}, z_{02} - z_{2_{oa}}\} = \{x_{2R}, y_{2R}, z_{2R}\}$$

Тогда угол ротации сердца есть угол между двумя векторами в пространстве, который находится по формуле

$$\varphi = \arccos \frac{x_{1R} \cdot x_{2R} + y_{1R} \cdot y_{2R} + z_{1R} \cdot z_{2R}}{\left| \bar{R}_{B1} \right| \cdot \left| \bar{R}_{B2} \right|} \text{ [град.]}$$

Сущность методики поясняется следующими клиническими примерами.

Пример 1. Пациенту П. в условиях рентгеноперационной выполнена коронарная ангиография. Для оценки угла ротации взяты две точки по указанной

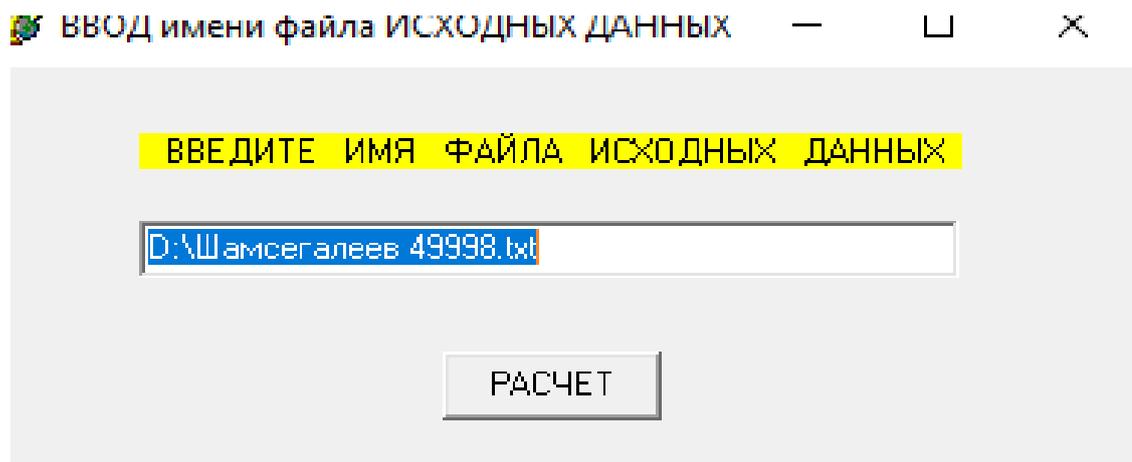
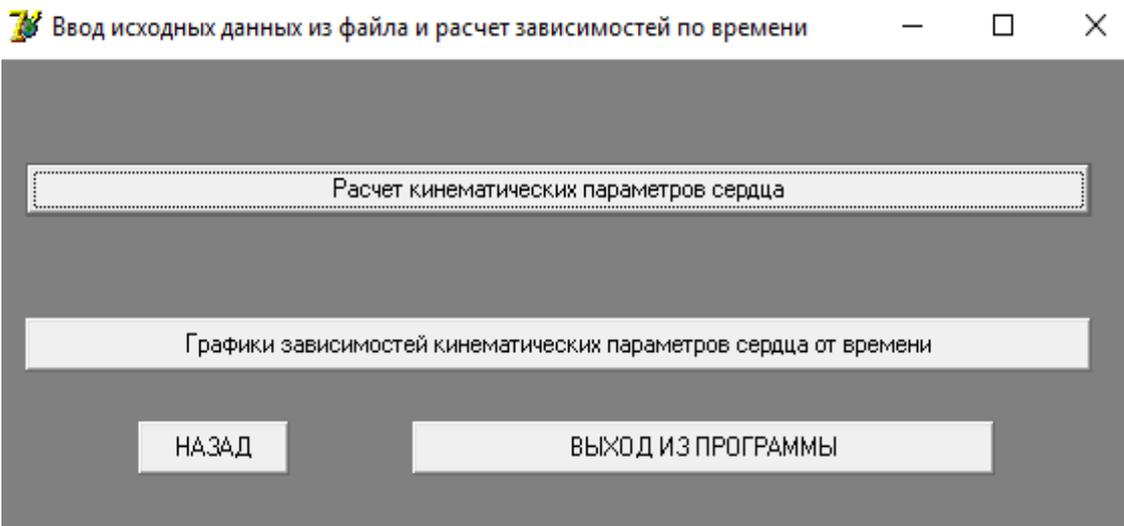
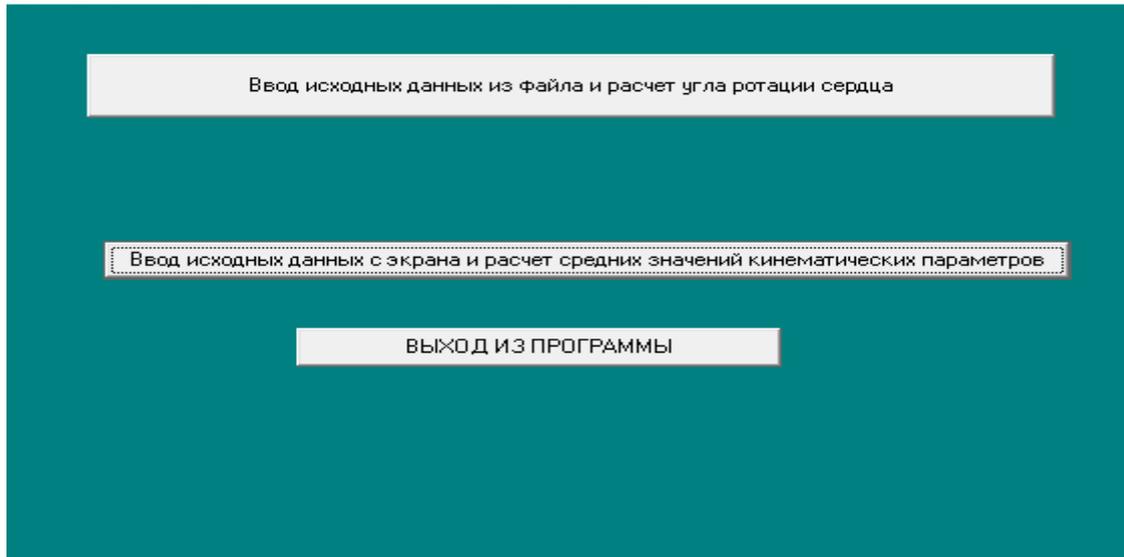
методике. По расчетной формуле получен угол ротации [град]=1.51, что значительно меньше, чем пороговое значение угла ротации сердца – 9,9. Полученное низкое значение угла ротации сердца указало на наличие у пациента нарушения сократительной способности миокарда. Данные трансторакальной ЭхоКГ подтвердили у пациента наличие выраженного нарушения сократительной способности миокарда (КДР - 7.1 см, КСР - 6 см, ФВ ЛЖ - 27%).

Пример 2. Пациентке А. в условиях рентгеноперационной проведена коронарная ангиография. Для оценки угла ротации взяты две точки в двух косых проекциях. По расчетной формуле получен угол ротации сердца [град]=11.68, что больше, чем пороговое значение угла ротации сердца – 9,9. Полученное значение угла ротации указало на отсутствие у пациента нарушения сократительной способности миокарда. Данные трансторакальной ЭхоКГ (КДР - 4.6 см, КСР - 3.2 см, ФВ ЛЖ - 64%) подтвердили отсутствие нарушения сократительной способности миокарда у данного пациента.

Таким образом, разработанная методика оценки механики вращательного движения сердца, основанная на математических расчетах угла ротации по движению точек на поверхности сердца, определенных на коронарограмме в двух косых проекциях, дает возможность определить наличие или отсутствие нарушений сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля. Критерием оценки сократительной способности миокарда у обследуемых пациентов является показатель угла ротации сердца (φ).

3.2 Компьютерная программа автоматического расчета показателей механики вращения сердца на основании данных коронарной ангиографии

Расчет кинематических параметров вращения сердца производился автоматически с помощью специальной программы для ЭВМ на основании занесенных в файл результатов измерений, полученных во время проведения коронарной ангиографии (Рисунок 13).

 Программа расчета кинематических параметров сердца

Information

Угол ротации [град] $\varphi_i = 1,83$

OK

Patient name 5 58109 ДКМП (ПКА)
 число точек=
 2
 КОСАЯ ПРОЕКЦИЯ
 альфа [град]
 27
 бета [град]
 -1.35
 время начала ротации t1[сек]
 0
 время конца ротации t2[сек]
 0.924
 Координаты точек A, Q, B [ПКА]

xA	yA	xQ	yQ	xB	yB
556	584	338	171	104	194
539	577	332	192	131	220

КОСАЯ ПРОЕКЦИЯ
 альфа [град]
 18.23
 бета [град]
 17.17
 время начала ротации t1[сек]
 0
 время конца ротации t2[сек]
 0.924
 Координаты точек A, Q, B [ПКА]

xA	yA	xQ	yQ	xB	yB
560	582	285	143	77	159
528	556	280	170	118	217

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ:

"РАДИУСЫ" СЕРДЦА [усл.ед]:

 $R[1]=306.6$ $R[2]=280.3$ Угол ротации [град] $\varphi_i = 3.84$ Средняя линейная скорость ротации по радиусу [ед/с]:
-14.26Средняя линейная скорость ротации по оси [ед/с]:
9.83Средняя угловая скорость ротации [град/с]:
4.16

Рисунок 13 - Расчеты кинематических параметров сердца.

Таким образом, компьютерная программа автоматического расчета угла ротации сердца на основании занесенных в файл результатов измерений, полученных во время проведения коронарной ангиографии, повышает оперативность получения результатов исследований, необходимых для

определения тактики дальнейшего дообследования и лечения кардиохирургических пациентов.

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

4.1 Диагностическая значимость нового параметра – «угла ротации сердца» – для оценки сократительной способности миокарда

Основной диагностической целью новой методики оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии является количественное определение угла ротации сердца и эффективное разделение на его основе пациентов без и с признаками нарушения сократительной способности миокарда.

Величину оптимального порогового значения угла ротации сердца для разделения лиц без и с наличием нарушения сократительной способности миокарда определяли с помощью методики анализа ROC-кривых. Разделяющее пороговое значение в точке cut-off определялось по наивысшему значению индекса Юдена. Об эффективности разделения судили по величине показателей чувствительности (Se), % и специфичности (Sp), %.

Был проведен анализ угла ротации сердца в зависимости от показателя "Отсутствие нарушения сократительной функции миокарда" (Таблица 3). Данные анализа в графическом виде представлены на рисунке 14.

Таблица 3 - Анализ угла ротации сердца в зависимости от показателя "Отсутствие нарушения сократительной способности миокарда"

Показатель	Категории	Угол ротации			p
		Me	Q ₁ – Q ₃	N	
Отсутствие нарушения сократительной способности миокарда	Да	11	10 – 12	30	< 0,001*
	Нет	5	3 – 7	90	

Условные обозначения и примечания: φ (град.) – угол ротации сердца, измеряется в градусах.
*– различия показателей статистически значимы (p < 0,001)

При сравнении угла ротации в зависимости от показателя "Отсутствие нарушения сократительной способности миокарда" были выявлены статистически значимые различия ($p < 0,001$) (используемый метод: *U-критерий Манна-Уитни*).

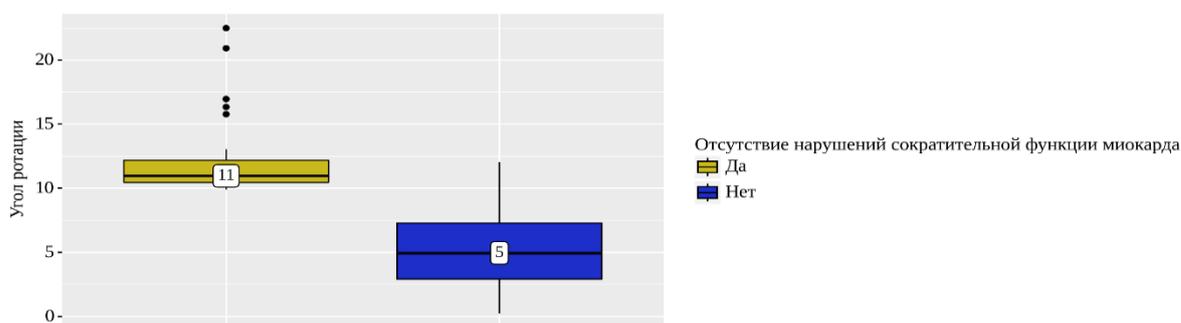


Рисунок 14 - Анализ угла ротации сердца в зависимости от показателя "Отсутствие нарушения сократительной способности миокарда".

При оценке зависимости вероятности отсутствия нарушения сократительной функции миокарда от угла ротации сердца с помощью ROC-анализа была получена следующая кривая (Рисунок 15).

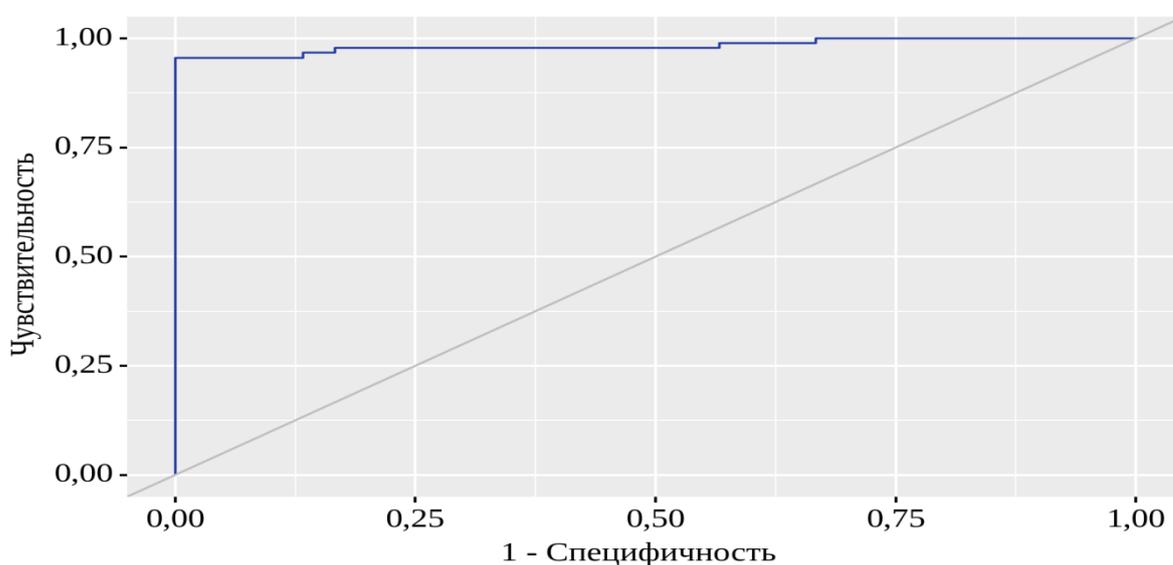


Рисунок 15 - ROC-кривая, характеризующая зависимость вероятности показателя "Отсутствие нарушения сократительной способности миокарда" от угла ротации сердца.

Площадь под ROC-кривой составила $0,983 \pm 0,017$ с 95% ДИ: 0,950 – 1,000. Полученная модель была статистически значимой ($p < 0,001$).

Пороговое значение угла ротации в точке cut-off, которому соответствовало наивысшее значение индекса Юдена, составило 9,910 (Таблица 4). Наличие нарушений сократительной функции миокарда прогнозировалось при значении угла ротации сердца ниже данной величины. Чувствительность и специфичность модели составили 95,6% и 100,0% соответственно (Рисунок 16).

