

На правах рукописи



Чыонг Тхи Лан Нхи

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
АКТИВНОСТИ СЕРДЦА В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ
ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ**

Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия
медицинского назначения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на кафедре основ радиотехники.

Научный руководитель: **Крамм Михаил Николаевич**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры «Основ радиотехники» (г. Москва)

Официальные оппоненты: **Приоров Андрей Леонидович,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», профессор кафедры «Цифровые технологии и машинное обучение» (г. Ярославль)

Коробов Артем Андреевич
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», старший преподаватель кафедры «Биомедицинская техника» (г. Тамбов)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (г. Владимир)

Защита диссертации состоится «23» мая 2025 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 (Д 212.211.04) в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и на сайте <https://rsreu.ru/post-graduate/dissertatsii/16539-item-16539>.

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) относятся к неинфекционным заболеваниям, но число смертей и число больных увеличивается, поэтому ССЗ представляют собой серьезную глобальную проблему. По данным министерства здравоохранения РФ болезни системы кровообращения остаются лидирующей причиной смертности населения: в 2022 году от сердечно-сосудистых заболеваний скончались 43,8% от общего числа умерших. Согласно исследованию, проведенному Ассоциацией кардиологов Вьетнама, каждый год 200 000 человек умирали от ССЗ, что составляет 33% смертей во Вьетнаме. Уровень гипертонии среди людей в возрасте 25 лет и старше во Вьетнаме составил 47%. Для снижения смертности от ССЗ очень важны профилактика и своевременная диагностика. При этом на первое место выступает профилактическое обследование (скрининг) населения.

Таким образом, повышение достоверности и оперативности диагностики заболеваний сердца при электрокардиологическом скрининге является важной социальной задачей.

В настоящее время разработаны и широко используются методы кардиодиагностики, в том числе электрокардиография (ЭКГ), биохимическая лабораторная диагностика, рентгенография, ультразвуковая диагностика (эхокардиография, стресс-эхокардиография), мультиспиральная компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, коронарография и ряд других.

Повсеместное развитие компьютерной техники и информационных технологий предоставляет все более широкие возможности для повышения эффективности диагностики в электрокардиологии путем внедрения методов цифровой обработки сигналов, вычислительной математики и визуализации. При этом появляется возможность предъявлять врачам в визуальном виде пространственно-временную информацию об электрической активности сердца (ЭАС), прежде всего, в виде пространственно-временного картирования. Направление компьютерной диагностики состояния сердца разрабатывалось и активно развивается с участием таких видных российских ученых, как Л.А. Бокерия, Л.И. Титомир, В.В. Шакин, А.Ш. Ревিশвили, В.В. Калинин, О.Н. Бодин, Г.Г. Иванов, С.В. Селищев, А.Л. Сыркин, З.М. Юлдашев, Л.Т.Сушкова, Т.В. Истомина, Н.А.Кореневский, С.А. Филист, А.А. Михеев, Л.Ю. Кривоногов, В.Г. Полосин, О.В. Мельник, а также зарубежных ученых C V. Nelson, C. Barr, Y. Rudy, O. Dössel, F. Liu, Y. Serinagaoglu.

В настоящее время существуют системы, ориентированные на реконструкцию пространственно-временных распределений эпикардиального потенциала (Системы «Амикард», «CardioInsight» и др.). Однако эти системы включают использование сложного томографического оборудования для предоперационных обследований в крупных кардиоцентрах и не ориентированы на применение в задачах электрокардиологического скрининга.

Таким образом, актуальна разработка информационных электрокардиологических скрининговых систем, основанных на обработке многоканальных электрокардиосигналов (ЭКС) с поверхности торса,

предоставляющих врачам в динамике карты электрического потенциала на поверхности сердца и позволяющих проводить диагностику у больных с сердечно-сосудистыми и коморбидными заболеваниями, а также оценивать эффективность проводимой медикаментозной терапии у широкого круга населения.

