

*На правах рукописи*



Сагирова Жанна Насибуллаевна

**Параметры пульсовой волны, зарегистрированной одноканальным монитором электрокардиограммы с функцией фотоплетизмографии, в оценке систолической функции левого желудочка**

3.1.20. Кардиология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата медицинских наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет)

**Научный руководитель:**

доктор медицинских наук, доцент

**Чомахидзе Петр Шалвович**

**Официальный оппоненты:**

**Фомин Игорь Владимирович** – доктор медицинских наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Приволжский исследовательский медицинский университет" Министерства здравоохранения Российской Федерации, кафедра госпитальной терапии и общей врачебной практики имени В.Г. Вогралика, заведующий кафедрой

**Ускач Татьяна Марковна** – доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии имени академика Е.И. Чазова" Министерства здравоохранения Российской Федерации, отдел заболеваний миокарда и сердечной недостаточности, ведущий научный сотрудник

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Защита диссертации состоится «14» апреля 2026 года на заседании диссертационного совета ДСУ 208.001.21 при ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет) по адресу 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной учебной библиотеке ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) (119034, г. Москва, Зубовский бульвар, д.37/1) и на сайте организации: <https://www.sechenov.ru>

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор медицинских наук, профессор



**Брагина Анна Евгеньевна**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Оценка систолической функции левого желудочка на данный момент проводится при диагностике большинства сердечно-сосудистых и ряда других заболеваний. Снижение систолической функции левого желудочка (ЛЖ) приводит к возникновению сердечной недостаточности. Хроническая сердечная недостаточность (ХСН) в настоящее время является важной проблемой мирового здравоохранения. Проводить оценку систолической функции ЛЖ необходимо не только с целью первоначального выявления дисфункции миокарда, но также и в динамике. Состояние сократительной способности ЛЖ может меняться на фоне проводимого лечения, коррекции медикаментозной терапии. В связи с этим возникает необходимость проведения динамического контроля систолической функции ЛЖ. Однако выполнение оценки сократительной функции ЛЖ в виде скрининга или контроля в динамике с помощью общепринятых методов диагностики (в том числе, эхокардиографии) может быть затруднительно вследствие экономических причин или труднодоступности исследований. Поэтому разработка способов определения систолической функции ЛЖ на основе более доступных для скрининга диагностических методов является актуальной задачей.

В течение последних десятилетий разрабатываются различные алгоритмы оценки сократительной функции миокарда с применением данных электрокардиограммы (ЭКГ) и/или пульсовой волны (или фотоплетизмограммы). Данные методы регистрации кардосигналов могут использоваться в составе портативных устройств, что позволяет проводить регистрацию ЭКГ и фотоплетизмограммы (ФПГ) удаленно. Таким образом, разработка алгоритмов оценки систолической функции ЛЖ на основе ЭКГ и ФПГ позволит не только оптимизировать выполнение скрининга дисфункции миокарда, но и проводить дистанционный мониторинг пациентов с нарушением систолической функции ЛЖ.

## **Степень разработанности темы**

На данный момент в мире проведены исследования, доказывающие взаимосвязь между данными ЭКГ или ФПГ и систолической функции ЛЖ. В России были выполнены работы, в которых доказывалась возможность определения нарушения сократительной функции миокарда по данным ЭКГ. Ученые изучали роль изменений комплекса QRS, а также интервала QT, на снижение систолической функции ЛЖ. Зарубежные исследователи также изучали данный вопрос и представили вниманию различные алгоритмы, которые были разработаны на основе анализа стандартной ЭКГ, зарегистрированной в 12 отведениях. При анализе мировой научной литературы не удалось найти исследований, в которых изучалась взаимосвязь ФПГ и ФВ ЛЖ. Однако существует множество работ, которые доказали возможность оценки по данным пульсовой волны такого важного показателя работы сердца как сердечный выброс (СВ). Исследователи продолжают совершенствовать методы определения СВ по ФПГ, с целью повышения точности данных способов. Также проводятся исследования по определению сердечной недостаточности на основе комбинированных данных ЭКГ и ФПГ. Несмотря на то, что подобных работ в настоящее время немного, данное направление, безусловно, является весьма перспективным.

## **Цель и задачи исследования**

Целью данной научной работы было выявление параметров электрокардиограммы и пульсовой волны, имеющих достоверную корреляцию с нарушением сократительной функции сердца и определение точности одноканального монитора ЭКГ с функцией фотоплетизмографии в оценке снижения систолической функции ЛЖ.

Задачи исследования:

1. Сопоставить данные одноканального ЭКГ монитора с функцией фотоплетизмографии с показателями ЭХОКГ и выявить параметры ЭКГ, ассоциированные со снижением систолической функции ЛЖ.
2. На основе полученных данных выявить параметры пульсовой волны, ассоциированные со снижением систолической функции ЛЖ.
3. Разработать многофакторные модели машинного обучения для выявления снижения систолической функции ЛЖ по данным ЭКГ и пульсовой волны.
4. Оценить качество полученных моделей и определить оптимальную многофакторную модель для определения снижения систолической функции ЛЖ на основе параметров ЭКГ и пульсовой волны.
5. Провести апробацию наиболее точной модели на тестовой выборке пациентов.
6. Сравнить значения артериального давления, полученные на основе применения метода Короткова и при помощи одноканального монитора электрокардиограммы с функцией фотоплетизмографии.

### **Научная новизна**

Впервые выполнен вейвлет-анализ одноканальной ЭКГ с проведением сопоставления полученных данных с показателями ЭХОКГ и определены параметры ЭКГ, ассоциированные со снижением систолической функции ЛЖ.

Впервые выполнен анализ кривой пульсовой волны с проведением сопоставления полученных данных с показателями ЭХОКГ и определены параметры пульсовой волны, ассоциированные со снижением систолической функции ЛЖ.