Таблица 4 - Пороговые значения угла ротации сердца

Порог	Чувствительность (Se), %	Специфичность (Sp), %	PPV	NPV
11	97,8	53,3	86,3	88,9
10	97,8	73,3	91,7	91,7
10	97,8	80,0	93,6	92,3
10	97,8	83,3	94,6	92,6
10	96,7	83,3	94,6	89,3
10	96,7	86,7	95,6	89,7
10	95,6	86,7	95,6	86,7
10	95,6	100,0	100,0	88,2
6	58,9	100,0	100,0	44,8
6	56,7	100,0	100,0	43,5

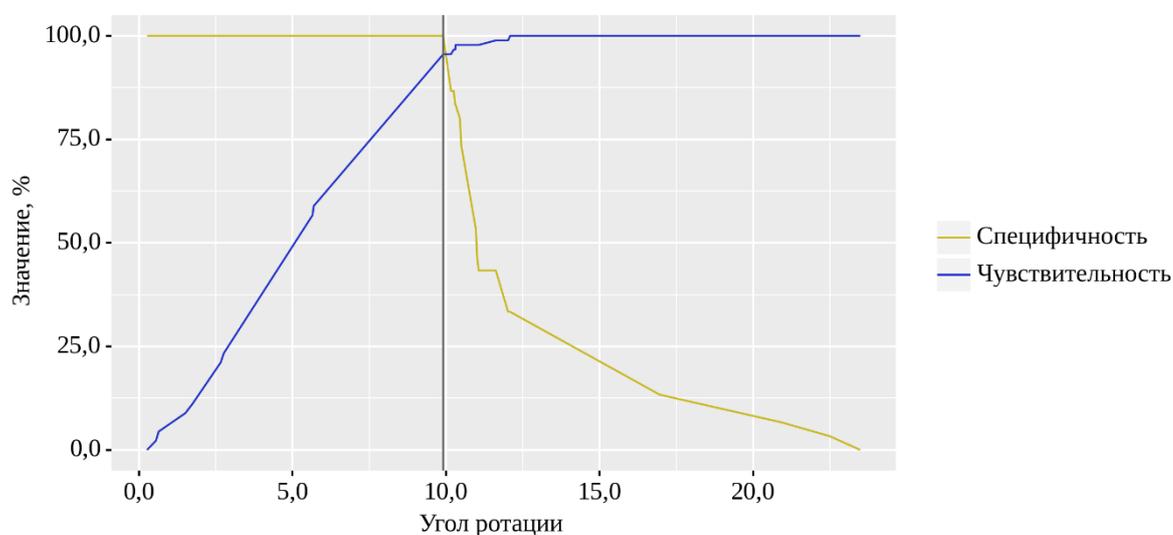


Рисунок 16 - Анализ чувствительности и специфичности модели в зависимости от пороговых значений угла ротации сердца

Таким образом, значение угла ротации сердца, определяемое при проведении КАГ по разработанной нами методике оценки механики вращательного движения сердца, можно рассмотреть в качестве диагностического критерия для определения наличия или отсутствия нарушения сократительной способности миокарда. Если φ [град.] $\geq 9,9$ (пороговое значение угла ротации), то определяется отсутствие нарушения сократительной способности миокарда, если φ [град.] $< 9,9$ (пороговое значение угла ротации), то определяется наличие нарушения сократительной способности миокарда.

4.2 Результаты изучения механики вращательного движения сердца у пациентов кардиохирургического профиля

С помощью разработанной методики оценки механики вращательного движения сердца произведен расчет угла ротации сердца у пациентов с ДКМП, АЛЖ, с протезированными клапанами сердца и контрольной группы. Показатели угла ротации сердца φ (град.) и показатели ФВ ЛЖ у пациентов с ДКМП, АЛЖ, протезированными клапанами сердца и контрольной группы представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Показатели угла ротации сердца и ФВ ЛЖ у пациентов с ДКМП, АЛЖ, кардиохирургических пациентов и контрольной группы (Me [q1; q3])

Группы	Угол ротации сердца, φ (град.)	Фракция выброса левого желудочка, %
ДКМП (n=30)	4,41 [3,1; 5,8]	30 [27; 33,8]
АЛЖ (n=30)	5,91 [3,4; 7,7]	42,5 [30,8; 46]
*Кардиохирургические пациенты (n=30)	5,09 [2,7; 8,7]	64 [51; 66,8]
**Контрольная группа (n=30)	10,97 [10,5; 12,2]	65 [62; 67,5]
Условные обозначения и примечания: φ (град.) – угол ротации сердца * - с протезированными клапанами сердца ** - пациенты без заболеваний сердца		

В таблице 6 и на рисунке 17 представлено сравнение показателя угла ротации сердца у пациентов с ДКМП, АЛЖ и контрольной группы

Таблица 6 - Сравнение показателя угла ротации сердца у пациентов с ДКМП, АЛЖ и контрольной группы

Сравнение показателя угла ротации сердца пациентов исследуемых групп	
Сравниваемые группы	Уровень статистической значимости
ДКМП – контрольная группа	($p < 0,001$)
АЛЖ – контрольная группа	($p < 0,001$)
ДКМП – АЛЖ	($p = 0,59$)

Медиана показателя угла ротации сердца у пациентов с ДКМП составила 4,41 [3,1; 5,8], у пациентов с АЛЖ - 5,91 [3,4; 7,7], у пациентов контрольной группы - 10,97 [10,5; 12,2] (Таблица 5). При анализе выявлено, что угол ротации сердца у пациентов с ДКМП статистически значимо ниже ($p < 0,001$), чем у пациентов контрольной группы. У пациентов с АЛЖ показатель угла ротации сердца также статистически значимо ниже ($p < 0,001$), чем у пациентов без заболеваний сердца (Таблица 6).

У пациентов с ДКМП снижение угла ротации сердца значительнее, чем у пациентов с АЛЖ, и это является логичным, поскольку в группу с ДКМП были включены пациенты с более выраженной сердечной недостаточностью. Но при сравнении групп пациентов с ДКМП и АЛЖ между собой статистически значимых различий показателя угла ротации сердца не выявлено ($p = 0,59$, таблица 6).

Из таблицы 5 видно, что медиана показателя ФВ ЛЖ по данным ЭхоКГ у пациентов с ДКМП составила 30 [27; 33,8], у пациентов с АЛЖ – 42,5 [30,8; 46], у пациентов контрольной группы - (65 [62; 67,5]).

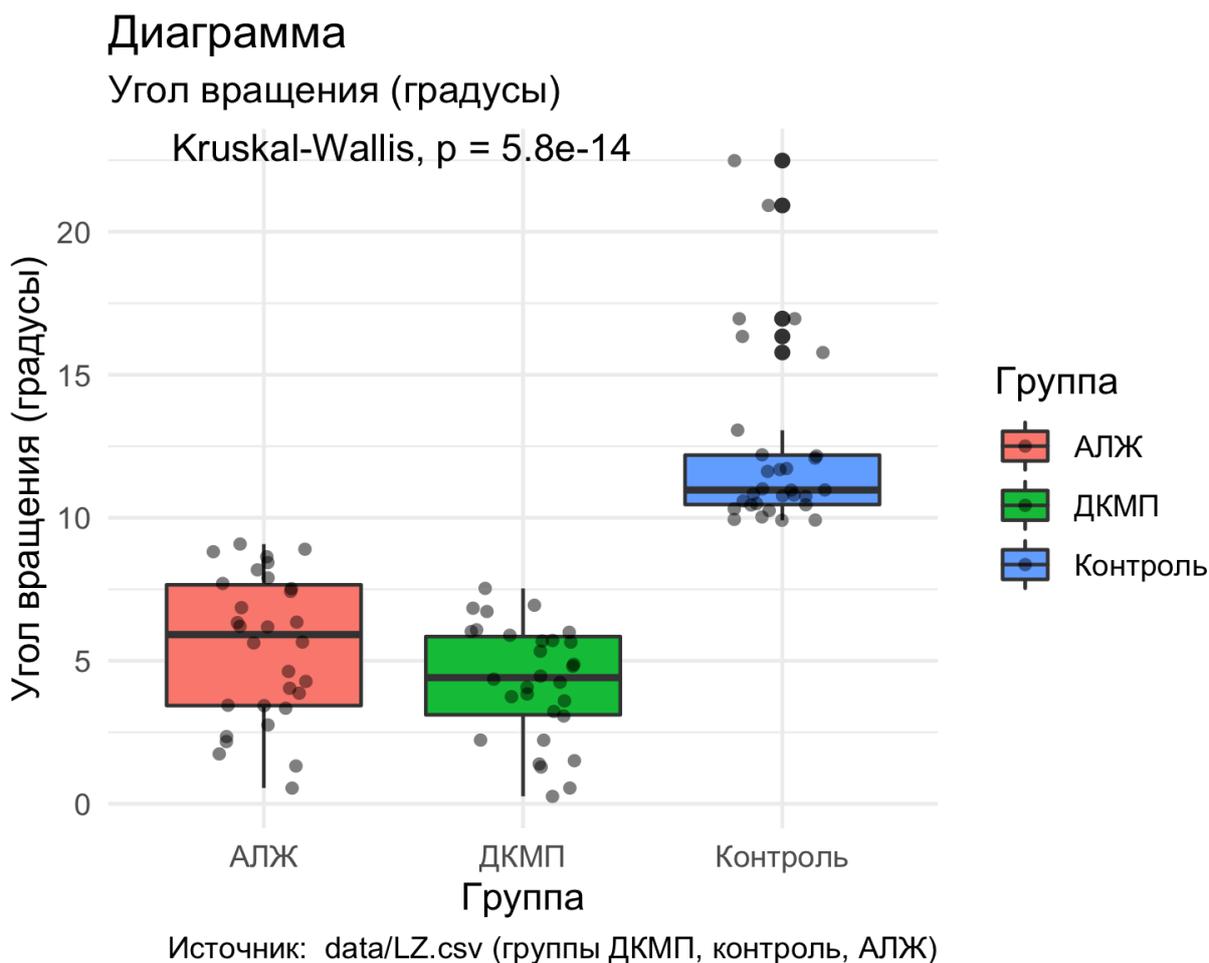


Рисунок 17 - Диаграмма сравнения показателей угла ротации сердца у пациентов с ДКМП, АЛЖ и контрольной группы.

Сравнение показателя ФВ ЛЖ у пациентов с ДКМП, АЛЖ и контрольной группы представлены в таблице 7 и на рисунке 18.

Таблица 7 - Сравнение показателя ФВ ЛЖ у пациентов с ДКМП, АЛЖ и контрольной группы

Сравнение показателя ФВ ЛЖ у пациентов исследуемых групп	
Сравниваемые группы	Уровень статистической значимости
ДКМП – контрольная группа	($p < 0,001$)
АЛЖ – контрольная группа	($p < 0,001$)
ДКМП – АЛЖ	($p < 0,001$)

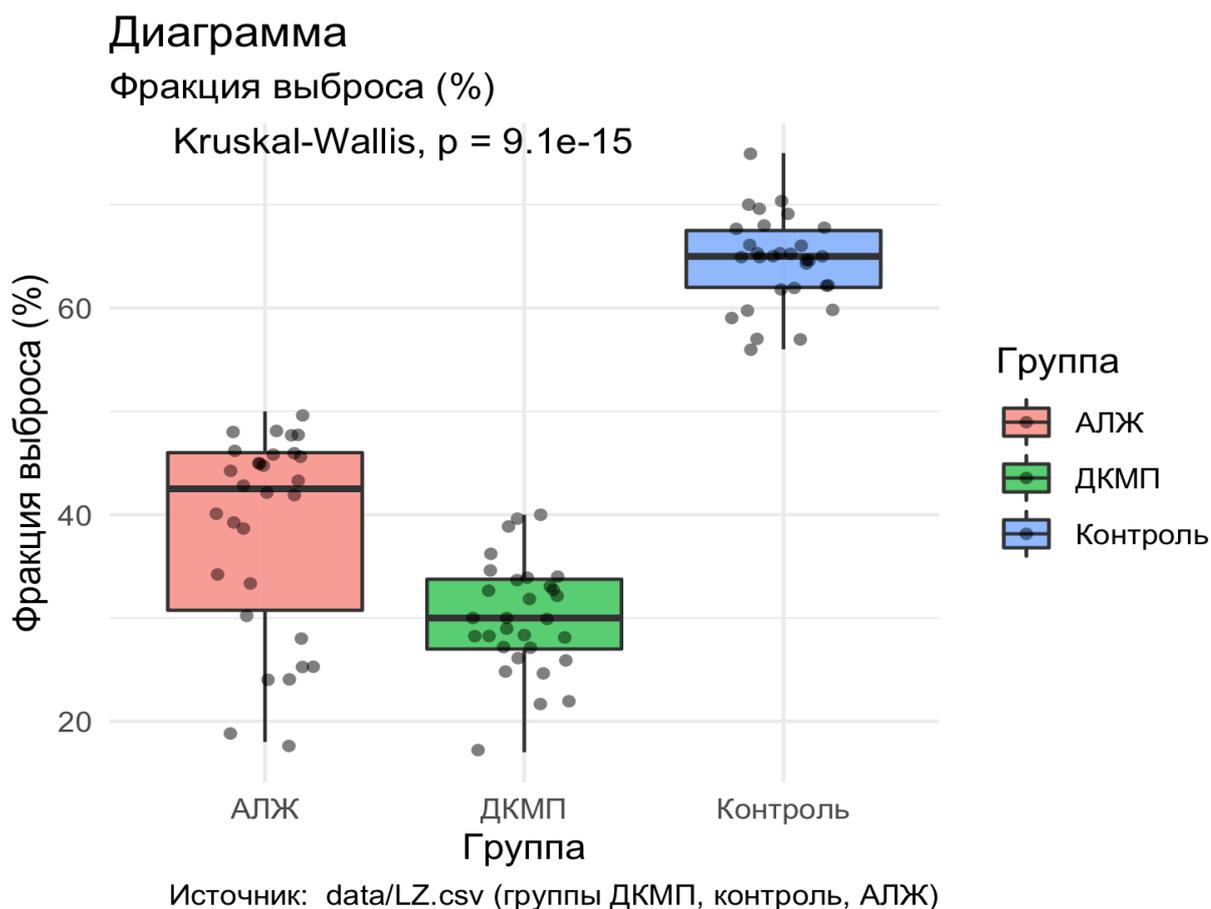


Рисунок 18 - Диаграмма сравнения показателя ФВ ЛЖ у пациентов с DKMP, ALJ и контрольной группы.

При сравнении групп выявлено, что ФВ ЛЖ у пациентов с DKMP статистически значимо ниже ($p < 0,001$), чем у пациентов контрольной группы. У пациентов с ALJ показатель ФВ ЛЖ также статистически значимо ниже ($p < 0,001$), чем у пациентов без заболеваний сердца (Таблица 7). При сравнении групп пациентов с DKMP и ALJ между собой выявлены статистически значимые различия показателя ФВ ЛЖ ($p = 0,59$, таблица 7), что обусловлено преобладанием в группе DKMP пациентов с более выраженным снижением ФВ ЛЖ. У пациентов с DKMP медиана ФВ ЛЖ составила 30 [27; 33,8], в том числе пациентов с низкой ФВ ЛЖ ($< 40\%$) – 93,0 %, с промежуточной ФВ ЛЖ (40-49%) - 7,0 %. У пациентов, включенных в группу ALJ медиана ФВ ЛЖ составила 42,5 [30,8; 46,0], в том числе пациентов с низкой ФВ ЛЖ ($< 40\%$) - 40,0%, с промежуточной ФВ ЛЖ (40-49%) - 56,67%, с сохраненной ФВ ЛЖ (50-54%) – 3,33% (Таблица 2).

При анализе корреляционных взаимоотношений между углом ротации сердца, рассчитанным по данным КАГ и ФВ ЛЖ, полученным по данным ЭхоКГ, у пациентов с ДКМП, АЛЖ и контрольной группы выявлена сильная прямая корреляционная связь ($r = 0,8$, $p < 0,001$). Данные анализа в графическом виде представлены на рисунке 19.

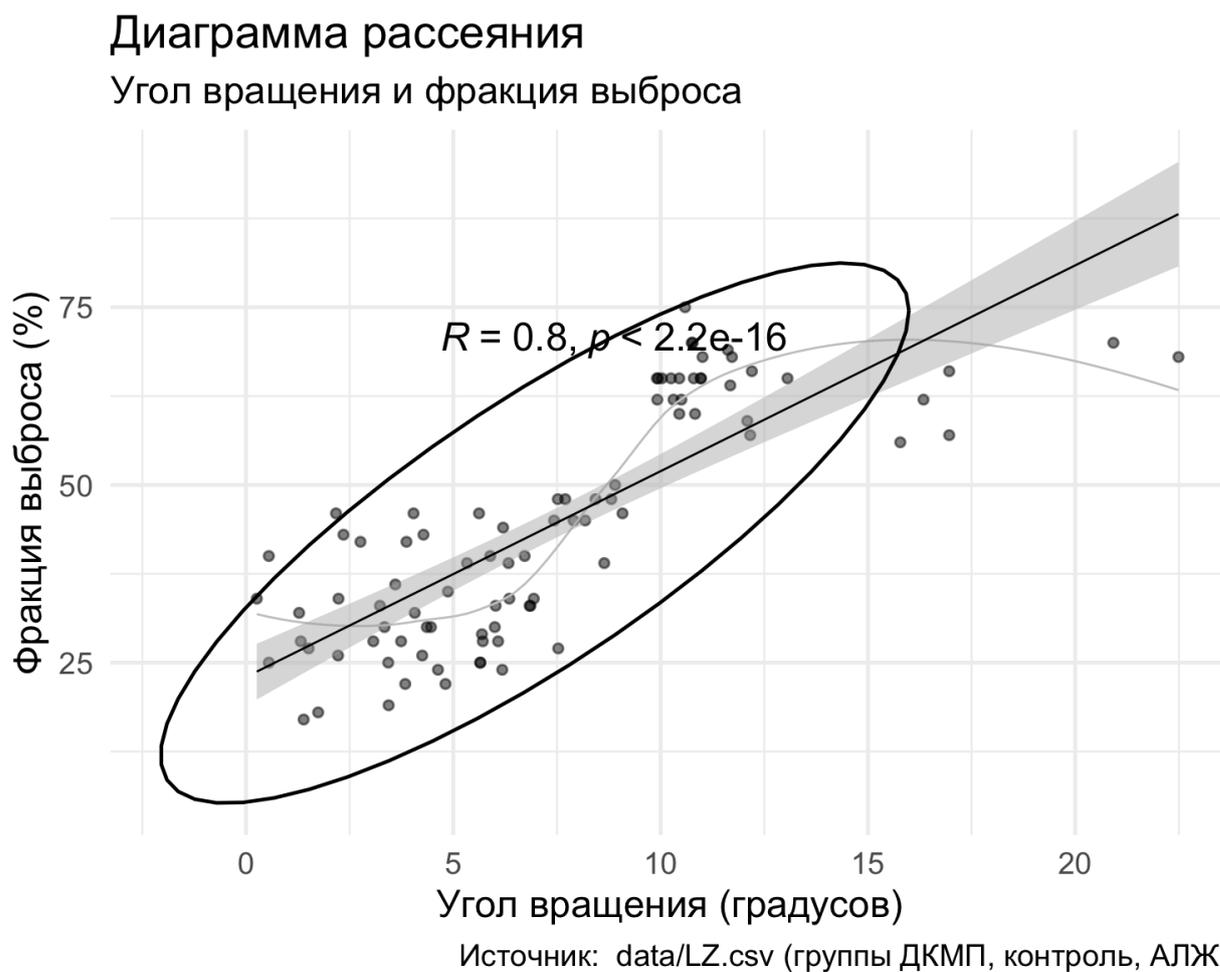


Рисунок 19 - Корреляционные взаимоотношения между углом ротации сердца и ФВ ЛЖ у пациентов с ДКМП, АЛЖ и контрольной группы.