Цель работы. Целью работы является разработка методического и алгоритмического обеспечения скрининговой системы, повышающей эффективность электрокардиодиагностики на основе реконструкции и визуализации пространственно-временных распределений электрических потенциалов на поверхности сердца.

В соответствии с поставленной целью определены следующие основные задачи работы.

1. Построение алгоритма предобработки многоканальных ЭКС, включающего переход от ЭКС к распределениям потенциалов на поверхности торса на выбранных кардиоциклах.

2. Разработка метода реконструкции карт потенциала на поверхности эпикарда (КППЭ), включающего привязку геометрических моделей поверхности эпикарда к системе координат торса.

3. Разработка методов визуализации 2D и 3D карт электрического потенциала на поверхности эпикарда, включающих возможности отображения временной динамики изменения электрической активности сердца.

4. Разработка пакета алгоритмов и программ для скрининговой системы электрокардиодиагностики на основе компьютерной обработки многоканальных ЭКС.

5. Разработка и применение методики проведения исследования работоспособности алгоритмического и программного обеспечения.

Объектом исследования является скрининговая система электрокардиодиагностики.

Предметом исследования является алгоритмическое и программное обеспечение скрининговой системы электрокардиодиагностики, включающее обработку многоканальных электрокардиосигналов (ЭКС) и визуализацию получаемой электрокардиологической информации.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы обработки сигналов, методы электрофизиологического исследования деятельности сердца в норме и патологии, подходы математического моделирования, методы решения некорректных задач, методы обработки изображений.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Разработан алгоритм предобработки многоканальных ЭКС, позволяющий получить распределение потенциалов на поверхности торса и отличающийся синхронизацией ЭКС при параллельной записи, введением виртуального нуля, сегментацией ЭКС и отбраковкой артефактов.

2. Предложен метод реконструкции КППЭ, отличающийся привязкой геометрических моделей поверхности сердца к системе координат торса на основе

обработки зарегистрированных многоканальных ЭКС и позволяющий получать карты потенциала, изменяющиеся в ходе кардиоцикла.

3. Предложены методы визуализации КППЭ, позволяющие совместно использовать 2D карты на плоской развертке поверхности квазиэпикарда и 3D карты для триангуляционной реалистической модели эпикарда и отличающиеся поворотом 2D карт в направлении электрической оси сердца, а также удобством наблюдения временной динамики изменения КППЭ синхронно со стандартным ЭКГ-сигналом.

4. Разработана методика исследования работоспособности алгоритмического и программного обеспечения, отличающаяся контролем согласованности карт потенциала, учетом временных затрат и затрат памяти, и позволяющая получить предварительные оценки диагностической значимости получаемых КППЭ (нормированная площадь возбуждения желудочков не более 0,5 при постинфарктом синдроме и не менее 0,7 в норме).

5. Разработано программное обеспечение для компьютерной обработки многоканальных ЭКС в скрининговой системе электрокардиодиагностики, позволяющее реализовать режим визуализации КППЭ и отличающееся алгоритмом организации повышающего удобство интерфейса для врача-кардиолога с организацией режимов архивирования, обработки ЭКС, способов представления и масштабирования, визуализации и синхронизации карт.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный алгоритм предобработки ЭКС позволяет перейти от зарегистрированных многоканальных ЭКС к распределениям электрических потенциалов на мелкой сетке поверхности торса.

2. Предложенный метод реконструкции КППЭ обеспечивает привязку геометрических моделей поверхности эпикарда к системе координат торса на основе обработки многоканальных ЭКС и контроль уровня регуляризации для этих моделей.

3. В предложенных методах визуализации КППЭ полученные 2D карты потенциала на плоской развертке поверхности сферического квазиэпикарда позволяют наблюдать временную динамику электрической активности сердца для всех точек поверхности сердца без смены ракурса, а 3D карты потенциала на поверхности реалистической триангуляционной модели эпикарда согласуются с 2D картами и позволяют наблюдать электрическую активность сердца в привязке к анатомическим особенностям сердца.