Впервые разработаны многофакторные модели машинного обучения для оценки снижения систолической функции ЛЖ с применением комбинации параметров ЭКГ и ФПГ.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработанные модели машинного обучения для определения снижения систолической функции ЛЖ на основе параметров ЭКГ и пульсовой волны (ФПГ), могут найти применение в клинической практике как в целях проведения диагностического скрининга пациентов, так и для динамического наблюдения за состоянием кардиологических больных.

## **Методология и методы исследования**

Исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе выполнялась регистрация одноканальной ЭКГ и пульсовой волны с помощью кардиомонитора CardioQVARK (ООО «КардиоКВАРК», Москва, Россия). Далее осуществлялось выявление параметров ЭКГ и ФПГ, ассоциированных с нарушением систолической функции ЛЖ. На следующем этапе на основе выявленных параметров ЭКГ и ФПГ выполнялось построение многофакторных моделей с применением методов машинного обучения. На завершающем этапе исследования проводилась апробация и оценка диагностической точности разработанной модели, которая продемонстрировала наилучшие результаты по данным статистического анализа.

## **Положения выносимые на защиту**

1. Среди параметров ЭКГ наиболее значимые корреляции с показателями систолической функции ЛЖ имеют параметры: TA (амплитуда T-волны), J80A (амплитуда в точке J+80мс), RonsF (частота максимальной энергии переднего фронта R-волны), RoffsF (частота максимальной энергии заднего фронта R-волны). Выявленные параметры ЭКГ, ассоциированы как со снижением ФВ, так и со снижением VTI в ВТЛЖ.

2. При анализе данных было выявлено, что параметры ФПГ не имеют достоверную ассоциацию со снижением ФВ, однако значимо коррелируют со снижением скоростного показателя систолической функции – VTI в ВТЛЖ менее 16 см. Такими параметрами ФПГ являются временные интервалы между точками пульсовой волны: DP-B0 и DP-SEP (интервалы от пика диастолической волны до точки максимального роста переднего фронта и до точки изгиба прямой систолической волны), SEPMAX-BO SEPMAX-SEP (интервал от точки пика прямой систолической волны, полученной на основе вейвлет-преобразования, до точки максимального роста переднего фронта и до точки изгиба пика прямой систолической волны).

3. На основе анализа комбинированных параметров ЭКГ и ФПГ было выявлено, что наибольшей диагностической точностью обладают следующие комбинированные параметры: RonsF\*DP-B0, RonsF\*DP-SEP, RonsF\*SEPMAX-BO, RonsF\*SEPMAX-SEP (произведение частоты максимальной энергии переднего фронта R-волны ЭКГ на временные параметры пульсовой волны).

4. Разработанные модели машинного обучения для определения снижения систолической функции ЛЖ на основе параметров ЭКГ и пульсовой волны имеют достоверно высокие значения площади под ROC кривой, чувствительности и специфичности. Диагностическая точность как модели на основе регрессии Лассо, так и на основе алгоритма случайный лес достаточно высокая и для оценки ФВ, и для VTI в ВТЛЖ.

5. При проведении апробации модели, диагностическая точность оценки снижения ФВ менее 55%, менее 41%, менее 30% составили 94,1%, 95,1% и 98% соответственно.

### **Соответствие паспорту специальности**

Цели, задача, основные положения и выводы соответствует паспорту специальности 3.1.20 Кардиология. Результаты выполненной работы соответствует

области исследования специальности, а именно пунктам 13, 15 паспорта кардиологии.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов исследования подтверждается достаточным объемом полученного материала, использованием современных методов диагностики, а также проведением статистической обработки данных.

Результаты работы были представлены на международных конференциях в виде устных и постерных докладов: Российский национальный конгресс кардиологов (Москва, 2021г.), конгресс Европейского кардиологического общества (online, 2021г.), Ежегодная Всероссийская научно-практическая конференция «Кардиология на марше 2021» и 61-я сессия ФГБУ «НМИЦ Кардиологии» Минздрава России (Москва, 2021г.).

Апробация диссертации состоялась 17 ноября 2023 года на научно-методическом заседании кафедры кардиологии, функциональной и ультразвуковой диагностики Института клинической Медицины имени Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет).

### **Внедрение результатов в практику**

Результаты диссертационной работы используется в лечебно-диагностическом процессе на базе Университетской Клинической Больницы №1 ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет). Основные положения и результаты диссертационного исследования включены в образовательный процесс на базе кафедры кардиологии, функциональной и ультразвуковой диагностики Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет).

## **Личный вклад автора**

Автору принадлежит ведущая роль в формулировке цели, задач, а также разработке дизайна представленного исследования. Также автор самостоятельно проводил набор пациентов в исследование в соответствии с критериями включения, выполнял регистрацию записей ЭКГ и пульсовой волны с помощью одноканального монитора электрокардиограммы с функцией фотоплетизмографии, анализ и обработку полученных статистических данных и результатов исследования. Выполнена работа по донесению основных результатов диссертационного исследования до медицинского сообщества путем публикаций в отечественных и зарубежных журналах, выступлений на международных конференциях.

## **Публикации по теме исследования**

По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 1 научная статья в журнале, включенном в Перечень рецензируемых научных изданий Сеченовского Университета/ Перечень ВАК при Минобрнауки России, 1 статья в изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus, 4 иные публикации по теме исследования, 6 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций (из них 2 зарубежных конференций), зарегистрированы 3 патента.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация представляет собой текст, состоящий из введения, 4 глав (обзор литературы, материалы и методы, результаты, обсуждение), заключения, выводов, практических рекомендаций. Список литературы состоит из 126 источников, из которых 38 отечественных, 88 зарубежных.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Материалы и методы исследования

Данное проспективное исследование проводилось на базе ФГАОУ ВО Первого Московского Государственного Медицинского Университета им. И.М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва, Россия. Исследование носило обсервационный характер и проведение работы было одобрено Локальным Этическим Комитетом Сеченовского Университета. Также была выполнена регистрация исследования на сайте ClinicalTrials.gov (ID: NCT04788342).