Таким образом, угол ротации сердца у пациентов с ДКМП и АЛЖ статистически значимо ниже, чем у пациентов без заболеваний сердца ($p < 0,001$), что указывает на наличие у них нарушения сократительной способности миокарда. Выявлена сильная прямая корреляционная связь между углом ротации сердца и ФВ ЛЖ у пациентов с ДКМП, АЛЖ и контрольной группы ($r = 0,8$, $p < 0,001$). Показатель угла ротации сердца ниже порогового значения

свидетельствует о наличии нарушения сократительной способности миокарда у пациентов с ДКМП и АЛЖ.

В группе кардиохирургических пациентов, в которую были включены 26 человек (86,7%) после протезирования аортального клапана и 4 (13,3%) человека после протезирования митрального клапана, медиана показателя угла ротации сердца составила 5,09 [2,7; 8,7] (Таблица 5). При анализе выявлено, что показатель угла ротации у пациентов с протезированными клапанами сердца статистически значимо ниже ($p < 0,001$), чем у пациентов контрольной группы, где медиана показателя угла ротации сердца составила 10,97 [10,5; 12,2] (Таблица 5). При этом ФВ ЛЖ у данной группы пациентов в пределах нормальных значений (медиана – 64 [51; 66,8]), таблица 5. При сравнении группы кардиохирургических пациентов и контрольной группы статистически значимых различий показателя ФВ ЛЖ не выявлено ($p = 0,26$).

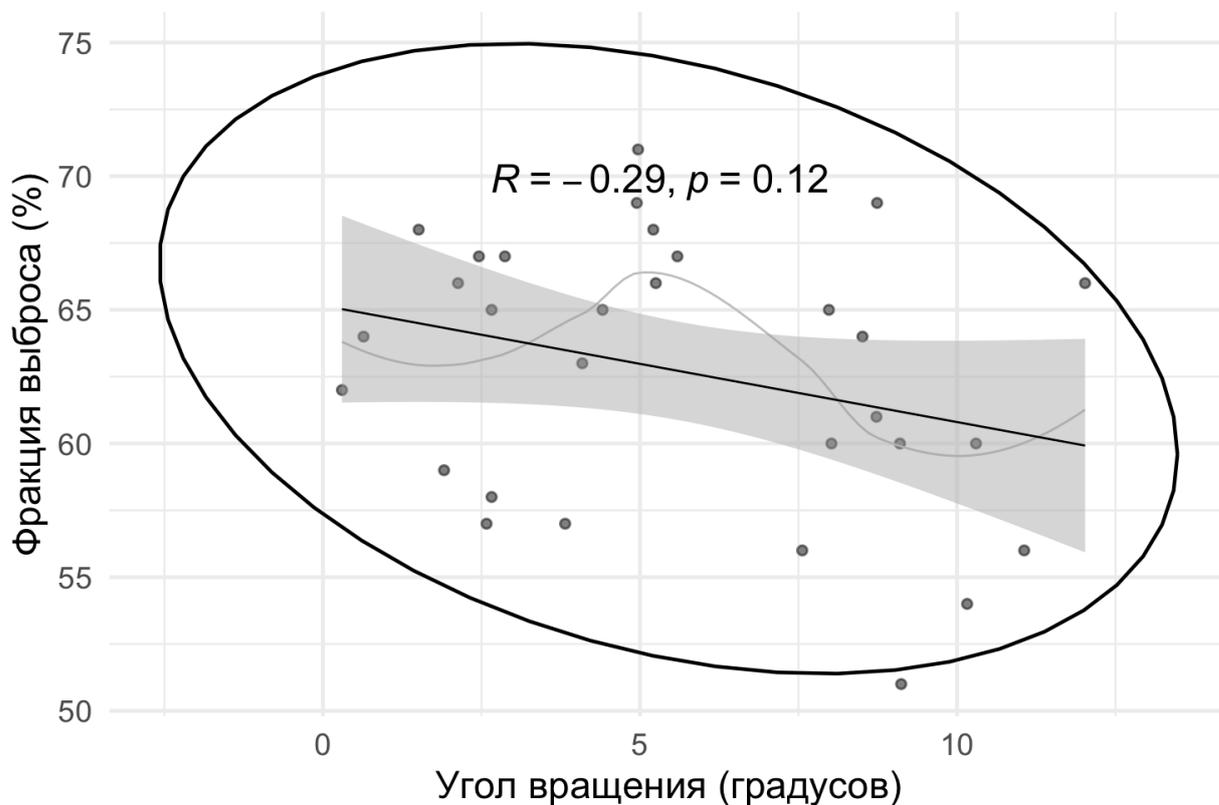
При корреляционном анализе взаимосвязи между углом ротации сердца, рассчитанным по данным КАГ и ФВ ЛЖ, полученным по данным ЭхоКГ, у пациентов с протезированными клапанами выявлена незначимая обратная корреляция ($r = -0,29$), не достигающая уровня статистической значимости ($p = 0,12$). Данные анализа в графическом виде представлены на рисунке 20.

Выявленные низкие значения угла ротации сердца у пациентов после протезирования клапанов сердца при сохранной ФВ ЛЖ могут быть связаны с еще не восстановленной сократительной функцией миокарда, что согласуется с литературными данными.

Ряд исследователей указывают, что восстановление или некоторое увеличение сократительной функции миокарда после протезирования аортального и митрального клапана - это длительный процесс и во многом зависит от степени выраженности патологической деформации сердца до проведения хирургической коррекции стенозов [5, 42, 44].

Диаграмма рассеяния

Угол вращения и фракция выброса



Источник: data/LZ.csv (группа кардиохирургия)

Рисунок 20 - Корреляционные взаимоотношения между углом ротации сердца и ФВ ЛЖ у пациентов с протезированными клапанами сердца.

4.3 Сравнительный анализ параметров сократительной функции миокарда, рассчитанных по данным коронароангиографии и Speckle-tracking эхокардиографии

В нашем исследовании проводился сравнительный анализ параметров сократительной функции миокарда, рассчитанных по данным КАГ (угол ротации сердца) и Speckle-tracking ЭхоКГ (глобальная продольная деформация). В анализ были включены результаты расчетов угла ротации сердца, глобальной продольной деформации и ФВ ЛЖ восьмерых пациентов: в том числе 3 человека из группы пациентов с ДКМП, 3 человека из группы пациентов с АЛЖ и 2 человека из контрольной группы (Таблица 8).

Таблица 8 - Параметры оценки сократительной функции миокарда, рассчитанные по данным КАГ и Speckle-tracking ЭхоКГ

Пациент	Диагноз и стадия ХСН	Угол ротации сердца φ (град) (КАГ)	GLS (%) Speckle-tracking ЭхоКГ	ФВ ЛЖ (%)
(name1)	АЛЖ, ХСН I ст.	5.62°	15,28	46,0
(name2)	АЛЖ, ХСН I ст.	2.76°	14,74	42,0
(name3)	АЛЖ, ХСН IIА ст.	3.34°	10,2	30,0
(name4)	ДКМП, ХСН IIА ст.	5.33°	13,98	39,0
(name5)	ДКМП, ХСН IIБ ст.	3.84°	5,38	22,0
(name6)	ДКМП, ХСН IIБ ст.	4.07°	7,37	32,0
(name7)	Без заболеваний сердца	16.96°	20,22	66,0
(name8)		10.87°	16,77	62,0

Угол ротации сердца рассчитывали по данным коронарной ангиографии. Наличие нарушений сократительной функции миокарда прогнозировалось при значении угла ротации сердца ниже, чем пороговое значение – 9,9, которое определялось с помощью методики анализа ROC-кривых.

В таблице 8 показано, что у пациентов с ДКМП и с АЛЖ показатель угла ротации сердца значительно ниже, чем пороговое значение (9,9), что подтверждает наличие у них нарушения сократительной способности миокарда. У пациентов из контрольной группы показатель угла ротации сердца выше, чем пороговое значение (9,9), что подтверждает отсутствие у них нарушения сократительной способности миокарда.

При проведении Speckle-tracking эхокардиографии автоматически рассчитывалась продольная глобальная деформация по 17 сегментам ЛЖ за период времени (Рисунок 21). Глобальная продольная деформация утверждена в качестве количественного показателя для оценки глобальной функции ЛЖ при проведении speckle-tracking эхокардиографического анализа.

Во взрослой популяции нижней границей нормы глобальной продольной деформации левого желудочка считаются следующие показатели: для приборов фирмы General Electric ($21,3 \pm 2,1\%$); для приборов фирмы Phillips ($18,9 \pm 2,5\%$); для приборов фирмы Toshiba ($19,9 \pm 2,4\%$) [141]. Некоторые авторы указывают на

гендерные различия: для мужчин нормативные показатели ниже, чем для женщин: - (16,9%) и - (18,5%), соответственно [141]. Нормальные средние значения продольной деформации (GLS) среди исследований варьировались от 15,8% до 23,4 % (среднее значение - 19,05%) [142]. За нормальное среднее значение продольной глобальной деформации мы приняли показатели, рекомендованные для приборов фирмы Phillips - $(18,9 \pm 2,5\%)$.

Из таблицы 8 видно, что у пациентов с АЛЖ и ДКМП глобальная продольная деформация ниже чем нижняя граница нормы для приборов фирмы Phillips - (16,4%), что подтверждает наличие у них нарушения сократительной способности миокарда. У пациентов контрольной группы глобальная продольная деформация в пределах нормы, что подтверждает отсутствие у них нарушения сократительной способности миокарда.

Всем пациентам была определена фракция выброса левого желудочка (Рисунок 22).

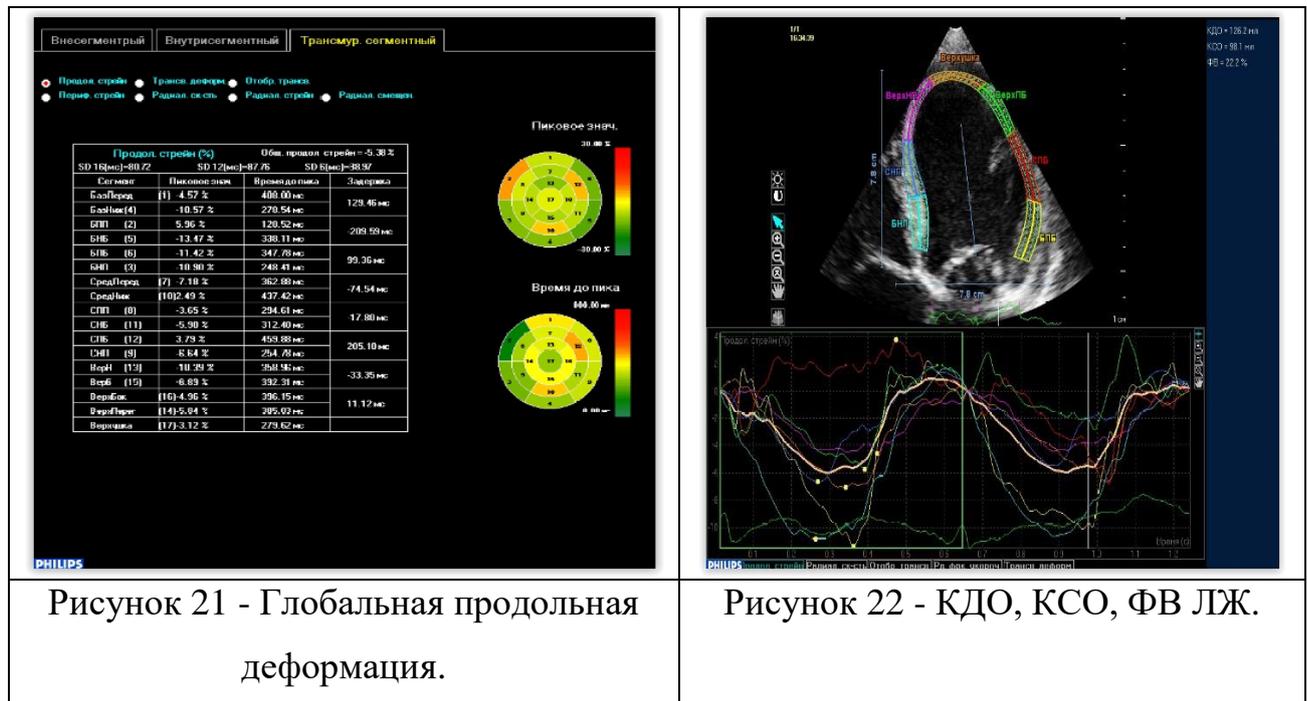


Рисунок 21 - Глобальная продольная деформация.



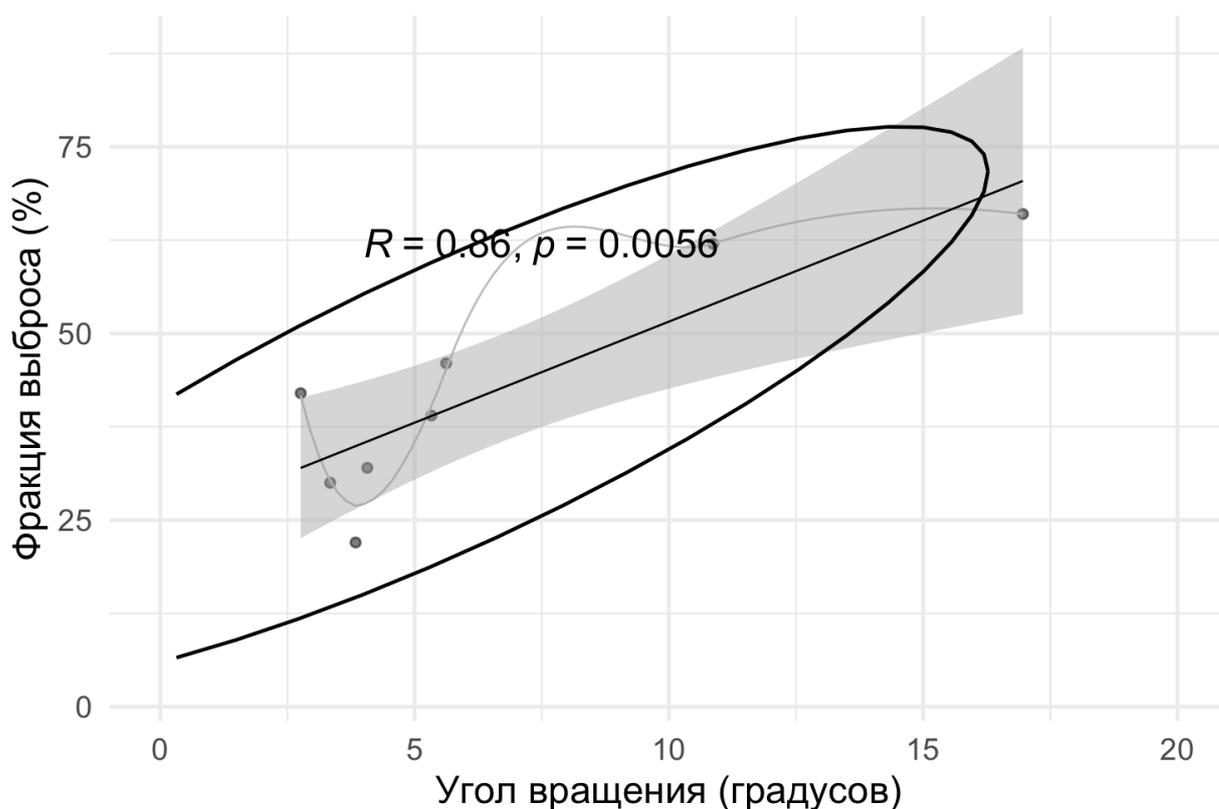
Рисунок 22 - КДО, КСО, ФВ ЛЖ.