4. Применение разработанной методики исследования работоспособности алгоритмического и программного обеспечения показало, что предоставляемые карты эпикардального потенциала устойчивы к повторным одеваниям жилета и сеансам регистрации, причем обработка в ПК занимает 50 – 100 секунд при общем времени обследования 6 – 10 минут.

5. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение скрининговой электрокардиологической системы предоставляет кардиологу возможности наблюдать и интерпретировать временную динамику карт эпикардального потенциала синхронно с изменением стандартной ЭКГ и

позволяет повысить эффективность профилактических мероприятий при диагностике ССЗ.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработан алгоритм предобработки, который позволяет перейти от зарегистрированных многоканальных электрокардиосигналов к карте электрического потенциала на поверхности торса.

2. Разработан метод реконструкции КППЭ, обеспечивающий привязку геометрических моделей поверхности сердца к системе координат торса, на основе обработки зарегистрированных многоканальных ЭКС.

3. Разработаны и реализованы методы визуализации карт эпикардального потенциала, позволяющие совместно использовать 2D карты на плоской развертке поверхности квазиэпикарда и 3D карты для триангуляционной реалистической модели эпикарда, предоставляющие удобство наблюдения временной динамики изменения КППЭ синхронно со стандартным ЭКГ-сигналом

4. Разработан пакет алгоритмов и программ для скрининговой системы электрокардиодиагностики на основе компьютерной обработки многоканальных ЭКС, позволяющий реализовать режим визуализации КППЭ и предоставляющий врачу-кардиологу удобный интерфейс с организацией режимов архивирования, обработки ЭКС, способов визуализации карт эпикардального потенциала.

5. Разработана методика исследования работоспособности алгоритмического и программного обеспечения, подтвердившая устойчивость КППЭ и приемлемое время обработки многоканальных ЭКС порядка 50 – 100 секунд.

Внедрение результатов работы. Разработанное компьютерное программное обеспечение скрининговой системы электрокардиодиагностики используется в тестовом режиме в ГБУЗ «Клиническая больница №6» им. Г.А. Захарьина г. Пензы. Предложенные в работе методики, алгоритмы и принципы обработки многоканальных ЭКС в системе электрокардиологического скрининга используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Степень достоверности и апробация работы. В работе при описании электрического поля сердца используются общепринятые в электрокардиологии положения. Метод реконструкции КППЭ базируется на известном аппарате вычислительных методов при решении обратных задач. Методы визуализации КППЭ основываются на известных подходах к представлению и обработке изображений. Допустимость подходов к выбору параметров предложенных алгоритмов подтверждается положительными результатами экспериментальных исследований с использованием реальных ЭКС.

Основные результаты работы докладывались на 14 международных научно-технических конгрессах, симпозиумах и конференциях, среди которых: XV МНТК "Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии" (Владимир, 2022) (2 доклада); «Агаджаньяновские чтения. IV Всероссийская научно-практическая конференции с международным участием» (Москва, 2023) (2 доклада); X ММНКТ "Современные проблемы физики и технологий" (Москва, 2023); XX МНТК "Новые информационные технологии и системы" (Пенза, 2023); XXXVI МНТК

“Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы – 2024” (Рязань, 2024); XIII МНТК "Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии" (Владимир, 2024); МНТК РОХМИНЭ (Санкт - Петербург, 2024). МНТК «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2019, 2020, 2022, 2023, 2024).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 26 печатных работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 5 публикаций в изданиях, индексируемых Scopus или Web of Science. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четыре главы, заключения, списка литературы (108 наименований) и приложений. Общий объем составляет 138 страниц основного машинописного текста. Работа содержит 78 рисунка, 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, определяются цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен аналитический обзор существующих методов электрокардиодиагностики. Рассмотрены проблемы систем неинвазивной электрокардиодиагностики. Показано, что для систем неинвазивного электрокардиологического скрининга стоит задача повышения чувствительности диагностики ишемических и прединфарктных состояний миокарда. Отмечается важность расчета и визуализации карт электрического потенциала на поверхности эпикарда (КППЭ), включая оценку динамического изменения этих карт в ходе кардиоцикла. При этом актуальной задачей является разработка программно-алгоритмического обеспечения скрининговой системы электрокардиодиагностики с визуализацией карт электрической активности на поверхности эпикарда по результатам компьютерной обработки сигналов многоэлектродных отведений с поверхности торса. Для решения этой задачи предложена функциональная схема работы скрининговой системы неинвазивной электрокардиодиагностики (СС ЭКД), показанная на рисунке 1.