В исследование включались пациенты Университетской клинической больницы №1, которым проводилось амбулаторное или стационарное обследование и лечение. Основные этапы и общий дизайн исследования представлен на Рисунке 1. В исследование включались пациенты возрастом старше 18 лет, как имеющие кардиологическую патологию, так и без нее. Всем пациентам проводилось медицинское обследование, которое включало: сбор анамнестических данных, измерение систолического и диастолического артериального давления. Затем всем участникам исследования выполнялась трансторакальная ЭХОКГ, регистрация ЭКГ и ФПГ.

При проведении ЭХОКГ оценивалась фракция выброса (ФВ) ЛЖ. Расчет ФВ ЛЖ проводился по модифицированному методу Симпсона (методика VIPLANE). Во время проведения описываемого исследования было принято решение, что в качестве критерия нарушения сократительной функции ЛЖ учитывать снижение ФВ ЛЖ менее 55% независимо от пола. Пациенты со снижением показателя ФВ были разделены на три группы: менее 55%, менее 41%, менее 30%. С использованием доплер-ЭХОКГ осуществлялось определение интеграла линейной скорости кровотока VTI в выносящем тракте ЛЖ (VTI ВТЛЖ). Снижение VTI ВТЛЖ менее 16см и менее 13см рассматривалось как нарушение систолической функцией ЛЖ.

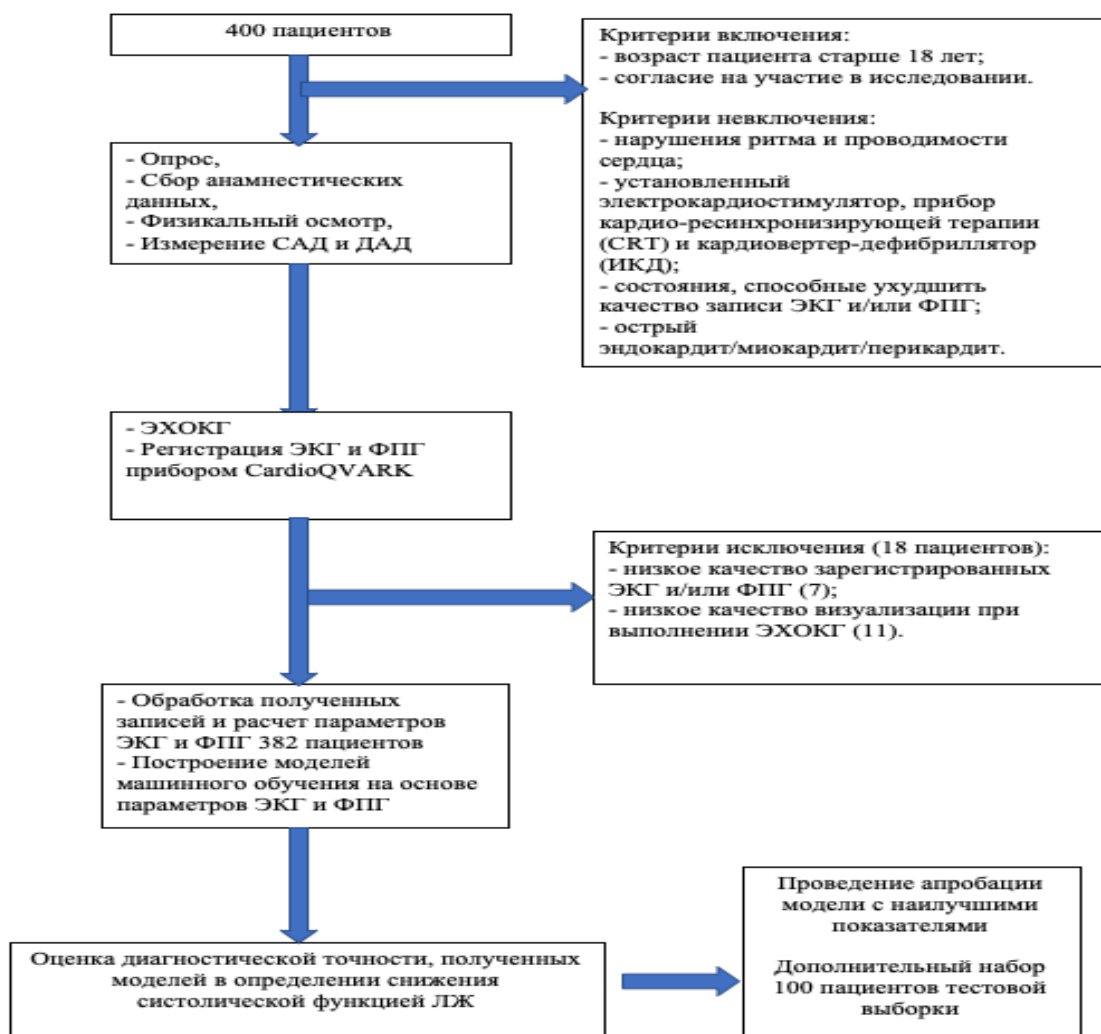


Рисунок 1 – Дизайн исследования

Всем участникам исследования осуществлялась регистрация ЭКГ и ФПГ длительностью 3 минуты. Запись сигналов проводилась в состоянии покоя, сразу после окончания ЭХОКГ. Регистрация ЭКГ (в I стандартном отведении) и ФПГ выполнялась с пальцев обеих рук пациента с помощью прибора CardioQVARK (ООО «Л Кард», Москва, Россия). Данное устройство является портативным одноканальным электрокардиографом с функцией регистрации фотоплетизмографии. Кардиомонитор CardioQVARK изготовлен в виде чехла для смартфона и имеет регистрацию в Федеральной службе по надзору в сфере здравоохранения №РЗН 2019/8124 от 15.02.2019г. Прибор подключается к используемому смартфону, на котором установлено специальное программное приложение и проводит синхронную регистрацию ЭКГ и ФПГ. Кардиомонитор

имеет 2 датчика для записи ЭКГ, один из которых также используется для регистрации ФПГ. Устройство определяет пульс, вариабельность сердечного ритма, интервалы ЭКГ. С помощью одноименного приложения, монитор CardioQVARK отправляет все полученные данные на платформу, к которой имеет доступ врач, тем самым в режиме реального времени, дистанционно лечащий доктор может получить информацию о пациенте, оценить ЭКГ и другие доступные показатели. В рамках нашего исследования все записанные сигналы передавались также на единый сервер, где в дальнейшем они обрабатывались и подвергались спектральному вейвлет-преобразованию. Затем был выполнен расчет как временных и амплитудных, так и частотных параметров ЭКГ и ФПГ.