Степень снижения фракции выброса левого желудочка ассоциируется с выраженностью систолической дисфункции. Из таблицы 8 видно, что ФВ ЛЖ у пациентов с АЛЖ меньше 50%, а у пациентов с ДКМП меньше 40%, что соответствует имеющейся у них сердечной недостаточности. У пациентов

контрольной группы ФВ ЛЖ более 55%, что соответствует показателям нормы ($\geq 55\%$).

При изучении корреляционных взаимоотношений между углом ротации сердца и ФВ ЛЖ получены данные о наличии прямой сильной связи с коэффициентом корреляции ($r=0,86$, $p=0,0056$). Данные корреляционного анализа в графическом виде представлены на рисунке 23.

Диаграмма рассеяния Угол вращения и фракция выброса



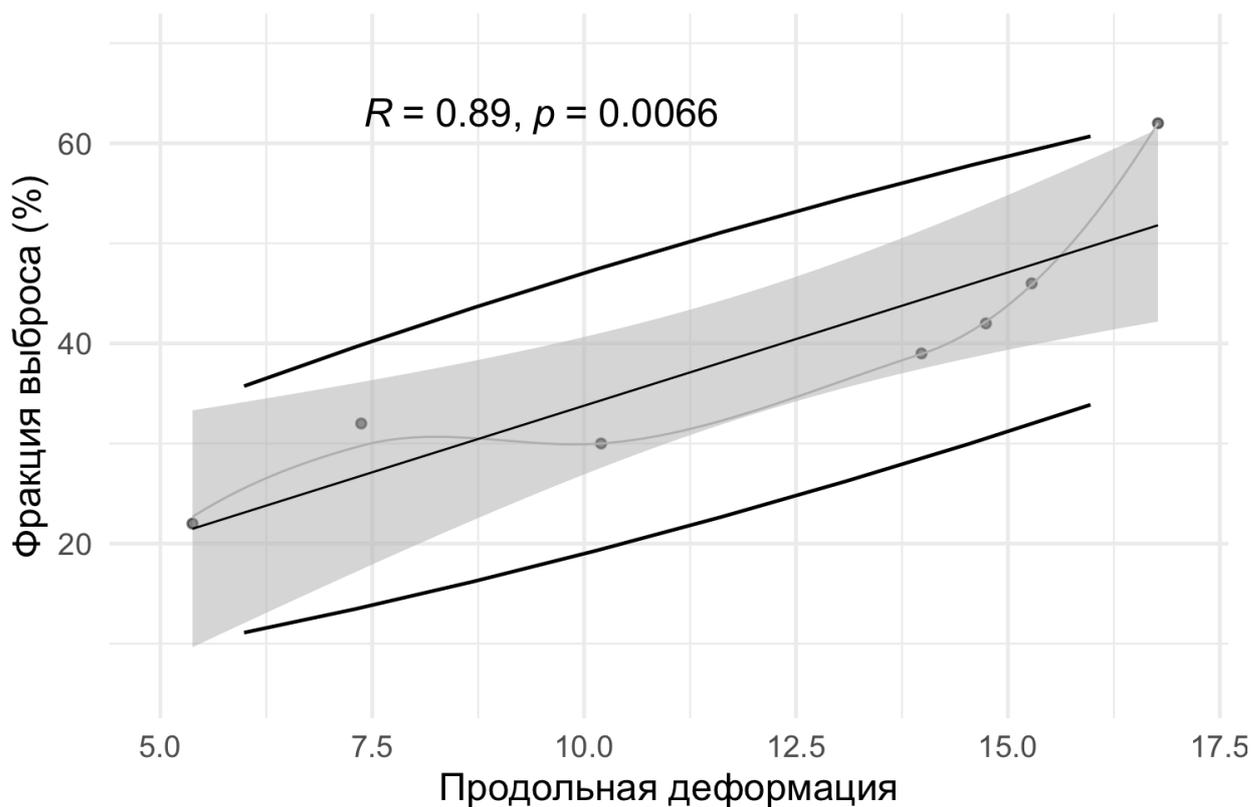
Источник: data/LZ.csv (группы ДКМП, контроль, АЛЖ)

Рисунок 23 - Корреляционные взаимоотношения между углом ротации сердца и ФВ ЛЖ у обследованных пациентов.

Показатели глобальной продольной деформации также статистически значимо коррелировали с величиной ФВ ЛЖ у этих же пациентов ($r=0,86$, $p=0,0056$). Данные корреляционного анализа в графическом виде представлены на рисунке 24.

Диаграмма рассеяния

Продольная деформация, рассчитанная при Speckle-tracking и



Источник: data/LZ.csv (группы ДКМП, контроль, АЛЖ)

Рисунок 24 - Корреляционные взаимоотношения между глобальной продольной деформацией и ФВ ЛЖ у обследованных пациентов.

Таким образом, снижение угла ротации, определенное новой методикой оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии, снижение глобальной продольной деформации, рассчитанное при проведении Speckle-tracking эхокардиографии, одинаково подтверждают наличие у пациентов с ДКМП и АЛЖ выраженного нарушения сократительной способности миокарда, что соответствует имеющейся у них хронической сердечной недостаточности. У пациентов контрольной группы эти же показатели (угол ротации сердца и продольная глобальная деформация), соответственно рассчитанные по данным КАГ и Speckle-tracking эхокардиографии, в пределах нормальных величин, что подтверждает отсутствие у них нарушения сократительной способности миокарда. Снижение угла ротации сердца и глобальной продольной деформации коррелирует со сниженной ФВ ЛЖ.

4.4 Обсуждение результатов исследования

Хроническая сердечная недостаточность – одно из самых тяжелых и прогностически неблагоприятных осложнений заболеваний сердечно-сосудистой системы [85]. Лечение сердечной недостаточности и в особенности ее декомпенсации – сложная задача для специалистов. Медикаментозная терапия улучшает прогноз развития сердечной недостаточности, но на определенной стадии утрачивает свою эффективность, и практикующие врачи часто сталкиваются с пациентами, у которых на фоне оптимально подобранного лечения продолжают прогрессировать симптомы СН.

При прогрессировании сердечной недостаточности и неэффективности медикаментозной терапии требуется восстановление или уменьшение последствий ремоделирования миокарда хирургическими методами лечения [6, 54, 55, 65, 88, 122].

У пациентов с тяжелой ХСН по мере прогрессирования ремоделирования левого желудочка ухудшается сократительная способность миокарда [4, 50, 53, 71, 81, 176]. В связи с этим, оценка сократительной способности миокарда является необходимым и обязательным этапом при выборе метода лечения у данной категории пациентов.

Сократительная способность миокарда является одним из важнейших компонентов, обеспечивающих насосную функцию и участвующих в регуляции сердечного дебита. С позиции механики сердца показателями сократительной способности ЛЖ являются: деформация, скорость деформации, ротация, скорость ротации, скручивание и поворот по оси [38, 87, 127, 130, 178].

В настоящее время эхокардиография (ЭхоКГ) предоставляет большие возможности в оценке показателей механики сердца, позволяющих определить сократительную способность миокарда у пациентов с ХСН при планировании кардиохирургических вмешательств. ЭхоКГ позволяет получить важную информацию об анатомии и функции сердца – это оценка систолической и

диастолической функции ЛЖ, обнаружение нарушений локальной сократимости левого желудочка, измерение фракции выброса ЛЖ (ФВ ЛЖ), выявление патологии клапанного аппарата сердца. В последние годы все больше используется трехмерная speckle-tracking эхокардиография (STE), которая обеспечивает более объемный и подробный анализ сердечной динамики (38Павлюкова Е.Н. и др., 2015; Берестень Н.Ф., Сандриков В.А., Федорова С.И., 2019; Tops L.F. et al., 2017).

Магнитно-резонансная томография сердца позволяет получить детальную информацию о морфологии сердца, внутрисердечной гемодинамике, функции желудочков, скорости и объеме кровотока по крупным сосудам, структуре миокарда. К методам, позволяющим проводить оценку функциональных параметров левого желудочка, кроме эхокардиографии и МРТ, относятся инвазивная вентрикулография, радионуклидная вентрикулография, однофотонная эмиссионная и мультисериальная компьютерная томография.

Результаты коронарной ангиографии для оценки сократительной способности миокарда использованы впервые в нашем исследовании.

Коронарная ангиография – инвазивное исследование, не относится к рутинным методам, также имеет ряд противопоказаний. Вместе с тем в настоящее время показания к проведению коронарной ангиографии постоянно расширяются. Коронарная ангиография в большинстве случаев проводится пациентам: с развитием ОКС, подозрением на ишемическую болезнь сердца и отсутствием эффекта от проводимого лечения.

Коронарная ангиография является обязательным диагностическим методом для подтверждения диагноза ОКС или его исключения, оценки прогноза, определения показаний для инвазивного лечения и выбора метода реваскуляризации миокарда [40, 41]. В большинстве случаев для пациентов с подозрением на ОКС коронарная ангиография является первичным этапом диагностики до выполнения ЭхоКГ и в таких ситуациях КАГ позволила бы повысить вероятность раннего выявления нарушения сократительной способности миокарда. Однако КАГ в виде ангиографического изображения не

позволяет определять наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда.

В связи с этим создание и использование в практике методики математического анализа параметров механики сердца на протяжении сердечного цикла по ангиографическим изображениям коронарных артерий, позволяющей определить наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда, является новаторским решением важнейшей клинической задачи.

Исходя из вышесказанного, нами была сформулирована цель исследования: разработка методики оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии и обоснование ее применения в практике на основе изучения сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля. Проводилась разработка методики оценки механики вращательного движения сердца, основанной на математических расчетах угла ротации сердца по данным коронарной ангиографии. Изучалась диагностическая значимость угла ротации сердца для оценки сократительной способности миокарда. С помощью новой методики изучалась механика вращательного движения сердца у пациентов с ДКМП, с АЛЖ и перенесших кардиохирургическое вмешательство (протезирование клапанов сердца). Проводился сравнительный анализ параметров оценки сократительной функции миокарда, рассчитанных по данным КАГ (угол ротации сердца) и Speckle-tracking ЭхоКГ (глобальная продольная деформация).

Исследование проводилось с 2017 г. по 2022 г. База исследования - Государственное бюджетное учреждение здравоохранения Республиканский кардиологический центр МЗ Республики Башкортостан г. Уфа. В исследование включены 120 пациентов, отобранные неслучайной целевой выборкой из базы данных пациентов, которым выполнена диагностическая коронарная ангиография (1920 пациентов).

В соответствии с задачами исследования пациенты были разделены на четыре группы: 1) пациенты с дилатационной кардиомиопатией; 2) пациенты с аневризмой левого желудочка; 3) кардиохирургические пациенты (с

протезированием аортального и митрального клапанов сердца); 4) контрольная группа (пациенты у которых при обследовании не выявлены заболевания сердца).

В группе пациентов с ДКМП соотношение мужчин к женщинам – 28:2, основную часть пациентов составили мужчины. Медиана возраста пациентов составила 59 [55; 62]. Тяжесть клинических проявлений по стадиям ХСН выглядела следующим образом: II А ст. – 33,3%, II Б ст. - 66,7%, медиана ФВ ЛЖ составила 30 [27; 33,8]. КДР - 6,35 [6,02; 6,6], КСР - 5,2 [4,8; 5,6].

В группе пациентов с АЛЖ медиана возраста пациентов составила 57,5 [55; 65]. В группе кардиохирургических пациентов соотношение мужчин к женщинам – 19:11, основную часть пациентов составили мужчины. У пациентов, включенных в группу АЛЖ, тяжесть клинических проявлений по стадиям ХСН распределилась следующим образом: I ст. – 33,3%, II А ст. – 40,0%, II Б ст. - 26,7%. Медиана ФВ ЛЖ составила 42,5 [30,8; 46,0], в том числе пациентов с низкой ФВ ЛЖ - 40,0%, с промежуточной ФВ ЛЖ - 56,67%, с сохраненной ФВ ЛЖ – 3,33%. КДР - 5,4 [5,1; 6,3], КСР - 3,95 [3,7; 4,5].

У всех пациентов, включенных в группу с протезированными клапанами сердца, ХСН соответствовал стадии I (100,0%). Медиана фракции выброса левого желудочка составила 64 [59,3; 66,8]. КДР - 5,1 [4,9; 5,4], КСР - 3,4 [3,03; 3,5].

В контрольную группу включены пациенты без заболеваний сердца. Медиана возраста составила 53 [44,5; 58,8]. Фракция выброса левого желудочка у всех пациентов $\geq 55\%$, медиана ФВ ЛЖ - 65 [62; 67,5]. КДР - 4,8 [4,6; 4,97]. КСР - 3,1 [3; 3,3].

В связи с более молодым возрастом пациентов в контрольной группе, были выявлены небольшие различия между исследуемыми группами. Проводился статистический анализ влияния возраста исследуемых пациентов на угол вращения сердца. В результате анализа выявлено, что возраст пациентов, включенных в наше исследование не влияет на угол вращения сердца ($R = -0,099$, $p = 0,28$).

В исследование были включены данные коронарной ангиографии,

электрокардиографии, эхокардиографии и Speckle-tracking ЭхоКГ, проведенных в диагностических целях в соответствии с Клиническими рекомендациями МЗ РФ. В ходе исследования проводился ретроспективный анализ данных пациентов (в том числе оперированных) по 120 архивным историям болезни: клинических (возраст, пол, ритм сердца, электрическая ось сердца, наличие нарушений ритма по электрокардиограмме или холтеровскому мониторингованию, артериальное давление по методу Короткова, наличие гипертрофии левого желудочка, частота сердечных сокращений, стадии хронической сердечной недостаточности, наличие артериальной гипертензии); результатов инструментальных обследований (электрокардиографии, эхокардиографии, Speckle-tracking эхокардиографии, коронарной ангиографии). Сведения о диагнозе также были получены по архивным историям болезни. В рамках данного исследования задача верификации диагноза ХСН не ставилась.

Механика вращательного движения сердца изучалась с помощью, разработанной нами методики, основанной на математических расчетах угла ротации сердца по данным коронарной ангиографии, позволяющей определить наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда.

Статистическая обработка результатов исследования проводилась с использованием программных пакетов MS Excel 2010, R и StatTech v. 2.8.8. Использовались: ранговый критерий Крускала-Уоллиса, непарный двухвыборочный критерий Уилкоксона, корреляционный анализ по Спирмену (оценивали коэффициент корреляции r и уровень достоверности корреляционного уравнения). Для оценки диагностической значимости количественных признаков при прогнозировании определенного исхода применялся метод анализа ROC-кривых.

Разработана принципиально новая методика оценки механики вращательного движения сердца, основанная на математических расчетах угла ротации по движению точек на поверхности сердца, определенных на коронарограмме в двух косых проекциях (Патент на изобретение № 2679875

Российская Федерация «Способ ранней ангиографической диагностики сердечной недостаточности»).

Разработанная нами методика оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии достигается путем получения математического описания трехмерной картины процессов скручивания и сокращения сердца по радиусу и оси при сжатии и расслаблении сердца с помощью коронарной ангиографии в двух косых проекциях. Новая методика основана на математических расчетах угла ротации по движению точек, определенных на поверхности сердца.

Исходными данными для расчета кинематических параметров сердца (угол ротации) являются хронологические измерения координат точек, сделанных в серии фотографических изображений в течение сердечного цикла, полученных с помощью встроенного в ангиографическую установку записывающего устройства с частотой съемки 24 кадра в 1 секунду. Для получения трехмерной картины процесса ротации сердца по радиусу и оси (при сжатии и расслаблении сердца) киносъемка производится в двух косых проекциях,

Расчет кинематических параметров вращения сердца производится автоматически с помощью специальной программы для ЭВМ на основании занесенных в файл результатов измерений, полученных во время проведения коронарной ангиографии.

Основной диагностической целью нового метода оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии является количественное определение угла ротации сердца и эффективное разделение на его основе пациентов без- и с признаками нарушения сократительной способности миокарда.

Величину оптимального порогового значения угла ротации сердца для разделения лиц без нарушения и с нарушением сократительной способности миокарда определяли с помощью методики анализа ROC-кривых. Разделяющее пороговое значение в точке cut-off определялось по наивысшему значению индекса Юдена. Об эффективности разделения судили по величине показателей

чувствительности (Se), % и специфичности (Sp), %. Площадь под ROC-кривой составила $0,983 \pm 0,017$ с 95% ДИ: 0,950 – 1,000. Полученная модель была статистически значимой ($p < 0,001$). Пороговое значение угла ротации в точке cut-off, которому соответствовало наивысшее значение индекса Юдена, составило 9,910. Наличие нарушения сократительной способности миокарда прогнозировалось при значении угла ротации сердца ниже данной величины. Чувствительность и специфичность модели составили 95,6% и 100,0% соответственно.