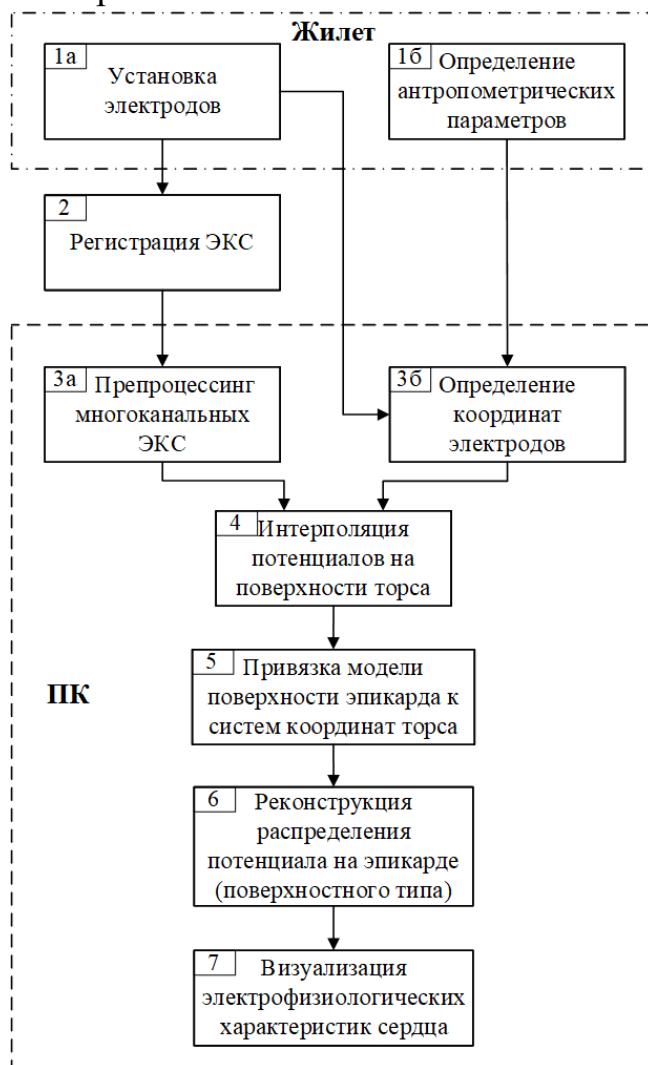


Рисунок 1 – Основные этапы работы СС ЭКД

Во второй главе рассмотрены основные этапы регистрации, предобработки многоканальных электрокардиосигналов (ЭКС) и реконструкции распределения электрического потенциала на поверхности сердца. Предложены варианты мужского и женского жилетов, учитывающие особенности анатомического строения мужского и женского торсов. Использование жилетов с предустановленными электродами позволяет оперативно устанавливать электроды на торсе пациента, что критически важно для скрининговых систем электрокардиодиагностики.

На рисунке 2 показаны зарегистрированные многоканальные ЭКС.