### **Статистический анализ данных**

Статистический анализ полученных данных проводился в несколько этапов (Рисунок 2). На первом этапе в рамках программы SPSS было выполнено выявление параметров ЭКГ и ФПГ, ассоциированных с нарушением систолической функции ЛЖ. Оценка различий между параметрами для пациентов с  $ФВ > 55\%$  и  $ФВ < 55\%$  проводилась с применением непараметрического U-критерия Манна-Уитни. Значение  $p < 0.05$  определялось как статистически значимое. С помощью ROC анализа осуществлялось определение прогностической значимости выявленных параметров. Для этих параметров был выполнен расчет площади под кривой (AUC), чувствительности, а также специфичности.

На втором этапе в среде Anaconda (r 2021.05, Python 3.8.8) проводилось построение моделей на основе языка программирования Python v3.8.8 с применением методов регрессии Лассо и случайный лес. Разработка моделей машинного обучения выполнялась с использованием параметров ЭКГ и ФПГ и клинико-демографических данных (возраст, пол, наличие сердечно-сосудистых или иных заболеваний и т.д.). На основе значения площади под кривой проходил отбор наилучшей модели, имеющей более высокий показатель AUC. Далее отобранные модели подвергались валидации в пределах тестовой выборки. Расчет

площади под кривой (AUC), чувствительности и специфичности выполнялся для каждой модели. На следующем этапе работы была выполнена апробация модели, которая продемонстрировала наилучшие результаты.