Сущность методики поясняется следующими клиническими примерами.

Пример 1. Пациенту П. в условиях рентгеноперационной выполнена коронарная ангиография. Для оценки угла ротации взяты две точки по указанной методике. По расчетной формуле получен угол ротации [град]=1.51, что значительно меньше, чем пороговое значение угла ротации сердца – 9,9. Полученное низкое значение угла ротации сердца указало на наличие у пациента нарушения сократительной способности миокарда. Данные трансторакальной ЭхоКГ подтвердили у пациента наличие выраженного нарушения сократительной способности миокарда (КДР - 7.1 см, КСР - 6 см, ФВ ЛЖ - 27%).

Пример 2. Пациентке А. в условиях рентгеноперационной проведена коронарная ангиография. Для оценки угла ротации взяты две точки в двух косых проекциях. По расчетной формуле получен угол ротации сердца [град]=11.68, что больше, чем пороговое значение угла ротации сердца – 9,9. Полученное значение угла ротации указало на отсутствие у пациента нарушения сократительной способности миокарда. Данные трансторакальной ЭхоКГ (КДР - 4.6 см, КСР - 3.2 см, ФВ ЛЖ - 64%) подтвердили отсутствие нарушения сократительной способности миокарда у данного пациента.

Таким образом, разработанная нами методика оценки механики вращательного движения сердца, основанная на математических расчетах угла ротации по движению точек на поверхности сердца, определенных на коронарограмме в двух косых проекциях, дает возможность определить наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда у пациентов

кардиохирургического профиля. Критерием оценки сократительной способности миокарда у обследуемых пациентов является показатель угла ротации сердца (φ). Если φ [град.] $\geq 9,9$, то определяется отсутствие нарушения сократительной способности миокарда, если φ [град.] $< 9,9$, то определяется наличие нарушения сократительной способности миокарда.

В ходе исследования изучалась механика вращательного движения сердца у пациентов с ДКМП, АЛЖ и с протезированными клапанами сердца. У пациентов с ДКМП и АЛЖ с хронической сердечной недостаточностью выявлено выраженное снижение показателя угла ротации сердца, что статистически значимо ниже, чем у пациентов контрольной группы ($p < 0,001$). При анализе корреляционных взаимоотношений между углом ротации сердца и ФВ ЛЖ у пациентов с ДКМП, АЛЖ и контрольной группы выявлена сильная прямая корреляционная связь ($r = 0,8$, $p < 0,001$). Показатель угла ротации сердца ниже порогового значения свидетельствует о наличии нарушения сократительной способности миокарда у пациентов с ДКМП и АЛЖ.

Полученные нами результаты согласуются с данными литературы. Имеется ряд сообщений, обобщающих данные использования ЭхоКГ для оценки сердечной механики при различных патологических состояниях. У пациентов с ХСН глобальная продольная деформация ЛЖ прогрессивно снижается по мере нарастания функционального класса сердечной недостаточности. Снижение глобальной продольной и циркулярной деформации коррелирует со сниженной ФВ ЛЖ [87, 152, 158].

При ДКМП амплитуда пикового систолического угла поворота ЛЖ изменяется пропорционально глобальной ЛЖ функции. На фоне изменения формы ЛЖ (дилатация) происходит нарушение угла скручивания, что приводит к прогрессированию СН. У этих пациентов выраженность снижения показателей деформации коррелирует с ФВ ЛЖ [87, 152].

У пациентов с инфарктом миокарда снижения апикальной ротации и скручивания ЛЖ в первую очередь связаны со снижением циркулярной

деформации. Большие трансмуральные инфаркты связаны со снижением систолического угла поворота ЛЖ и скорости диастолического раскручивания, что коррелирует с пониженной ФВ [87, 152, 158].

В группе кардиохирургических пациентов, в которую были включены 26 человек (86,7%) после протезирования аортального клапана и 4 (13,3%) человека после протезирования митрального клапана, медиана показателя угла ротации сердца составила 5,09 [2,7; 8,7], что статистически значимо ниже, чем у пациентов из контрольной группы ($p < 0,001$), где медиана показателя угла ротации сердца составила 10,97 [10,5; 12,2]. При этом ФВ ЛЖ у данной группы пациентов в пределах нормальных значений (медиана – 64 [51; 66,8]). При сравнении группы кардиохирургических пациентов и контрольной группы статистически значимых различий показателя ФВ ЛЖ не выявлено ($p = 0,26$). При корреляционном анализе взаимосвязи между углом ротации сердца, рассчитанным по данным КАГ и ФВ ЛЖ, полученным по данным ЭхоКГ, у кардиохирургических пациентов выявлена незначимая обратная корреляция ($r = -0,29$), не достигающая уровня статистической значимости ($p = 0,12$).

Выявленные низкие значения угла ротации сердца у пациентов после протезирования аортального клапана при нормальных значениях ФВ ЛЖ могут быть связаны с еще не восстановленной сократительной функцией миокарда, что согласуется с литературными данными.

Ряд исследователей указывают, что восстановление или некоторое увеличение сократительной функции миокарда после протезирования аортального и митрального клапана - это длительный процесс и во многом зависит от степени выраженности патологической деформации сердца до проведения хирургической коррекции стенозов [5, 44].

Вместе с вышеизложенным известно, что при протезировании митрального клапана без сохранения подклапанных структур через 5-7 лет после операции происходит ухудшение состояния пациентов, обусловленное неблагоприятным ремоделированием полости левого желудочка. Левый желудочек теряет эллипсоидную и приобретает шарообразную форму [42].

Таким образом, угол ротации сердца, рассчитанный по новой методике оценки механики вращательного движения сердца по данным коронарной ангиографии, объективно показывает наличие нарушений сократительной функции миокарда у пациентов после протезирования аортального и митрального клапанов сердца. Показатель угла ротации сердца у пациентов после операции протезирования аортального и митрального клапанов сердца дает возможность оценки восстановления сократительной функции миокарда в послеоперационном периоде.

В нашем исследовании проводился сравнительный анализ параметров сократительной функции миокарда, рассчитанных по данным КАГ (угол ротации сердца) и Speckle-tracking ЭхоКГ (глобальная продольная деформация). В анализ были включены результаты расчетов угла ротации сердца, глобальной продольной деформации и ФВ ЛЖ восьмерых пациентов: в том числе 3 человека из группы пациентов с ДКМП, 3 человека из группы пациентов с АЛЖ и 2 человека из контрольной группы.

В результате анализа выявлено, что у пациентов с ДКМП и АЛЖ показатель угла ротации сердца значительно ниже, чем пороговое значение (9,9), что подтверждает наличие у них нарушения сократительной способности миокарда. У этих же пациентов снижена и глобальная продольная деформация (<16,4%), что также подтверждает наличие у них нарушения сократительной способности миокарда. За нормальное значение продольной глобальной деформации были приняты показатели ($18,9 \pm 2,5\%$), рекомендованные для приборов фирмы Phillips (Takigiku K., Takeuchi M., Izumi C. et al., 2012). Одинаковое снижение этих показателей у пациентов с ДКМП и АЛЖ подтверждает наличие у них нарушения сократительной способности миокарда.

У пациентов контрольной группы глобальная продольная деформация в пределах нормы ($\geq 55\%$), что подтверждает отсутствие у них нарушения сократительной способности миокарда.

При изучении корреляционных взаимоотношений между углом ротации сердца и ФВ ЛЖ выявлена высокая корреляционная связь как между углом

ротации сердца и ФВ ЛЖ ($r=0,86$, $p=0,0056$), так и между глобальной продольной деформацией и ФВ ЛЖ ($r=0,89$, $p=0,0066$).

Таким образом, снижение показателя угла ротации, определенное новой методикой оценки сократительной способности миокарда по данным коронарной ангиографии, снижение глобальной продольной деформации, рассчитанное при проведении Speckle-tracking эхокардиографии, одинаково подтверждают наличие у пациентов с ДКМП и АЛЖ нарушения сократительной функции миокарда, что соответствует имеющейся у них хронической сердечной недостаточности. У пациентов контрольной группы эти же показатели (угол ротации сердца и продольная глобальная деформация), соответственно, рассчитанные по данным КАГ и Speckle-tracking эхокардиографии, в пределах нормальных величин, что подтверждает отсутствие у них нарушений сократительной функции миокарда. Снижение показателей угла ротации сердца и глобальной продольной деформации коррелирует с ФВ ЛЖ. Диагностическая значимость угла ротации сердца (φ) в отношении выявления нарушений сократительной способности миокарда у пациентов с ДКМП и АЛЖ сопоставима с глобальной продольной деформацией (GLS), рассчитываемой методом Speckle-tracking эхокардиографии.

В результате проведенного исследования получены новые данные, расширяющие современные представления о диагностических возможностях коронарной ангиографии в кардиохирургии. Впервые разработана принципиально новая методика оценки механики вращательного движения сердца, основанная на математических расчетах угла ротации сердца по данным коронарной ангиографии, позволяющая определять наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля. Выполненное исследование дополняет имеющиеся сведения о механике вращательного движения сердца. Показатель угла ротации сердца служит предиктором ранней диагностики нарушения сократительной способности миокарда, и его диагностическая ценность повышается в сочетании с показателями эхокардиографии и других диагностических методов оценки функциональных параметров сердца.

На основе статистического анализа определено пороговое значение диагностического критерия (угла ротации сердца) для разделения лиц без нарушения и с нарушением сократительной способности миокарда. Установлено, что показатель угла ротации сердца позволяет оценить сократительную способность миокарда с высокой аналитической чувствительностью и специфичностью.

С помощью разработанной методики на достаточном клиническом материале изучена сократительная способность миокарда у пациентов с ДКМП и АЛЖ, а также у пациентов с протезированными клапанами сердца. Доказано, что показатель угла ротации сердца ниже установленного порогового значения свидетельствует о наличии нарушения сократительной способности миокарда у данной категории пациентов. Установлено, что показатели угла ротации сердца и глобальной продольной деформации, рассчитанные у одних и тех же пациентов с ДКМП и АЛЖ, тесно коррелируют со значениями фракции выброса левого желудочка и одинаково позволяют прогнозировать наличие нарушения сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля.

Внедрение разработанной методики оценки механики вращательного движения сердца по данным КАГ в клиническую практику позволит улучшить диагностику нарушения сократительной способности миокарда у пациентов, экстренно поступающих в кардиологический центр с подозрением на ОКС, в ситуациях, когда коронарная ангиография является первичным этапом диагностики до проведения эхокардиографии. Расчет угла ротации сердца при проведении диагностической коронарной ангиографии пациентам с развитием ОКС предоставит дополнительную информацию для планирования дальнейшего обследования уже с предположением наличия нарушения сократительной способности миокарда.

Разработанная компьютерная программа автоматического расчета угла ротации сердца повысит оперативность получения результатов исследования,

необходимых для определения тактики дальнейшего обследования и лечения пациентов кардиохирургического профиля.

Результаты проведенного исследования позволили сделать следующие выводы.

ВЫВОДЫ

1. Разработана принципиально новая методика оценки механики вращательного движения сердца, основанная на математических расчетах угла ротации по движению точек на поверхности сердца, определенных на коронарограмме в двух косых проекциях, позволяющая определить наличие или отсутствие нарушения сократительной способности миокарда. Критерием оценки сократительной способности миокарда у обследуемых пациентов является показатель угла ротации сердца.

2. Оптимальное пороговое значение угла ротации сердца составило - 9,9 ($p < 0,001$). Наличие нарушения сократительной способности миокарда предполагается при значении угла ротации сердца ниже данной величины. Чувствительность и специфичность диагностического критерия составили 95,6% и 100,0% соответственно. Показатель угла ротации сердца служит предиктором ранней диагностики нарушения сократительной способности миокарда.

3. У пациентов с ДКМП и АЛЖ угол ротации сердца статистически значимо ниже, чем у пациентов контрольной группы ($p < 0,001$). Снижение показателя угла ротации сердца свидетельствует о наличии нарушения сократительной способности миокарда у данной категории пациентов. Между углом ротации сердца и ФВ ЛЖ выявлена сильная прямая корреляционная связь ($r = 0,8$, $p < 0,001$).

4. У пациентов с протезированными клапанами сердца при сохранной ФВ ЛЖ выявлены низкие значения угла ротации сердца (5,09 [2,7; 8,71]), что статистически значимо ниже, чем у пациентов контрольной группы ($p < 0,001$). Не выявлено значимых различий ФВ ЛЖ у пациентов с протезированными клапанами сердца и контрольной группы ($p = 0,26$). Между углом ротации сердца и ФВ ЛЖ выявлена незначимая обратная корреляционная связь ($r = -0,29$), не достигающая уровня статистической значимости ($p = 0,12$).

5. По возможности определения нарушения сократительной способности миокарда показатель угла ротации сердца сопоставим с показателем

глобальной продольной деформации, рассчитанным Speckle-tracking ЭхоКГ. Одинаковое снижение этих показателей у пациентов с ДКМП и АЛЖ подтверждает наличие у них нарушения сократительной способности миокарда. Выявлена высокая корреляционная связь как между углом ротации сердца и ФВ ЛЖ ($r=0,86$, $p=0,0056$), так и между глобальной продольной деформацией и ФВ ЛЖ ($r=0,89$, $p=0,0066$).

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Показатель угла ротации сердца, имея высокую диагностическую чувствительность (95,6%) и специфичность (100%), рекомендуется для использования в практическом здравоохранении в качестве дополнительного критерия оценки сократительной способности миокарда у пациентов кардиохирургического профиля.

2. Экстренно поступающим в кардиологические стационары пациентам с подозрением на ОКС, у которых КАГ является первичным этапом диагностики до проведения эхокардиографии, рекомендуется провести расчёт угла ротации сердца для ранней диагностики нарушения сократительной способности миокарда.

3. Изменение показателя угла ротации сердца в сторону снижения от исходного значения в момент эндоваскулярного вмешательства на коронарных артериях может послужить ранним критерием выявления нарушения сократительной функции миокарда еще до появления клинических симптомов и изменений на ЭКГ, что позволит распознать осложнение вмешательства до применения дополнительных методов исследования.

4. При проведении коронарной ангиографии у пациентов с протезированными клапанами сердца в послеоперационном периоде рекомендуется определение угла ротации сердца для оценки восстановления сократительной способности миокарда.

5. Для повышения оперативности получения показателя угла ротации сердца, необходимого для определения тактики дальнейшего обследования и лечения пациентов, рекомендуется использовать компьютерную программу автоматического расчета параметров механики сердца на основании данных, полученных с помощью коронарной ангиографии.

СПИСОК ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИХ СОКРАЩЕНИЙ

- АК – аортальный клапан
- АЛЖ — аневризма левого желудочка
- ВТЛЖ – выносящий тракт левого желудочка
- ГБ – гипертоническая болезнь
- ГЛЖ — гипертрофия левого желудочка
- ДКМП – дилатационная кардиомиопатия
- ИБС – ишемическая болезнь сердца
- ИКД – имплантируемый кардиовертер-дефибриллятор
- ИМ – инфаркт миокарда
- КАГ - коронароангиография
- КДО – конечный диастолический объем
- КДР – конечный диастолический размер
- КСР – конечный систолический размер
- ЛЖ – левый желудочек
- ЛП – левое предсердие
- МК – митральный клапан
- МКК – малый круг кровообращения
- МН – митральная недостаточность
- МР – митральная регургитация
- МРТ – магнитно-резонансная томография
- ОКС – острый коронарный синдром
- ПКА - правая коронарная артерия
- СВ — сердечный выброс
- СН - сердечная недостаточность
- ТДИ – тканевое доплеровское исследование
- УО – ударный объем
- ФВ - фракция выброса
- ФК – функциональный класс

ХСН – хроническая сердечная недостаточность

ХСНнФВ - ХСН со сниженной ФВ ЛЖ

ХСНпФВ - ХСН с промежуточной ФВ ЛЖ

ХСНсФВ - ХСН с сохраненной ФВ ЛЖ

ЧСС – частота сердечных сокращений

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ЭКГ – электрокардиограмма, электрокардиография

ЭОС – электрическая ось сердца

ЭхоКГ – эхокардиография

ASE – Американское общество эхокардиографии

DTI – тканевое доплеровское исследование

EAE - Европейская ассоциация эхокардиографии

Global Longitudinal Stain (GLS), % - глобальная деформация в продольном направлении

NPV - отрицательное прогностическое значение

PPV - положительное прогностическое значение

Se, % - чувствительность (Se), %

Sp, % - специфичность

SR – стрейн рейт

STE - speckle-tracking эхокардиография

Strain – деформация

Torsion – поворот

Twist – скручивание

Twist Rate – скорость скручивания

Untwist – диастолическое раскручивание

(ϵ) - стрейн

φ , °- угол ротации сердца

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверина, И.И. Архитектура левого желудочка как первопричина насосной и сократительной функции левого желудочка в норме и при развитии сердечной недостаточности / И.И. Аверина, О.Л. Бокерия, Л.А. Бокерия // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. - 2020. - Т. 21, № 6. - С. 619-628.
2. Белов, Ю.В. Постинфарктное ремоделирование левого желудочка сердца. От концепции к хирургическому лечению / Ю.В. Белов, В.А. Варакин. – М.: ДеНово, 2002. – 194 с.
3. Берестень, Н.Ф. Функциональная диагностика: национальное руководство / Н.Ф. Берестень, В.А. Сандриков, С.И. Федорова. – М.: ГЭОТАР–Медиа, 2019. – 784 с.
4. Биомеханика левого желудочка и левого предсердия у больных недостаточностью митрального клапана / Т.Ю. Кулагина, Д.Р. Хаджиева, В.А. Сандриков, Л.М. Кузнецова // Диагностическая и интервенционная радиология. – 2018. – Т. 12, № 2. – С. 21–29.
5. Бокерия, Л.А. Митральная регургитация в зависимости от степени поражения коронарных артерий при остром коронарном синдроме / Л.А. Бокерия, А.Х.М. Дзейтова // Клиническая физиология кровообращения. - 2021. - Т. 18, № 1. - С. 53-59.
6. Бокерия, Л.А. Сердечная ресинхронизирующая терапия. Формирование показаний и современные подходы к повышению эффективности метода / Л.А. Бокерия, Н.М. Неминуций, А.С. Постол // Комплексные проблемы сердечно–сосудистых заболеваний. – 2018. – Т. 7, № 3. – С. 102–116.
7. Бокерия, О.Л. Движение сердца в норме и при различной патологии. Определение ротации, твиста и скручивания / О.Л. Бокерия, И.И. Аверина // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН Сердечно–сосудистые заболевания. – 2014. – Т. 15, № 4. – С. 11–23.