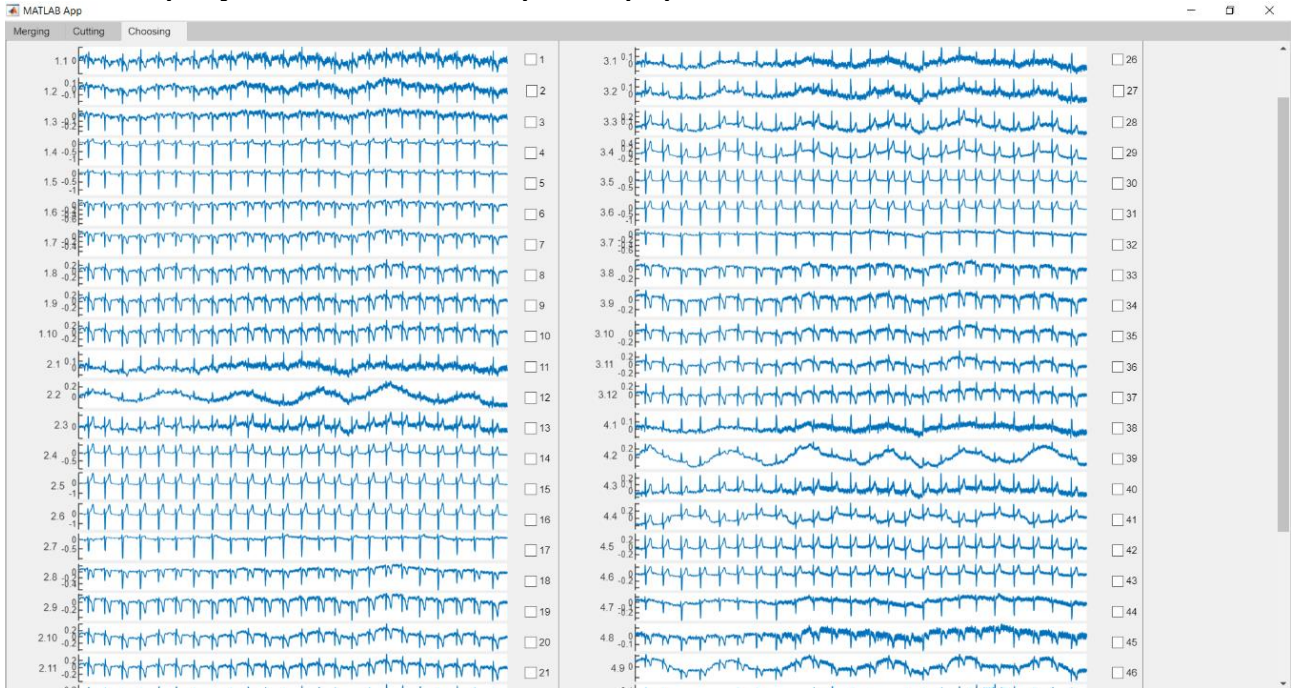


Рисунок 2 – Зарегистрированные электрокардиосигналы

На этапе препроцессинга помимо цифровой фильтрации формируются потенциалы в точках расположения электродов: $\phi_n(t) = U_n(t) - V_{GND}(t)$, где $\phi_n(t)$ – сформированный потенциал от n -ого электрода в момент времени t ; $U_n(t)$ – зарегистрированный ЭКС n -ого электрода в этот же момент;

$$V_{GND}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{N_3} U_n(t)}{N_3} \quad (1)$$

– напряжение виртуального нуля; N_3 – число электродов. На рисунке 3 показаны сформированные потенциалы электродов.

Был разработан алгоритм поиска моментов времени для вершин и границ сегментов выбранного кардиоцикла, пример результатов поиска представлен на рисунке 4. Поскольку интервал от конца зубца Т до начала зубца Р соответствует электрической диастоле сердца, то для подавления остаточного дрейфа электродного потенциала, после входной цифровой фильтрации, в сигналах электродных потенциалов $\phi_n(t)$ (рисунок 3) нами предложено проводить привязку нуля в точках начала зубца Р, конца зубца Т и в начале сегмента QRS (для выделения фронта деполяризации желудочков). Для этого по потенциалам $\phi_n(t)$ в

данных точках формируется кубический сплайн, который вычитается из данных потенциалов.