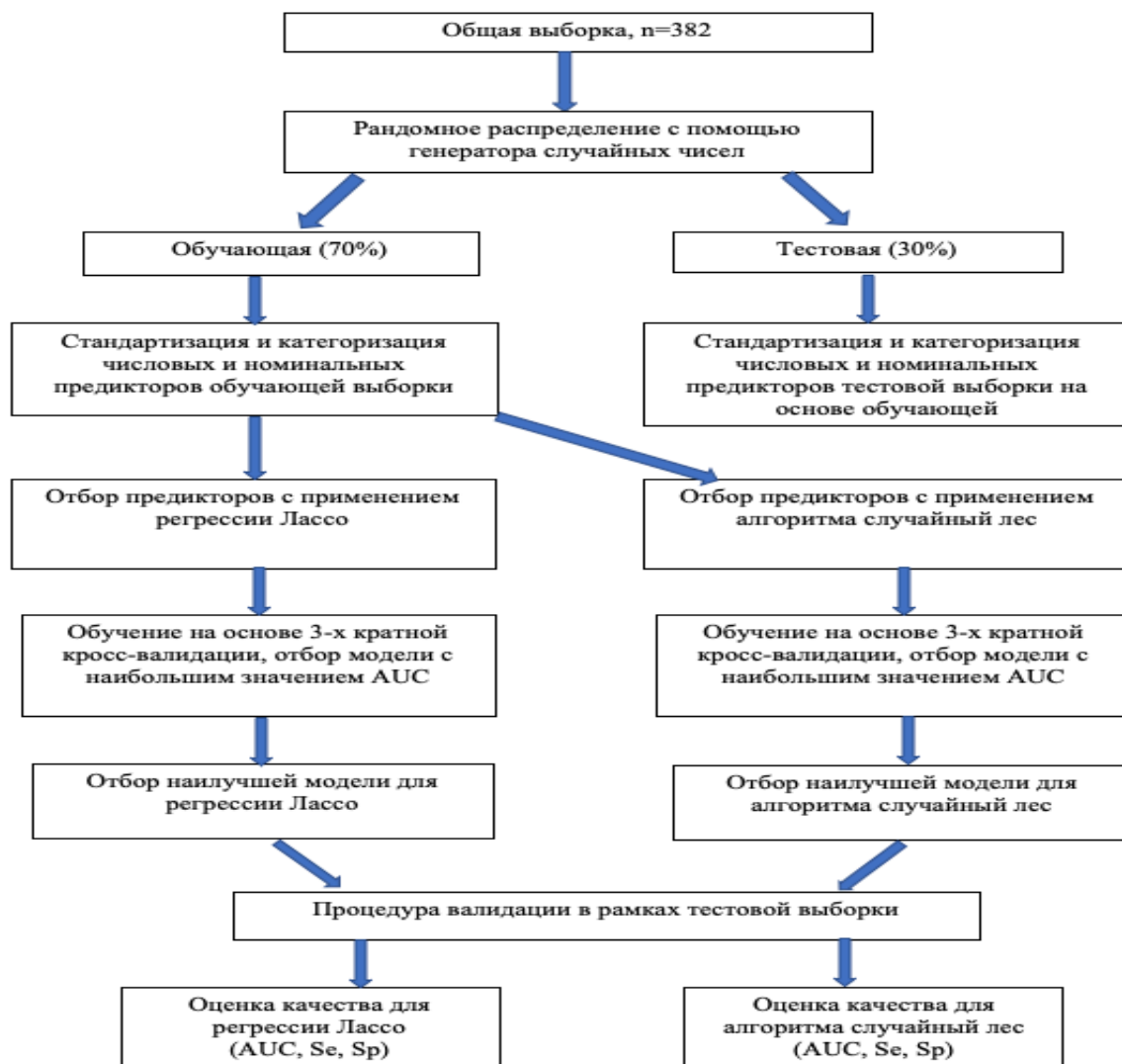


Рисунок 2 – Этапы разработки прогностических моделей

В рамках этого исследования также проводилась оценка точности измерения артериального давления с помощью одноканального монитора электрокардиограммы с функцией фотоплетизмографии. Кардиомонитор CardioQVARK проводил расчет АД, используя специальный алгоритм на основе параметров ЭКГ и ФПГ. Далее выполнялся статистический анализ Бланд-Алтман, в котором сравнивали значения АД, полученные при измерении с помощью сфигмоманометра с манжетой, и показатели, рассчитанные кардиомонитором.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе были зарегистрированы данные 400 пациентов, из них 18 были исключены из исследования вследствие низкого качества зарегистрированных ЭКГ и/или ФПГ (7) и низкого качества визуализации при выполнении ЭХОКГ (11). В дальнейший анализ вошли данные 382 пациентов (Таблица 1). На втором этапе работы проводилась апробация полученных результатов и дополнительно было включено 100 пациентов.

Таблица 1 – Описательная характеристика пациентов (n=382)

Признак	Значение, n (%)
Возраст, лет (среднее $\pm$ SD)	56 $\pm$ 17,4
Мужчины, n (%)	229 (59,9%)
Женщины, n (%)	153 (40,1%)
Ишемическая болезнь сердца, n (%)	90 (23,6%)
Наличие постинфарктного кардиосклероза	29 (7,6 %)
Стабильная стенокардия напряжения	61 (16,0 %)
Сахарный диабет 2 типа, n (%)	53 (13,9%)
Фибрилляция предсердий в момент записи ЭКГ и ФПГ, n (%)	13 (3,4%)
Артериальная гипертония	236 (61,8 %)
1 стадия, n (%) / Stage 1, n (%)	37 (9,7%)
2 стадия, n (%) / Stage 2, n (%)	114 (29,8%)
3 стадия, n (%) / Stage 3, n (%)	85 (22,3%)
Хроническая сердечная недостаточность	39 (10,2 %)
1 степень ФК (NYHA), n (%)	4 (1,0%)
2 степень ФК (NYHA), n (%)	18 (4,7%)
3 степень ФК (NYHA), n (%)	16 (4,2%)
4 степень ФК (NYHA), n (%)	1 (0,3%)
Курение, n (%)	70 (18,3 %)
Примечание: SD – standard deviation (стандартное отклонение), ЭКГ – электрокардиограмма, ФПГ – фотоплетизмограмма, ФК – функциональный класс	

Для оценки межгрупповых различий для пациентов, имеющих ФВ менее 55% и ФВ более 55%, был применен U-критерий Манна-Уитни. Среди параметров ЭКГ наиболее значимые корреляции с показателями сократительной функции ЛЖ показали параметры: TA (амплитуда T-волны), J80A (амплитуда в точке J+80мс), RonsF (частота максимальной энергии переднего фронта R-волны), RoffsF (частота максимальной энергии заднего фронта R-волны). При выполнении ROC анализа были определены параметры ЭКГ, ассоциированные с ФВ менее 55%, менее 40%, а также значением VTI в ВТЛЖ менее 16 см (Рисунок 3).

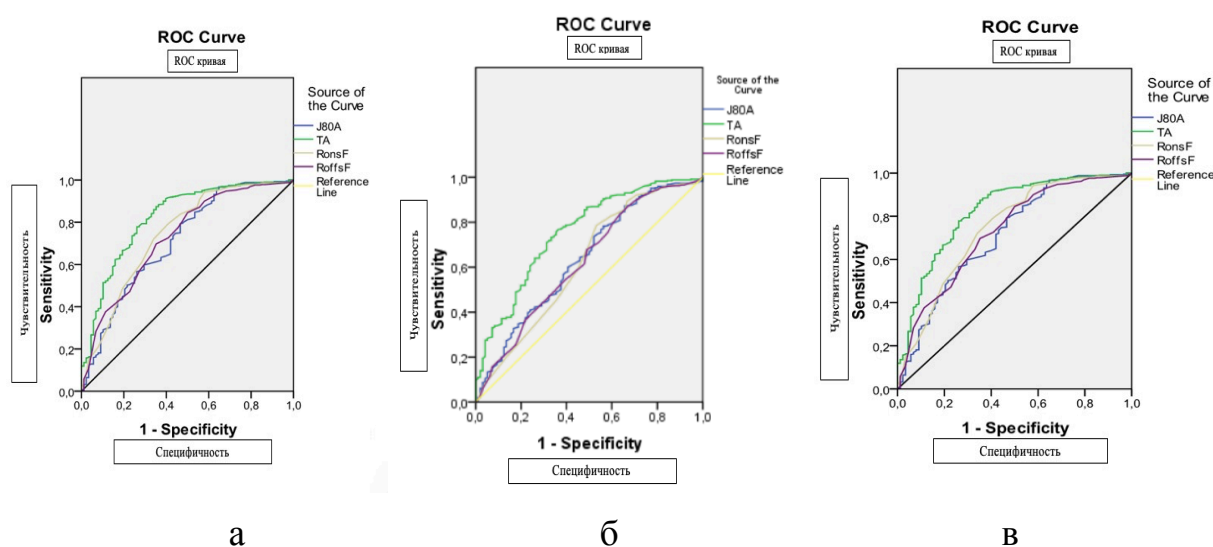


Рисунок 3 – ROC анализ параметров ЭКГ, при ФВ менее 55% (1а), менее 40% (1б), VTI в ВТЛЖ менее 16 см (1в)

При анализе данных было выявлено, что параметры ФПГ не имели достоверную ассоциацию со снижением ФВ, однако значимо коррелировали со снижением скоростного показателя систолической функции – VTI в ВТЛЖ менее 16 см. Диагностическая точность параметров ФПГ представлена в Таблице 2.