8. Бокерия, О.Л. Методы визуализации и основные показатели для оценки функции миокарда / О.Л. Бокерия, И.И. Аверина // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН Сердечно–сосудистые заболевания. – 2014. – Т. 15, № 3. – С. 4–18.

9. Бычкова, М.С. Ведение пациента с тяжелой артериальной гипотонией на фоне терминальной сердечной недостаточности со сниженной фракцией выброса левого желудочка / М.С. Бычкова, Е.В. Резник // Архивъ внутренней медицины. - 2022. - Т. 12, № 2 (64). - С. 143-155.

10. Васильев, А.Ю. Тканевая импульсно-волновая доплерография при исследовании систолической и диастолической функций миокарда / А.Ю. Васильев, Б.Е. Шахов, Е.Б. Петрова // Современная эхокардиографическая оценка состояния миокарда при ИБС. – М., 2022. - С. 127-142.

11. Вдовенко, Д.В. Показатели деформации миокарда и диастолическая функция левого желудочка у больных хронической сердечной недостаточностью с сохраненной фракцией выброса / Д.В. Вдовенко, Р.А. Либис // Артериальная гипертензия. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 74–80.

12. Взаимосвязь удлинённого интервала PR электрокардиограммы с отдаленной выживаемостью пациентов с хронической сердечной недостаточностью на фоне сердечной ресинхронизирующей терапии / А.М. Солдатова, В.А. Кузнецов, Т.П. Гизатулина [и др.] // Российский кардиологический журнал. - 2020. - Т. 25, № 1. - С. 33-38.

13. Влияние ресинхронизирующей терапии на внутрисердечную гемодинамику у пациентов с фибрилляцией предсердий и хронической сердечной недостаточностью / Т.А. Троянова–Щуцкая, Е.К. Курлянская, Т.Л. Денисевич [и др.] // Кардиология в Беларуси. – 2017. – № 6. – С. 1141–1147.

14. Горшунова, Н.К. Сопряженность гипертензивной эндотелиальной дисфункции с выраженностью миокардиальных поражений и хронической сердечной недостаточности у больных старшего возраста / Н.К. Горшунова, Н.В. Медведев // Артериальная гипертензия. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 112–121.

15. Диагностическая ценность электрокардиографических критериев гипертрофии левого желудочка при эссенциальной артериальной гипертензии и в сочетании с ишемической болезнью сердца / О.Я. Чайковская, Г.В. Рябыкина, И.Л. Козловская [и др.] // Медицинский алфавит. - 2019. - Т. 1, № 8 (383). - С. 14-20.

16. Динамика механической диссинхронии у пациентов с хронической сердечной недостаточностью с суперответом на сердечную ресинхронизирующую терапию при длительном периоде наблюдения / В.А. Кузнецов, Н.Е. Широков, А.М. Солдатова [и др.] // Уральский медицинский журнал. - 2019. - № 10 (178). - С. 105-112.

17. Дискаленко, О.В. Спекл-трекинг как наиболее информативная диагностическая методика для определения показаний к коронароангиографии у пациентов с ишемической болезнью сердца / О.В. Дискаленко, Я.И. Ильина, А.Н. Кучмин // Известия Российской военно-медицинской академии. - 2021. - Т. 40, № S1-3. - С. 95-99.

18. Дифференцированный подход в оценке систолической функции правого желудочка сердца с помощью импульсно-волновой доплерографии / Е.С. Мирзоян, Н.Ю. Неласов, М.В. Бабаев [и др.] // Клиническая медицина. – 2017. – Т. 95, № 2. – С. 132–135.

19. Зарецкий, В.В. Электрокимография / В.В. Зарецкий. – М.: Медгиз, 1963. – 325 с.

20. Земцовский, Э.В. Клапанные пороки сердца / Э.В. Земцовский, М.Л. Гордеев, Э.Г. Малев // Кардиология. Национальное руководство. – М., 2015. – С. 582–604.

21. Значение радионуклидной оценки механической диссинхронии сердца в обследовании пациентов кардиологического профиля / В.В. Саушкин, А.И. Мишкина, В.В. Шипулин, К.В. Завадовский // Российский электронный журнал лучевой диагностики. - 2019. - Т. 9, № 1. - С. 186-202.

22. Каграманова, С.Р. Современное представление о распространенности хронической сердечной недостаточности / С.Р. Каграманова, Е.Н. Чичерина // Дальневосточный медицинский журнал. - 2019. - № 3. - С. 96-100.
23. Каратаева, Л.А. Хроническая сердечная недостаточность как фактор смертности людей старшего возраста / Л.А. Каратаева, М.Б.К. Курбанова, Ш.Ш.К. Эргашева // European Research. – 2016. – № 10 (21). – С. 102–104.
24. Карпман, В.Л. Фазовый анализ сердечной деятельности / В.Л. Карпман. – Москва: Медицина, 1965. – 200 с.
25. Клиническая характеристика и отдаленная выживаемость больных, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения и имевших хроническую сердечную недостаточность, по данным амбулаторного этапа наблюдения регистра регион-М / С.Ю. Марцевич, С.Н. Толпыгина, М.И. Чернышева [и др.] // Профилактическая медицина. - 2022. - Т. 25, № 8. - С. 14-20.
26. Константинов, Б.А. Оценка производительности работы сердца в клинической практике / Б.А. Константинов, В.А. Сандриков, В.Ф. Яковлев. — Л.: Наука, 1986. — 140 с.
27. Коронарная ангиография, вентрикулография, шунтография в иллюстрациях и схемах / Е.В. Меркулов, В.М. Миронов, А.Н. Самко [и др.]. – М., 2011. – 155 с.
28. Курлянская, Е.К. Сердечная ресинхронизирующая терапия при хронической сердечной недостаточности с фибрилляцией предсердий: анализ и прогнозирование результатов / Е.К. Курлянская // Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски. - 2021. - Т. 5, № 2. - С. 1315-1320.
29. Лечение артериальной гипертензии и хронической сердечной недостаточности у пациентов с выраженной гипертрофией миокарда без обструкции выносящего тракта левого желудочка / А.Е. Демкина, Ф.М. Хашиева, Н.С. Крылова [и др.] // Журнал сердечная недостаточность. – 2015. – Т. 16, № 3 (90). – С. 153–160.
30. Михайлов, В.Д. Аналитическая геометрия / В.Д. Михайлов. – М., 2018. – 80 с.

31. Михайлов, С.С. Клиническая анатомия сердца / С.С. Михайлов. – Москва: Медицина, 1987. – 288 с.
32. Молочков, А.В. Реконструктивная хирургия осложненных форм ишемической болезни сердца : автореф. дис. ... д-ра мед. наук : 14.01.26 / Молочков Анатолий Владимирович. – М., 2012. – 49 с.
33. Мошкина, А.Ю. Анализ данных кардиологического регистра: сердечная ресинхронизирующая терапия в комплексном лечении хронической сердечной недостаточности / А.Ю. Мошкина // Кардиологический вестник. - 2020. - Т. 15, № 5. - С. 67.
34. Назмиева, К.А. Ремоделирование левого предсердия по данным эхокардиографии у пациентов с хронической сердечной недостаточностью и фибрилляцией предсердий / К.А. Назмиева // Научная перспектива в образовании и развитие творческого потенциала современной системы знаний: сборник научных трудов. - Казань, 2020. - С. 143-146.
35. Несукай, Е.Г. Роль спекл-трекинг эхокардиографии в диагностике и лечении сердечно-сосудистых заболеваний / Е.Г. Несукай, А.А. Даниленко // Артериальная гипертензия. – 2018. – № 2 (58). – С. 33–43.
36. Никитин, Н.П. Применение тканевой миокардиальной доплерэхокардиографии в кардиологии / Н.П. Никитин // Кардиология. – 2002. – № 3. – С. 66–79.
37. Никифоров, В.С. Современные возможности speckle tracking эхокардиографии в клинической практике / В.С. Никифоров, Ю.В. Никищенко // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. – 2017. – Т. 13, № 2. – С. 248–255.
38. Новые ультразвуковые технологии в клинической практике / Р.С. Карпов, Е.Н. Павлюкова, А.А. Бощенко [и др.] // Сибирский медицинский журнал (г. Томск). – 2015. – Т. 30, № 2. – С. 15–21.
39. Опыт применения внутриаортальной баллонной контрпульсации как сопровождения коронарного шунтирования и коронарного стентирования у пациентов со сниженной фракцией выброса левого желудочка и митральной регургитацией ишемического генеза / Ю.Д. Костямин, В.Ю. Михайличенко, Н.К.

Базиян-Кухто, И.С. Греков // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. - 2021. - Т. 29, № 3. - С. 419-426.

40. Острый инфаркт миокарда с подъемом сегмента ST электрокардиограммы. Клинические рекомендации 2020 / Российское кардиологическое общество // Российский кардиологический журнал. – 2020. – Т. 25, № 11. – С. 4103.

41. Острый коронарный синдром без подъема сегмента ST электрокардиограммы. Клинические рекомендации 2020 / О.Л. Барбараш, Д.В. Дупляков, Д.А. Затейщиков [и др.] // Российский кардиологический журнал. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 4449.

42. От эхокардиографической оценки к хирургической стратегии: разработка тактики лечения пациентов с ишемической митральной регургитацией (описание клинических случаев) / Ю.И. Бузиашвили, И.В. Кокшенева, Е.П. Голубев [и др.] // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. - 2020. - Т. 21, № 6. - С. 691-707.

43. Отдаленные результаты имплантации ксеноперикардальных протезов "Биолаб" в позицию клапанов левых камер сердца / С.И. Бабенко, Н.Н. Соболева, Н.П. Бакулева [и др.] // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. - 2018. - Т. 7, № 2. - С. 61-70.

44. Отдаленные результаты протезирования при стенозе аортального клапана у пациентов со сниженной сократительной способностью левого желудочка / Е.П. Евсеев, В.А. Иванов, Я.А. Айдамиров [и др.] // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 59–63.

45. Отдаленные результаты хирургического лечения постинфарктной аневризмы левого желудочка: изменение сократительной функции миокарда и центральной гемодинамики / Л.А. Бокерия, А.И. Корольков, З.М. Чеишвили [и др.] // Анналы хирургии. - 2018. - Т. 23, № 6. - С. 342-347.

46. Оценка дисфункции левого желудочка у больных ишемической болезнью сердца при малоинвазивных хирургических вмешательствах по данным компьютерной томографии легких / Б.А. Минько, И.В. Вологодина, П.Л. Бородич,

М.П. Крылова // Вестник рентгенологии и радиологии. - 2018. - Т. 99, № 3. - С. 147-152.

47. Оценка скоростей продольных экскурсий фиброзного кольца митрального клапана для скрининга хронической сердечной недостаточности у больных гипертонической болезнью / С.В. Зиц, В.Е. Розанов, М.В. Розанова [и др.] // Клиническая геронтология. – 2016. – Т. 22, № 7–8. – С. 25–30.

48. Петрова, Е.Б. Технология визуализации вектора скорости движения миокарда в оценке сократимости левого желудочка до и после хирургической реваскуляризации при ишемической болезни сердца / Е.Б. Петрова, А.Ю. Васильев // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2017. – № 5 (96). – С. 72.

49. Погодин, К.В. Методика трансторакальной эхокардиографии. доступы и стандартные эхографические позиции при исследовании сердца: методические рекомендации / К.В. Погодин, А.Б. Болданов; Иркутская государственная медицинская академия последипломного образования. – Иркутск, 2016. – 182 с.

50. Потоки крови в левом желудочке и аорте у больных аневризмой восходящего отдела аорты и недостаточностью аортального клапана до и после хирургического лечения / Р.З. Зябирова, Т.Ю. Кулагина, В.А. Сандриков, Ю.Н. Петрова // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. - 2021. - Т. 22, № S3. - С. 117.

51. Предикторы возникновения сердечной недостаточности в послеоперационном периоде по данным эхокардиографии с тканевым доплером и метода слежения частиц (speckle tracking) у больных с приобретенными пороками сердца / И.И. Аверина, О.Л. Бокерия, М.Ю. Мироненко, О.Н. Кислицына // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН Сердечно–сосудистые заболевания. – 2015. – Т. 16, № 2. – С. 49–60.

52. Привес, М.Г. Анатомия человека: для российских и иностранных студентов медицинских вузов и факультетов / М.Г. Привес, Н.К. Лысенков, В.И. Бушкович. – 12–е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбМАПО, 2011. – 720 с.

53. Приобретенные пороки сердца: клиническая картина, диагностика / А.О. Рубаненко, В.А. Дьячков, Ю.В. Щукин [и др.] // Кардиология: новости, мнения, обучение. – 2019. – Т. 7, № 3. – С. 26–36.

54. Прогрессирующая (advanced) сердечная недостаточность / В.В. Калюжин, А.Т. Тепляков, И.Д. Беспалова [и др.] // Бюллетень сибирской медицины. – 2021. – Т. 20, № 1. – С. 129–146.

55. Промежуточный анализ проспективного многоцентрового контролируемого рандомизированного исследования эффективности и безопасности традиционного и дистального радиального доступа в интервенционной кардиологии / Д.С. Карташов, А.М. Бабунашвили, Д.В. Шумаков [и др.] // Клиническая практика. - 2022. - Т. 13, № 2. - С. 12-19.

56. Результаты 3 лет работы российского госпитального регистра хронической сердечной недостаточности (russian hospital heart failure registry - rus-hfr): взаимосвязь менеджмента и исходов у больных хронической сердечной недостаточностью / М.Ю. Ситникова, Е.А. Лясникова, А.В. Юрченко [и др.] // Кардиология. - 2018. - Т. 58, № S10. - С. 9-19.

57. Рекомендации Общества специалистов по неотложной кардиологии. Диагностика и лечение больных с острым коронарным синдромом без подъема сегмента ST электрокардиограммы. Часть 1 / М.Я. Руда, О.В. Аверков, Е.П. Панченко, И.С. Явелов // Кардиология. – 2017. – Т. 57, № 8. – С. 80–100.

58. Реконструктивная хирургия постинфарктных аневризм левого желудочка / А.М. Чернявский, А.М. Караськов, А.В. Марченко, С.А. Хапаев. – Новосибирск: Издательство СО РАН Филиал «Гео», 2003. – 176 с.

59. Ремоделирование артерий эластического типа при артериальной гипертензии. Новые диагностические подходы / Е.С. Павочкина, Н.Ф. Берестень, Н.В. Мещанкина [и др.] // Медицинский алфавит. - 2017. - Т. 2, № 22 (319). - С. 32-37.

60. Ресинхронизирующая терапия при терминальной стадии сердечной недостаточности / Д.В. Шумаков, Д.И. Зыбин, М.А. Попов [и др.] // РМЖ. Медицинское обозрение. - 2021. - Т. 5, № 4. - С. 206-211.