При анализе комбинированных параметров ЭКГ и ФПГ была выявлена достаточно высокая диагностическая точность при снижении ФВ менее 40%. При этом учитывалась частота максимальной энергии переднего фронта R-волны на ЭКГ и временные параметры ФПГ (Таблица 3).

Таблица 2 – Диагностическая точность параметров ФПГ при VTI в ВТЛЖ менее 16 см

Параметр	Значение AUC (площади под ROC кривой)	Чувствительность	Специфичность
DP-B0	0,687	71%	74%
DP-SEP	0,684	72%	75%
SEPMAХ-B0	0,680	70%	73%
SEPMAХ-SEP	0,674	71%	72%

Таблица 3 – Диагностическая точность комбинированных параметров ЭКГ и ФПГ при снижении ФВ менее 40%

Параметр	Значение AUC (площади под ROC кривой)	Чувствительность	Специфичность
RonsF*DP-B0	0.873	86%	82%
RonsF*DP-SEP	0.877	86%	85%
RonsF*SEPMAХ-B0	0.860	82%	83%
RonsF*SEPMAХ-SEP	0.817	81%	80%

На втором этапе работы была начата разработка моделей машинного обучения на основе параметров ЭКГ и ФПГ. Все пациенты со сниженной систолической функцией миокарда ЛЖ были поделены на 3 группы по ФВ ЛЖ и 2 группы по VTI ВТЛЖ (Таблица 4).

Затем была начата разработка прогностических моделей на основе регрессии Лассо и алгоритма случайный лес. Каждая модель включала определенный набор параметров ЭКГ и ФПГ. Для полученных моделей проводилась оценка качества с определением значения AUC, чувствительности и специфичности. Модели, полученные на основе регрессии Лассо имели достоверно высокие значения площади под ROC кривой, чувствительности и специфичности. Диагностическая точность для оценки ФВ была выше, чем для VTI в ВТЛЖ (Таблицы 5 и 6).

Модели оценки систолической функции ЛЖ, которые были построены с использованием алгоритма случайный лес, также продемонстрировали достаточно высокие показатели диагностической точности. Также, как и для моделей на основе регрессии Лассо, значения AUC, чувствительности и специфичности для оценки ФВ были выше, чем для VTI в ВТЛЖ.

Таблица 4 – Распределение пациентов, имеющих снижение систолической функции ЛЖ, по группам

По ФВ ЛЖ, n (%)	
ФВ < 55%	57 (14,9 %)
ФВ < 40%	19 (5,0 %)
ФВ < 30%	7 (1,8 %)
По VTI ВТЛЖ, n (%)	
VTI < 16см	61 (18,2 %)
VTI < 13см	17 (5,1 %)

Примечание: ФВ – фракция выброса, VTI в ВТЛЖ – интеграл линейной скорости кровотока в выносящем тракте левого желудочка

Таблица 5. Значения площади под кривой (AUC), чувствительности и специфичности для VTI (регрессия Лассо)

Конечная точка	Качество модели
ФВ менее 55%	AUC: 0,857 (0.761 - 0.953), Чувствительность: 81,8% Специфичность: 86%
ФВ менее 40%	AUC: 0,971 (0.935 - 1.000), Чувствительность: 99,8% Специфичность: 91,7%
ФВ менее 30%	AUC: 0,982 (0.944 - 1.000), Чувствительность: 99,8% Специфичность: 97,3%
VTI < 13 см	AUC: 0,754 (0.417 - 1.000), Чувствительность: 80% Специфичность: 83,3%
VTI < 16 см	AUC: 0,746 (0.595 - 0.897), Чувствительность: 76,5% Специфичность: 75%

Таблица 6. Значения площади под кривой (AUC), чувствительности и специфичности для моделей оценки снижения ФВ и VTI (случайный лес)

Конечная точка	Качество модели
ФВ менее 55%	AUC: 0,913 (0.844 - 0.982), Чувствительность: 86,4% Специфичность: 91,4%
ФВ менее 41%	AUC: 0,955 (0.903 - 1.000), Чувствительность: 99,9% Специфичность: 87,2%
ФВ менее 30%	AUC: 0,962 (0.900 - 1.000), Чувствительность: 99,9% Специфичность: 92,9%
VTI <13 см	AUC: 0,776 (0.561 - 0.992), Чувствительность: 80% Специфичность: 78,1%
VTI <16 см	AUC: 0,782 (0.657 - 0.907), Чувствительность: 76,5% Специфичность: 77,4%

### **Апробация модели для оценки снижения систолической функции ЛЖ**

В дальнейшем была проведена апробация модели. Дополнительно было включено 100 пациентов. В качестве критерия снижения систолической функции ЛЖ учитывалась только ФВ, которая была определена по методике SIMPSON – BIPLANE. В группе пациентов, включенных в исследование для апробации модели у 35 человек, было выявлено снижение фракции выброса левого желудочка. Из них у 15 пациентов она была ниже 40%. Наличие систолической дисфункции оценивалось по разработанной модели. Диагностическая точность разработанного алгоритма представлена в Таблице 7.

Таким образом полученные результаты апробации модели, продемонстрировали весьма высокую диагностическую точность для всех групп пациентов. При проведении апробации модели, диагностическая точность была достоверно высокой как при незначительном и умеренном снижении ФВ, так и при более выраженном. Специфичность была выше чувствительности при любой степени снижения ФВ. Наибольшая диагностическая точность и специфичность наблюдалась при снижении ФВ менее 30% (98% и 98,9% соответственно). В то время как наибольшая чувствительность была при незначительном снижении ФВ

(89,2%). Диагностическая точность оценки снижения ФВ менее 55%, менее 41%, менее 30% составили 94,1%, 95,1% и 98% соответственно.