61. Ресинхронизирующая терапия при хронической сердечной недостаточности: диагностические и лечебные подходы / Е.Т. Сабитов, А.А. Дюсупов, А.С. Абдрахманов [и др.] // Кардиология. - 2019. - Т. 59, № 12. - С. 84-91.
62. Самко, А.Н. Катетеризация полостей сердца, коронарная ангиография, вентрикулография / А.Н. Самко // Руководство по кардиологии: в 4 т. / под ред. Е.И. Чазова. – М., 2014. – С. 481–525.
63. Сердечная недостаточность с сохраненной и незначительно нарушенной фракцией выброса и сердечно–сосудистые события: патогенетические взаимосвязи как часть сердечно–сосудистого континуума / А.А. Некрасов, Е.С. Тимощенко, Е.В. Карпухина, О.В. Мельниченко // Кардиология. – 2017. – Т. 57, № S2. – С. 337–342.
64. Сердечно–сосудистый континуум: от факторов риска до систолической сердечной недостаточности / О.В. Цыганкова, А.Д. Худякова, Л.Д. Латынцева, Н.Г. Ложкина // Атеросклероз. – 2017. – Т. 13, № 4. – С. 42–46.
65. Ситникова, М.Ю. Высокотехнологичные методы лечения хронической сердечной недостаточности / М.Ю. Ситникова, П.А. Федотов, Л.В. Прокопова // Кардиология: новости, мнения, обучение. – 2017. – № 2. – С. 104–118.
66. Снижение микровольтной альтернации т–волны как показатель эффективности ресинхронизирующей терапии больных ХСН / Т.Г. Вайханская, Т.М. Коптюх, Т.В. Курушко [и др.] // Журнал сердечная недостаточность. – 2015. – Т. 16, № 4 (91). – С. 195–203.
67. Совертков, П.И. Справочник по элементарной математике / П.И. Совертков. – СПб., 2018. - 404 с.
68. Современные возможности компьютерной томографии в диагностике заболеваний сердца и коронарных артерий / И.С. Железняк, И.А. Меньков, С.Д. Рудь [и др.] // Военно–медицинский журнал. – 2017. – Т. 338, № 5. – С. 34–39.

69. Соотношение диастолической и систолической дисфункции миокарда при доксорубициновой кардиомиопатии / В.Л. Лакомкин, А.А. Абрамов, В.В. Грамович [и др.] // Кардиологический вестник. – 2018. – Т. 13, № 2. – С. 48–52.

70. Сохибназарова, В.Х. Применение новых эхокардиографических технологий недоплеровского изображения миокарда в двумерном и трехмерном режимах у больных ХСН с сохранной и сниженной фракцией выброса левого желудочка / В.Х. Сохибназарова, М.А. Саидова, С.Н. Терещенко // Евразийский кардиологический журнал. – 2017. – № 2. – С. 42–47.

71. Спонтанная диссекция коронарной артерии с формированием тромбированной аневризмы левого желудочка у молодого пациента / Л.А. Бокерия, М.К. Санакоев, З.Ф. Кудзоева [и др.] // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. - 2022. - Т. 23, № 1. - С. 103-110.

72. Сравнительное анатомическое исследование параметров закрученного потока в полости левого желудочка у животных различного размера на основании концепции смерчеобразных течений вязкой жидкости / М.М. Тхагапсова, Е.А. Талыгин, Ш.Т. Жоржолиани [и др.] // Биофизика. - 2020. - Т. 65, № 1. - С. 165-174.

73. Суджаева, О.А. Новые перспективы использования сердечной ресинхронизирующей терапии у пациентов с умеренными проявлениями хронической сердечной недостаточности / О.А. Суджаева, О.В. Кошлатая, Д.В. Романовский // Кардиология в Беларуси. – 2016. – № 5 (48). – С. 734–743.

74. Суранова, Г.Ж. Исследование функционального состояния сердечно-сосудистой системы экспериментальных животных методом поликардиографии / Г.Ж. Суранова // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2013. – Т. 13, № 11. – С. 143–146.

75. Сыгай, А.И. Обзор современных методов хирургического лечения дилатационной кардиомиопатии / А.И. Сыгай, Т. Туганбеков, А. Альбазаров // Медицинский журнал Астана. - 2019. - № 2 (100). - С. 84-96.

76. Трисветова, Е.Л. Хроническая правожелудочковая сердечная недостаточность: причины, диагностика, лечение / Е.Л. Трисветова, Т.С. Зыбалова, И.Н. Пономаренко // Медицинские новости. – 2017. – № 1. – С. 31–36.

77. Угол вращения сердца в норме и патологии, его оценка при проведении коронарной ангиографии / Л.З. Усманова, А.Г. Осиев, И.Е. Николаева [и др.] // Диагностическая и интервенционная радиология. - 2020. - Т. 14, № 1. - С. 37-46.

78. Фазулина, К.С. Декомпенсация хронической сердечной недостаточности: от патогенеза к прогнозу / К.С. Фазулина // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2016. – Т. 15, № 6. – С. 78–82.

79. Филиппов, Е.В. Миокардит как причина хронической сердечной недостаточности / Е.В. Филиппов // Медицинский совет. – 2018. – № 16. – С. 80–85.

80. Фольков, Б. Кровообращение / Б. Фольков, Э. Нил. – М.: Медицина, 1976. – 403 с.

81. Фомин, И.В. Обоснование специализированной медицинской помощи пациентам с хронической сердечной недостаточностью в Российской Федерации / И.В. Фомин, Н.Г. Виноградова // Южно-Российский журнал терапевтической практики. - 2020. - Т. 1, № 3. - С. 44-53.

82. Хирургическая тактика у пациентов с пороком аортального клапана в сочетании с постстенотическим расширением восходящей аорты / Ю.В. Белов, К.Н. Рыбаков, И.А. Губарев [и др.] // Московский хирургический журнал. - 2021. - № 4. - С. 23-29.

83. Хирургическое лечение аортального порока сердца как осложнения после комбинированной таргетной терапии рака / Ю.В. Белов, А.А. Еременко, А.В. Лысенко [и др.] // Хирургия. - 2019. - № 10. - С. 88-90.

84. Хроническая сердечная недостаточность в Российской Федерации: что изменилось за 20 лет наблюдения? Результаты исследования ЭПОХА–ХСН / Д.С. Поляков, И.В. Фомин, Ю.Н. Беленков [и др.] // Кардиология. – 2021. – Т. 61, № 4. – С. 4–14.

85. Хроническая сердечная недостаточность. Клинические рекомендации 2020 / Российское кардиологическое общество // Российский кардиологический журнал. – 2020. – Т. 25, № 11. – С. 4083.

86. Черняева, Е.И. Первый опыт использования тканевой доплерэхокардиографии для верификации диагноза хронической сердечной недостаточности с сохраненной фракцией выброса левого желудочка: клиническая характеристика пациентов и оценка морфофункционального состояния сердца / Е.И. Черняева, А.Б. Безродный // Сердце и сосуды. – 2016. – № 4 (56). – С. 80–85.

87. Швец, Д.А. Спекл-трекинг эхокардиография в оценке систоло-диастолической функции левого желудочка при ишемической болезни сердца с учетом особенностей строения миокарда / Д.А. Швец, С.В. Поветкин // Ультразвуковая и функциональная диагностика. - 2021. - № 2. - С. 19-38.

88. Шевченко, Ю.Л. Диастолическая дисфункция левого желудочка / Ю.Л. Шевченко, Л.Л. Бобров, А.Г. Обрезан. – М.: ГЭОТАР–МЕД, 2002. – 151 с.

89. Эхокардиографическая оценка ремоделирования полостей сердца при недостаточности митрального клапана до и после протезирования в раннем послеоперационном периоде / Л.А. Бокерия, И.И. Скопин, Р.М. Муратов [и др.] // Анналы хирургии. – 2007. – № 1. – С. 20–25.

90. A head-to-head comparison of speckle tracking echocardiography and feature tracking cardiovascular magnetic resonance imaging in right ventricular deformation / K. Taha, M. Bourfiss, A.S.J.M. Te Riele [et al.] // Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging. – 2021. – Vol. 22, № 8. – P. 950-958. doi: 10.1093/ehjci/jeaa088.

91. Aksu, U. A new era: Speckle tracking echocardiography and cardiomyopathies / U. Aksu, M.H. Uzun // J. Clin. Ultrasound. – 2022. – Vol. 50, № 9. – P. 1249-1250.

92. Ali, Y.A. Assessment of left ventricular systolic function after VSD transcatheter device closure using speckle tracking echocardiography / Y.A. Ali, M.A. Hassan, A.A. El Fiky // Egypt Heart J. – 2019. – Vol. 71, № 1. – P. 1. doi: 10.1186/s43044-019-0001-7.

93. Assessment of left ventricular twist by 3D ballistocardiography and seismocardiography compared with 2D STI echocardiography in a context of enhanced inotropism in healthy subjects / S. Morra, A. Hossein, J. Rabineau [et al.] // *Sci Rep.* – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 683. doi: 10.1038/s41598-020-79933-4.
94. Assessment of the Global and Regional Circumferential Strain of Abdominal Aortic Aneurysm with Different Size by Speckle-Tracking Echocardiography / T. Li, X. Liu, H. Sun [et al.] // *J. Ultrasound Med.* – 2021. – Vol. 40, № 12. – P. 2619-2627. doi: 10.1002/jum.15651.
95. Automated left atrial volume measurement by two-dimensional speckle-tracking echocardiography: feasibility, accuracy, and reproducibility / D.R. Florescu, L.P. Badano, M. Tomaselli [et al.] // *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* – 2021. – Vol. 23, № 1. – P. 85-94. doi: 10.1093/ehjci/jeab199.
96. Bedside Use of Speckle Tracking Echocardiography in the Emergency Department to Identify Acute Myocardial Infarction / J. Colla, J. Martin, W. Eilbert, M. Wishnoff // *J. Emerg. Med.* – 2019. – Vol. 56, № 5. – P. 530-535. doi: 10.1016/j.jemermed.2019.01.014.
97. Bhambhani, A. Comparison of three-dimensional echocardiography and speckle tracking echocardiography in quantification and mapping of intraventricular mechanical dyssynchrony / A. Bhambhani, A. Mathew // *Indian Heart J.* – 2019. – Vol. 71, № 3. – P. 256-262. doi: 10.1016/j.ihj.2019.04.006.
98. Blumberger, K. Die Herzdynamik in der Klinischen Diagnostik: Freiburger Collogiums uber Kreislaufmesungen / K. Blumberger. – Freiburg, 1958. – P. 99—127.
99. Braunwald's Heart Disease. A Textbook of Cardiovascular Medicine / D.L. Mann, D.P. Zipes, P. Libby [et al.]. – Saunders, 2014. – 2128 p.
100. Cardiac resynchronization therapy in patients with heart failure and narrow QRS complexes (≤ 130 ms): role of speckle tracking echocardiography and different interventricular (VV) pacing intervals / B.K. Kantharia, A. Singh, B. Narasimhan [et al.] // *J. Interv. Card. Electrophysiol.* – 2022. – Vol. 63, № 2. – P. 369-377. doi: 10.1007/s10840-021-01021-y.

101. Clinical utility of speckle-tracking echocardiography in cardiac resynchronisation therapy / S.G. Khan, D. Klettas, S. Kapetanakis, M.J. Monaghan // *Echo Res. Pract.* – 2016. – Vol. 3, № 1. – P. R1–R11.

102. Correlation Between Longitudinal Strain in the Apical Segments of the Left Ventricle at End-Systole Obtained by 2-Dimensional Speckle-Tracking Echocardiography and Left Ventricular Relaxation / K. Muto, K. Wakami, J. Yamamoto [et al.] // *Circ. J.* – 2021. – Vol. 85, № 9. – P. 1575-1583. doi: 10.1253/circj.CJ-20-1162.

103. Detection of myocardial dysfunction using global longitudinal strain with speckle-tracking echocardiography in patients with vs without rheumatoid arthritis: a systematic review and meta-analysis / V.K. Thallapally, R. Bansal, A. Thandra [et al.] // *J. Echocardiogr.* – 2022. doi: 10.1007/s12574-022-00583-8.

104. Detection of myocardial fibrosis by speckle-tracking echocardiography: from prediction to clinical applications / M. Lisi, M. Cameli, G.E. Mandoli [et al.] // *Heart Fail Rev.* – 2022. – Vol. 27, № 5. – P. 1857-1867. doi: 10.1007/s10741-022-10214-0.

105. Determinants and prognostic value of echocardiographic first-phase ejection fraction in aortic stenosis / R. Bing, H. Gu, C. Chin [et al.] // *Heart.* – 2020. – Vol. 106, № 16. – P. 1236-1243. doi: 10.1136/heartjnl-2020-316684.

106. Determinants of changes in pulmonary artery pressure in patients with severe aortic stenosis treated by transcatheter aortic valve implantation / M. Strachinaru, B. Ren, B.M. van Dalen [et al.] // *Acta Cardiol.* – 2021. – Vol. 76, № 2. – P. 185-193. doi: 10.1080/00015385.2019.1708599.

107. Dissecting myocardial mechanics in patients with severe aortic stenosis: 2-dimensional vs 3-dimensional-speckle tracking echocardiography / X. Bi, D.F. Yeung, H.M. Salah [et al.] // *BMC Cardiovasc. Disord.* – 2020. – Vol. 20, № 1. – P. 33. doi: 10.1186/s12872-020-01336-0.

108. *Doppler Myocardial Imaging* / G.R. Sutherland, L. Hatle, F. Rademarkers [et al.]. – Leuven, 2002. – 188 p.

109. Early Changes of Myocardial Function After Transcatheter Aortic Valve Implantation Using Multilayer Strain Speckle Tracking Echocardiography / K. Shiino, A. Yamada, G.M. Scalia [et al.] // *Am. J. Cardiol.* – 2019. – Vol. 123, № 6. – P. 956–960.

110. Early Effect of Essential Hypertension on the Left Ventricular Twist–Displacement Loop by Two–Dimensional Ultrasound Speckle Tracking Imaging / C. Qin, L. David Meggo–Quiroz, N.C. Nanda [et al.] // *Echocardiography.* – 2013. – Vol. 5, № 1. – P. 2456.

111. Echocardiographic risk factors of left ventricular thrombus in patients with acute anterior myocardial infarction / M. Chen, D. Liu, F. Weidemann [et al.] // *ESC Heart Fail.* – 2021. – Vol. 8, № 6. – P. 5248-5258. doi: 10.1002/ehf2.13605.

112. Elshafey, W.E.H. Effects of Sacubitril/Valsartan Treatment on Left Ventricular Myocardial Torsion Mechanics in Patients with Heart Failure Reduced Ejection Fraction 2D Speckle Tracking Echocardiography / W.E.H. Elshafey, E.A. Al Khoufi, E.K. Elmelegy // *J. Cardiovasc. Echogr.* – 2021. – Vol. 31, № 2. – P. 59-67. doi: 10.4103/jcecho.jcecho_118_20.

113. Equilibrium Radionuclide Angiography in Evaluation of Left Ventricular Mechanical Dyssynchrony in Patients with Dilated Cardiomyopathy: Comparison with Electrocardiographic Parameters and Speckle-Tracking Echocardiography / A. Singhal, B.C. Khangembam, S. Seth, C. Patel // *Indian J. Nucl. Med.* – 2019. – Vol. 34, № 2. – P. 88-95. doi: 10.4103/ijnm.IJNM_165_18.

114. ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure: The Task Force for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure of the European Society of Cardiology (ESC) Developed with the special contribution of the Heart Failure Association (HFA) of the ESC / P. Ponikowski, A.A. Voors, S.D. Anker [et al.] // *Eur. Heart J.* – 2016. – Vol. 37, № 27. – P. 2129–2200.

115. Estimation of Pulmonary Arterial Wave Reflection by Echo-Doppler: A Preliminary Study in Dogs With Experimentally-Induced Acute Pulmonary Embolism / T. Yoshida, T. Uejima, S. Komeda [et al.] // *Front. Physiol.* – 2021. - № 12. – P. 752550. doi: 10.3389/fphys.2021.752550.

116. Evaluation of Biventricular Functions in Transplanted Hearts Using 3-Dimensional Speckle-Tracking Echocardiography / Q. Lv, W. Sun, J. Wang [et al.] // *J. Am. Heart Assoc.* – 2020. – Vol. 9, № 10. – P. e015742. doi: 10.1161/JAHA.119.015742.
117. Exercise Response in Hypertrophic Cardiomyopathy: Blunted Left Ventricular Deformational and Twisting Reserve With Altered Systolic–Diastolic Coupling / C. Soullier, P. Obert, G. Doucende [et al.] // *Cardiovasc. Imaging.* – 2012. – № 5. – P. 324–332.
118. Feasibility of two-dimensional speckle-tracking echocardiography of aortic valve in patients with calcific aortic valve disease / O. Nemchyna, J. Knierim, M. Dandel [et al.] // *J. Biomech.* – 2021. – Vol. 122. – P. 110474. doi: 10.1016/j.jbiomech.2021.110474.
119. Frank, O. Zur Dynamic des Herzmuskels / O. Frank // *Z. Biol.* – 1985. – Bd. 32. – S. 370—392.
120. Frank–Starling–Straub law. – Режим доступа: <https://memim.com/frank-starling-law-of-the-heart.htm> (Дата обращения: 01.01.2020).
121. Hoffman, J.I. The helical ventricular myocardial band—or what's in a name? / J.I. Hoffman // *Echocardiography.* – 2016. – Vol. 33, № 10. – P. 1448–1449.
122. Influence of baseline left ventricular. Function on the clinical outcome of surgical ventricular reconstruction in patients with ischaemic cardiomyopathy / J.K. Oh, E.J. Velazquez, L. Menicanti [et al.] // *Eur. Heart J.* – 2013. – Vol. 34. – P. 39–47.
123. Innate Lymphoid Cells Promote Recovery of Ventricular Function After Myocardial Infarction / X. Yu, S.A. Newland, T.X. Zhao [et al.] // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2021. – Vol. 78, № 11. – P. 1127–1142. doi: 10.1016/j.jacc.2021.07.018.
124. Kardel, T. Steno on muscles: introduction, texts, translations / T. Kardel // *Trans. Am. Phylos. Soc.* – 1994. – Vol. 84, № 1. – P. 58–75.
125. Kwon, A. Morning blood pressure surge in the early stage of hypertensive patients impacts three-dimensional left ventricular speckle tracking echocardiography / A. Kwon, S.H. Ihm, C.S. Park // *Clin. Hypertens.* – 2021. – Vol. 27, № 1. – P. 16. doi: 10.1186/s40885-021-00173-3.

126. Left Ventricular Myocardial Deformations in Hemodialysis Children by Speckle Tracking Echocardiography / M.F. Elshamaa, F.A. Mostafa, I.A. Sad [et al.] // *Clin. Med. Insights Cardiol.* – 2020. - № 14. – P. 1179546820930015. doi: 10.1177/1179546820930015.
127. Left ventricular remodeling and torsion dynamics in hypertensive patients / M. Cameli, M. Lisi, F.M. Righini [et al.] // *Int. J. Cardiovasc. Imaging.* – 2013. – Vol. 29, № 1. – P. 79–86.
128. Left Ventricular Remodeling Risk Predicted by Two-Dimensional Speckle Tracking Echocardiography in Acute Myocardial Infarction Patients with Midrange or Preserved Ejection Fraction in Western Romania / D.A. Bordejevic, T. Pârvănescu, L. Petrescu [et al.] // *Ther. Clin. Risk Manag.* – 2021. – № 17. – P. 249-258. doi: 10.2147/TCRM.S295251.
129. Left ventricular strain for predicting the response to cardiac resynchronization therapy: two methods for one question / A. Hubert, A. Gallard, V.L. Rolle [et al.] // *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* – 2021. - doi: 10.1093/ehjci/jeaa422.
130. Left Ventricular Torsion in Hypertension and Hypertensive Heart Failure-3-Dimensional Speckle Tracking Echocardiography Assessment / S. Minatoguchi, T. Yoshizane, R. Tanaka [et al.] // *Circ. Rep.* – 2019. – Vol. 1, № 2. – P. 78-86. doi: 10.1253/circrep.CR-19-0001.
131. Lower, R. *Tractatus de Corde* / R. Lower. – London, UK: Oxford University Press, 1669.
132. Mazurek, J.A. *Understanding Heart Failure* / J.A. Mazurek, M. Jessup // *Heart Fail Clin.* – 2017. – Vol. 13, № 1. – P. 1-19. doi: 10.1016/j.hfc.2016.07.001.
133. Measurement of ventricular torsion by two-dimensional ultrasound speckle tracking imaging / Y. Notomi, P. Lysyansky, R.M. Setser [et al.] // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2005. – Vol. 45. – P. 2034–2041.
134. Mirsky, I. Assessment of passive elastic stiffness for isolated heart muscle and the intact heart / I. Mirsky, W.W. Parmley // *Circ. Res.* – 1973. – Vol. 33. – P. 233–243.

135. Mohseni-Badalabadi, R. Evaluation of the left atrial function by two-dimensional speckle-tracking echocardiography in diabetic patients with obesity / R. Mohseni-Badalabadi, S. Mehrabi-Pari, A. Hosseinsabet // *Int. J. Cardiovasc. Imaging.* – 2020. – Vol. 36, № 4. – P. 643-652. doi: 10.1007/s10554-020-01768-x.
136. Multifocal intra-wall gas appearance of the aorta was the presage of an infectious aneurysm / T. Nakamura, M. Hyodo, K. Murata [et al.] // *Eur. Heart J.* – 2021. – Vol. 42, № 35. – P. 3579. doi: 10.1093/eurheartj/ehaa1045.
137. Myocardial strain to detect subtle left ventricular systolic dysfunction / L.F. Tops, V. Delgado, N.A. Marsan, J.J. Bax // *Eur. J. Heart Fail.* – 2017. – Vol. 19, № 3. – P. 307-313. doi: 10.1002/ejhf.694.
138. Native cardiac magnetic resonance T1 mapping and cardiac mechanics as assessed by speckle tracking echocardiography in patients with beta-thalassaemia major / W.S. See, E.K. So, G.Y. Hwang [et al.] // *Int. J. Cardiol. Heart Vasc.* – 2021. – Vol. 38. – P. 100947. doi: 10.1016/j.ijcha.2021.100947.
139. Naturalistic Decision Making in Everyday Self-care Among Older Adults With Heart Failure / C.N. Daley, V.P. Cornet, T.R. Toscos [et al.] // *J. Cardiovasc. Nurs.* – 2022. – Vol. 37, № 2. – P. 167-176. doi: 10.1097/JCN.0000000000000778.
140. Normal left ventricular mechanics by two-dimensional speckletracking echocardiography. Reference values in healthy adults / G. Kocabay, D. Muraru, D. Peluso [et al.] // *Rev. Esp. Cardiol. (Engl. Ed.)*. – 2014. – Vol. 67, № 8. – P. 651–658.
141. Normal range of left ventricular 2-dimensional strain. Japanese ultrasound speckle tracking of the left ventricle study / K. Takigiku, M. Takeuchi, C. Izumi [et al.] // *Circ. J.* – 2012. – Vol. 76, № 11. – P. 2623–2632.
142. Normal ranges of left ventricular strain by three-dimensional speckle-tracking echocardiography in adults: a systematic review and meta-analysis / V.T. Truong, H.T. Phan, K.N.P. Pham [et al.] // *J. Am. Soc. Echocardiogr.* – 2019. – Vol. 32, № 12. – P. 1586–1597.
143. Pislaru, C. Two-dimensional speckle tracking echocardiography: basic principles / C. Pislaru, T.P. Abraham, M. Belohlavek // *Heart J.* – 2010. – Vol. 96. – P. 716–722.

144. Predictive value of left ventricular myocardial strain by four-dimensional speckle tracking echocardiography combined with red cell distribution width in heart failure with preserved ejection fraction / S. Fang, Z. Zhang, Y. Wang [et al.] // *Echocardiography*. – 2019. – Vol. 36, № 6. – P. 1074-1083. doi: 10.1111/echo.14373.

145. Predictive Value of Two-Dimensional Speckle-Tracking Echocardiography in Patients Undergoing Surgical Ventricular Restoration / O. Nemchyna, N. Solowjowa, M. Dandel [et al.] // *Front. Cardiovasc. Med.* – 2022. – № 9. – P. 824467. doi: 10.3389/fcvm.2022.824467.

146. Pregnancy Complications Lead to Subclinical Maternal Heart Dysfunction-The Importance and Benefits of Follow-Up Using Speckle Tracking Echocardiography / M.R. Popescu, A. Bouariu, A.M. Ciobanu [et al.] // *Medicina (Kaunas)*. – 2022. – Vol. 58, № 2. – P. 296. doi: 10.3390/medicina58020296.

147. Preload Dependency of 2D Right Ventricle Speckle Tracking Echocardiography Parameters in Healthy Volunteers: A Prospective Pilot Study / C. Beyls, Y. Bohbot, M. Caboche [et al.] // *J. Clin. Med.* – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 19. doi: 10.3390/jcm11010019.

148. Prognostic implications of left ventricular strain by speckle-tracking echocardiography in the general population: a meta-analysis / L. Al Saikhan, C. Park, R. Hardy, A. Hughes // *Vasc. Health Risk Manag.* – 2019. – № 15. – P. 229-251. doi: 10.2147/VHRM.S206747.

149. Prognostic Value of a Tissue Doppler Index of Systodiastolic Function in Patients with Asymptomatic Heart Failure / N.R. Pugliese, I. Fabiani, S. La Carrubba [et al.] // *J. Cardiovasc. Echogr.* – 2018. – Vol. 28, № 2. – P. 95–100.

150. Quantification of left ventricular performance in different heart failure phenotypes by comprehensive ergometry stress echocardiography / J. Wang, F. Fang, G.W. Yip [et al.] // *Int. J. Cardiol.* – 2013. – Vol. 169, № 4. – P. 311–315.

151. Quantitative evaluation of fetal ventricular function by speckle tracking echocardiography / L. Luo, H. Liu, S. Zhou [et al.] // *Echocardiography*. – 2021. – Vol. 38, № 11. – P. 1924-1931. doi: 10.1111/echo.15240.

152. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging / R.M. Lang, L.P. Badano, V. Mor-Avi [et al.] // *J. Am. Soc. Echocardiogr.* – 2015. – Vol. 28. – P. 1–39.

153. Recovery of regional systolic and diastolic myocardial function after acute myocardial infarction evaluated by two-dimensional speckle tracking echocardiography / K. Wdowiak-Okrojek, P. Wejner-Mik, J.D. Kasprzak, P. Lipiec // *Clin. Physiol. Funct. Imaging.* – 2019. – Vol. 39, № 2. – P. 177-181. doi: 10.1111/cpf.12553.

154. Relationships among pulmonary capillary wedge pressure, dry weight and natriuretic peptide in patients undergoing hemodialysis: a three-dimensional speckle tracking echocardiography study / H. Sato, M. Kawasaki, R. Tanaka [et al.] // *J. Echocardiogr.* – 2020. – Vol. 18, № 3. – P. 160-168. doi: 10.1007/s12574-020-00461-1.

155. Role of sacubitril-valsartan in the prevention of atrial fibrillation occurrence in patients with heart failure: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials / X. Liu, H. Liu, L. Wang [et al.] // *PLoS One.* – 2022. – Vol. 17, № 1. – P. e0263131. doi: 10.1371/journal.pone.0263131.

156. Rushmer, R. Cardiovascular dynamics / R. Rushmer. – Philadelphia; London, 1961. – 517 p.

157. Singh, A. The role of computed tomography myocardial perfusion imaging in clinical practice / A. Singh, V. Mor-Avi, A.R. Patel // *J. Cardiovasc. Comput. Tomogr.* – 2020. – Vol. 14, № 2. – P. 185-194. doi: 10.1016/j.jcct.2019.05.011.

158. Speckle Tracking Echocardiography: Early Predictor of Diagnosis and Prognosis in Coronary Artery Disease / M.C. Pastore, G.E. Mandoli, F. Contorni [et al.] // *Biomed. Res. Int.* – 2021. – 2021. – P. 6685378. doi: 10.1155/2021/6685378.

159. Speckle tracking imaging in inflammatory heart diseases / M. Leitman, Z. Vered, V. Tyomkin [et al.] // *Int. J. Cardiovasc. Imaging.* – 2018. – Vol. 34, № 5. – P. 787–792.

160. Speckle-Tracking Echocardiography to Visual Assessment of Systolic Wall Motion Abnormalities Improves the Detection of Myocardial Infarction / M.J.W. van

Mourik, D.V.J. Zaar, M.W. Smulders [et al.] // *J. Am. Soc. Echocardiogr.* – 2019. – Vol. 32, № 1. – P. 65-73. doi: 10.1016/j.echo.2018.09.007.

161. Spectral Doppler, tissue Doppler, and speckle-tracking echocardiography for the evaluation of fetal cardiac function: an update / A.B. Peixoto, N.J. Bravo-Valenzuela, L.A. Rocha, E. Araujo Júnior // *Radiol. Bras.* – 2021. – Vol. 54, № 2. - P. 99-106. doi: 10.1590/0100-3984.2020.0052.

162. Standardization of left atrial, right ventricular, and right atrial deformation imaging using two-dimensional speckle tracking echocardiography: a consensus document of the EACVI/ASE/Industry Task Force to standardize deformation imaging / L.P. Badano, T.J. Kolias, D. Muraru [et al.] // *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* – 2018. – Vol. 19, № 6. – P. 591-600. doi: 10.1093/ehjci/jey042.

163. Starling, E. The linacre lecture on the law of the heart / E. Starling. – London, 1918. – 27 p.

164. Subtle cardiac dysfunction in nephropathic cystinosis: insight from tissue Doppler imaging and 2D speckle tracking echocardiography / M.H. Afify, S.M. Abdelrahman, H.I. Mohamed [et al.] // *Pediatr. Nephrol.* – 2020. – Vol. 35, № 12. - P. 2307-2317. doi: 10.1007/s00467-020-04657-6.

165. Takeuchi, M. Application of left ventricular strain to patients with coronary artery disease / M. Takeuchi, V.C. Wu // *Curr. Opin. Cardiol.* – 2018. – Vol. 33, № 5. – P. 464-469.

166. The assessment of left ventricular twist in anterior wall myocardial infarction using two-dimensional speckle tracking imaging / M. Takeuchi, T. Nishikage, H. Nakai [et al.] // *J. Am. Soc. Echocardiogr.* – 2007. – Vol. 20. – P. 36–44.

167. The heart / ed. J.W. Huist, R.B. Logue. – N. Y.: McGraw Hill, 1970. – 1681 p.

168. The hemodynamic effect of simulated atrial fibrillation on left ventricular function / P. Stojadinović, A. Deshraj, D. Wichterle [et al.] // *J. Cardiovasc. Electrophysiol.* – 2022. - doi: 10.1111/jce.15669.

169. The Role of Left-Atrial Mechanics Assessed by Two-Dimensional Speckle-Tracking Echocardiography to Differentiate Hypertrophic Cardiomyopathy

from Hypertensive Left-Ventricular Hypertrophy / N.M. Popa-Fotea, M.M. Micheu, N. Oprescu [et al.] // *Diagnostics (Basel)*. – 2021. – Vol. 11, № 5. – P. 814. doi: 10.3390/diagnostics11050814.

170. The Role of Speckle Tracking Echocardiography in the Evaluation of Common Inherited Cardiomyopathies in Children and Adolescents: A Systematic Review / D.M. Dorobantu, C.A. Wadey, N.H. Amir [et al.] // *Diagnostics (Basel)*. – 2021. – Vol. 11, № 4. – P. 635. doi: 10.3390/diagnostics11040635.

171. The Speckle Tracking Imaging for the Assessment of Cardiac Resynchronization Therapy (START) study / T. Maruo, Y. Seo, S. Yamada [et al.] // *Circ. J.* – 2015. – Vol. 79, № 3. – P. 613–622.

172. The structure and function of the helical heart and its buttress wrapping. I. The normal macroscopic structure of the heart / F. Torrent–Guasp, G.D. Buckberg, C. Clemente [et al.] // *Semin. Thorac. Cardiovasc. Surg.* – 2001. – Vol. 13, № 4. – P. 301–319.

173. Torrent–Guaspa, F. Towards new understanding of the heart structure and function / F. Torrent–Guaspa, M.J. Kocicab, A.F. Cornoc [et al.] // *Eur. J. Cardiothorac. Surg.* – 2015. – Vol. 27, № 2. – P. 191–201.

174. Torsion of the human left ventricle: Experimental analysis and computational modeling / A. Evangelista, P. Nardinocchi, P.E. Puddu [et al.] // *Prog. Biophys. Mol. Biol.* – 2011. – Vol. 107. – P. 112–121.

175. Usefulness of speckle-tracking echocardiography for early detection in children with Duchenne muscular dystrophy: a meta-analysis and trial sequential analysis / G. Song, J. Zhang, X. Wang [et al.] // *Cardiovasc. Ultrasound*. – 2020. – Vol. 18, № 1. – P. 26. doi: 10.1186/s12947-020-00209-y.

176. Validation of estimating left ventricular ejection fraction by mitral annular displacement derived from speckle-tracking echocardiography: A neglected method for evaluating left ventricular systolic function / Y. Wang, Y. Zhang, G. Li [et al.] // *J. Clin. Ultrasound*. – 2021. – Vol. 49, № 6. – P. 563-572. doi: 10.1002/jcu.22987.

177. Value of 3D Versus 2D Speckle-Tracking Echocardiography for RV Strain Measurement: Validation With Cardiac Magnetic Resonance / Y. Li, X. Wan, Q. Xiao

[et al.] // JACC Cardiovasc. Imaging. – 2020. – Vol. 13, № 9. – P. 2056-2058. doi: 10.1016/j.jcmg.2020.04.016.

178. Yuda, S. Current clinical applications of speckle tracking echocardiography for assessment of left atrial function / S. Yuda // J. Echocardiogr. – 2021. – Vol. 9, № 3. – P. 129-140. doi: 10.1007/s12574-021-00519-8.