Таблица 7 – Диагностическая точность разработанного алгоритма

Показатель	ФВ ЛЖ ниже нормы (n=35)	ФВ ЛЖ ниже 40% (n=15)
Чувствительность (%)	89,2	70,0
Специфичность (%)	96,9	97,8
Диагностическая точность (%)	94,1	95,1
Примечание: ФВ ЛЖ – фракция выброса левого желудочка		

### **Оценка точности определения артериального давления с помощью одноканального монитора электрокардиограммы с функцией фотоплетизмографии**

Всего было проведено 400 измерений АД с помощью сфигмоманометра с манжетой, и 400 измерений АД с помощью кардиомонитора. При анализе Бланд-Альтмана стандартное отклонение для САД составило 4,21, среднее расхождение 3,49 мм рт. ст., стандартная ошибка среднего значения составила 0,61. Для ДАД стандартное отклонение составило 3,61 мм рт. ст., среднее расхождение 3,1 мм рт. ст., стандартная ошибка среднего значения 0,52. Корреляция показателей, полученных при использовании двух методов измерения, составила 0,89 ( $p=0,001$ ) для САД и 0,87 ( $p=0,002$ ) для ДАД. Таким образом, не было выявлено достоверных различий между показателями АД, полученными с помощью сфигмоманометра с манжетой и рассчитанными одноканальным ЭКГ кардиомонитором с функцией фотоплетизмографии.

### **ВЫВОДЫ**

1. Среди параметров ЭКГ наиболее значимые корреляции с показателями систолической функции ЛЖ имеют параметры: ТА (амплитуда Т-волны), J80А

(амплитуда в точке J+80мс), RonsF (частота максимальной энергии переднего фронта R-волны), RoffsF (частота максимальной энергии заднего фронта R-волны). Выявленные параметры ЭКГ, ассоциированы как со снижением ФВ, так и со снижением VTI в ВТЛЖ.

2. При анализе данных было выявлено, что параметры ФПГ не имеют достоверную ассоциацию со снижением ФВ, однако значимо коррелируют со снижением скоростного показателя систолической функции – VTI в ВТЛЖ менее 16 см. Такими параметрами ФПГ являются временные интервалы между точками пульсовой волны: DP-B0 и DP-SEP (интервалы от пика диастолической волны до точки максимального роста переднего фронта и до точки изгиба прямой систолической волны), SEPMAX-BO SEPMAX-SEP (интервал от точки пика прямой систолической волны, полученной на основе вейвлет-преобразования, до точки максимального роста переднего фронта и до точки изгиба пика прямой систолической волны).

3. На основе анализа комбинированных параметров ЭКГ и ФПГ было выявлено, что наибольшей диагностической точностью обладают следующие комбинированные параметры: RonsF\*DP-B0, RonsF\*DP-SEP, RonsF\*SEPMAX-BO, RonsF\*SEPMAX-SEP (произведение частоты максимальной энергии переднего фронта R-волны ЭКГ на временные параметры пульсовой волны).

4. Разработанные модели машинного обучения для определения снижения систолической функции ЛЖ на основе параметров ЭКГ и пульсовой волны имеют достоверно высокие значения площади под ROC кривой, чувствительности и специфичности. Диагностическая точность как модели на основе регрессии Лассо, так и на основе алгоритма случайный лес достаточно высокая и для оценки ФВ, и для VTI в ВТЛЖ.

5. При проведении апробации модели, диагностическая точность оценки снижения ФВ менее 55%, менее 41%, менее 30% составили 94,1%, 95,1% и 98% соответственно.

6. При сравнении оценки артериального давления с помощью одноканального монитора электрокардиограммы с функцией фотоплетизмографии

и методом Короткова корреляция показателей составила 0,89 ( $p=0,001$ ) для САД и 0,87 ( $p=0,002$ ) для ДАД. Для САД среднее расхождение составило 3,49 мм рт. ст., для ДАД - 3,1 мм рт. ст.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Параметры электрокардиограммы и пульсовой волны могут применяться для оценки снижения систолической функции ЛЖ.

2. Для определения снижения систолической функции ЛЖ могут быть использованы модели машинного обучения на основе параметров электрокардиограммы и пульсовой волны с применением регрессии Лассо и алгоритма случайный лес.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Сагирова Ж.Н.**, Кузнецова Н.О., Ларионов В.Б., Чомахидзе П.Ш., Копылов Ф.Ю., Сыркин А.Л. Параметры пульсовой волны в оценке систолической функции левого желудочка // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2020. – Т.13. – №3. – С.253-257. <https://doi.org/10.17116/kardio202013031253> [Обзорная статья]

2. **Sagirova Zh.**, Kuznetsova N., Gogiberidze N., Gognieva D., Suvorov A., Chomakhidze P., Omboni S., Saner H., Kopylov Ph. Cuffless Blood Pressure Measurement Using a Smartphone-Case Based ECG Monitor with Photoplethysmography in Hypertensive Patients // Sensors. – 2021. – V.21. – P.3525. <https://doi.org/10.3390/s21103525>

3. **Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621680 Российская Федерация.** База данных по определению артериального давления с помощью портативного одноканального монитора электрокардиограммы с функцией фотоплетизмографии : № 2021621558 : заявл.

**28.07.2021 : опубл. 09.08.2021 / Ф. Ю. Копылов, П. Ш. Чомахидзе, Д. Г. Гогниева, Д. Ф. Меситская, Н. А. Гогиберидзе, Н. О. Кузнецова, Ж. Н. Сагирова.**

**4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621923 Российская Федерация.** База данных для определения систолической дисфункции левого желудочка методом анализа одноканальной электрокардиограммы и параметров пульсовой волны : **№ 2021621822 : заявл. 28.07.2021 : опубл. 09.09.2021 / Ф. Ю. Копылов, П. Ш. Чомахидзе, Д. Г. Гогниева, Д. Ф. Меситская, Н. А. Гогиберидзе, Н. О. Кузнецова, Ж. Н. Сагирова.**

5. **Sagirova Zh.,** Kuznetsova N., Gogiberidze N., Gognieva D., Chomakhidze P., Kopylov P. The possibility of determining the systolic function of the left ventricle using a single-channel electrocardiogram monitor with photoplethysmography // e-Cardiology / Digital Health, Public Health, Health Economics, Research Methodology – e-Cardiology // Digital Health, Remote Patient Monitoring and Telehealth, Remote Patient Monitoring. ESC Congress 2021 - The Digital Experience, online, 27-30 August 2021. – P. 3096.

6. **Sagirova Zh.,** Kuznetsova N., Gogiberidze N., Gognieva D., Chomakhidze P., Kopylov P. Accuracy of a cuffless blood pressure measurement with a single-channel electrocardiogram monitor with photoplethysmography // Hypertension – Diagnostic Methods, Blood Pressure Measurement. ESC Congress 2021 - The Digital Experience, online, 27-30 August 2021. – P. 2346.

7. **Сагирова Ж.Н.,** Кузнецова Н.О., Гогиберидзе Н.А., Гогниева Д.Г., Суворов А.Ю., Чомахидзе П.Ш., Копылов Ф.Ю. Оценка гемодинамики при гипертонической болезни методом регистрации и цифровой обработки сигнала электрокардиограммы и пульсовой волны с применением элементов машинного обучения // Материалы IX съезда кардиологов Сибирского федерального округа «Решение актуальных проблем кардиологии для персонализированной медицины». – Новосибирск, 13-14 октября 2021. – Т.17. – №3. – С. 28.

8. **Сагирова Ж.Н.,** Кузнецова Н.О., Захаров И.П., Суворов А.Ю., Чомахидзе П.Ш., Копылов Ф.Ю. Оценка функции миокарда с помощью одноканального ЭКГ-регистратора с функцией фотоплетизмографии // Ежегодная Всероссийская

научно-практическая конференция «Кардиология на марше 2021» и 61-я сессия ФГБУ «НМИЦ Кардиологии» Минздрава России. Кардиологический вестник. – Москва, 7-9 сентября 2021. – Т.16 (2-2). Спецвыпуск. – С.116.

9. **Сагирова Ж.Н.**, Кузнецова Н.О., Гогиберидзе Н.А., Гогниева Д.Г., Чомахидзе П.Ш., Копылов Ф.Ю. Оценка систолической функции левого желудочка с помощью одноканального монитора электрокардиограммы с функцией фотоплетизмографии // Сборник тезисов Российского национального конгресса кардиологов 2021. – Санкт-Петербург, 21-23 октября 2021. – С. 654-655.

10. Гогиберидзе Н.А., **Сагирова Ж.Н.**, Кузнецова Н.О., Гогниева Д.Г., Чомахидзе П.Ш., Санер Х., Копылов Ф.Ю. Сравнение безманжетного измерения артериального давления с помощью монитора электрокардиограммы с функцией фотоплетизмографии с измерением по методу Коротков: пилотное исследование // Сеченовский вестник. – 2021. – Т.12. – №1. С.39–49. <https://doi.org/10.47093/2218-7332.2021.12.1.39-49>

11. Кузнецова Н.О., **Сагирова Ж.Н.**, Губина А.Ю., Захаров И.П., Велиев Г.О., Мельничук А.А., Дхиф И., Шмелёва А.А., Гогниева Д.Г., Чомахидзе П.Ш., Копылов Ф.Ю. Оценка функции миокарда у пациентов с хронической сердечной недостаточностью при помощи регистратора одноканальной электрокардиограммы // **Вестник новых медицинских технологий.** – 2022. – №1. – С. 46–52. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-1-46-52.

12. **Сагирова Ж.Н.**, Кузнецова Н.О., Губина А.Ю., Дхиф И., Мишакина Н.Ю., Калошина И.В., Гогниева Д.Г., Чомахидзе П.Ш., Копылов Ф.Ю. Возможности портативного регистратора электрокардиограммы и пульсовой волны в выявлении систолической дисфункции левого желудочка // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. – 2022. – Т.11(4S). С.34-46. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2022-11-4S-34-46>

13. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680844 Российская Федерация.** Программа для определения систолической дисфункции левого желудочка методом анализа одноканальной электрокардиограммы и параметров пульсовой волны : № 2022669867 : заявл.

**25.10.2022 : опубл. 08.11.2022 / Ж. Н. Сагирова**, Ф. Ю. Копылов, П. Ш. Чомахидзе, Д. Г. Гогниева, А. Ю. Суворов, Н. О. Кузнецова.

14. Кузнецова Н.О., **Сагирова Ж.Н.**, Султыгова Е.А., Чомахидзе П.Ш., Копылов Ф.Ю. Комплексная автоматизированная дистанционная система оценки параметров гемодинамики при анализе нативного сигнала одноканальной ЭКГ и пульсовой волны с применением методик машинного обучения // X Форум молодых кардиологов Российского кардиологического общества «Движение вверх» с международным участием. Сборник тезисов. – Кемерово, 22-23 июня 2023. – Т.28(7S), дополнительный выпуск. – С. 41-42.

15. **Сагирова Ж.Н.**, Кузнецова Н.О., Суворов А.Ю., Гогниева Д.Г., Куликов В.М., Чомахидзе П.Ш., Андреев Д.А., Копылов Ф.Ю. Оценка систолической функции левого желудочка с помощью одноканального ЭКГ-монитора с функцией фотоплетизмографии на основе моделей машинного обучения // **Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия.** – 2023. – Т.16. – №1. С.46-55.  
<https://doi.org/10.17116/kardio20231601146> [Scopus]

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АГ – артериальная гипертензия

АД – артериальное давление

ДАД – диастолическое артериальное давление

ИБС – ишемическая болезнь сердца

ЛЖ – левый желудочек

САД – систолическое артериальное давление

СВ – сердечный выброс

СД – сахарный диабет

ФВ – фракция выброса

ФК – функциональный класс

ФП – фибрилляция предсердий

ФПГ – фотоплетизмограмма

ХСН – хроническая сердечная недостаточность

ЧСС – частота сердечных сокращений

ЭКГ – электрокардиограмма

ЭХОКГ – эхокардиография