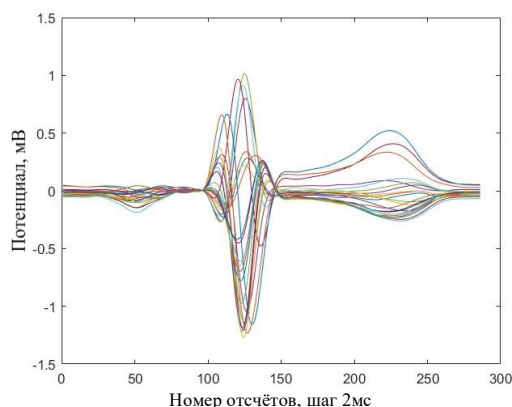


Рисунок 3 – Сформированные потенциалы электродов

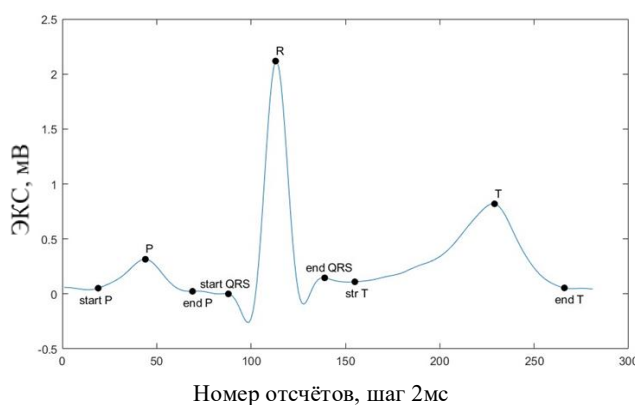


Рисунок 4 – Результат поиска вершин и границ сегментов выбранного кардиоцикла

Для интерполяции потенциалов на мелкой сетке точек на поверхности торса используется метод бигармонической сплайн-интерполяции.

Поскольку поверхность сердца задается в системе эпикардиальных координат, а зарегистрированные потенциалы заданы в системе координат торса, то необходимо привязать эти системы координат. Координаты центра системы эпикардиальных координат (в дальнейшем называемого как центр сердца – ЦС) в системе координат торса определяются с помощью распределения функции пространственной активности сердца на поверхности торса:

$$\Psi(t_k, z, \varphi) = \frac{|\phi(t_k, z, \varphi)|}{|\phi(t_k)|_{\max}}, \quad (2)$$

где $\phi(t_k, z, \varphi)$ – интерполированный потенциал в точке с координатами z, φ на поверхности торса в текущий момент времени t_k ; азимутальный угол φ отсчитывается в плоскости горизонтального поперечного сечения торса; координата z отсчитывается в вертикальном направлении. Координаты текущего центра сердца оцениваются как координаты, взвешенные функцией электрической активности:

$$z_{ce} = \frac{\sum_{z_{\min}}^{z_{\max}} \sum_0^{2\pi} z \cdot \Psi(z, \varphi)}{\sum_{z_{\min}}^{z_{\max}} \sum_0^{2\pi} \Psi(z, \varphi)}; \quad x_{ce} = \frac{\sum_{z_{\min}}^{z_{\max}} \sum_0^{2\pi} x \cdot \Psi(z, \varphi)}{\sum_{z_{\min}}^{z_{\max}} \sum_0^{2\pi} \Psi(z, \varphi)}; \quad y_{ce} = \frac{\sum_{z_{\min}}^{z_{\max}} \sum_0^{2\pi} y \cdot \Psi(z, \varphi)}{\sum_{z_{\min}}^{z_{\max}} \sum_0^{2\pi} \Psi(z, \varphi)}, \quad (3)$$

где $x = x(\varphi, a, b)$; $y = y(\varphi, a, b)$ – координаты контура поперечного сечения торса; a и b – ширина и толщина торса в поперечном сечении. На рисунке 5а) представлена флюорограмма обследуемого во фронтальной плоскости, ЦС для момента R-пика, а также ЦС, усредненный на QRS-комплексе. ЦС, усредненный на QRS-комплексе, хорошо отражает геометрический центр сердца на флюорограмме, а сфера квазиэпикарда радиусом 65 мм (показана белой окружностью) приемлемо описывает поверхность сердца. На рисунке 5б) представлена траектория движения мгновенного ЦС на временном интервале QRS-комплекса. Программный код для

определения координат электрического центра сердца зарегистрирован в Роспатенте.

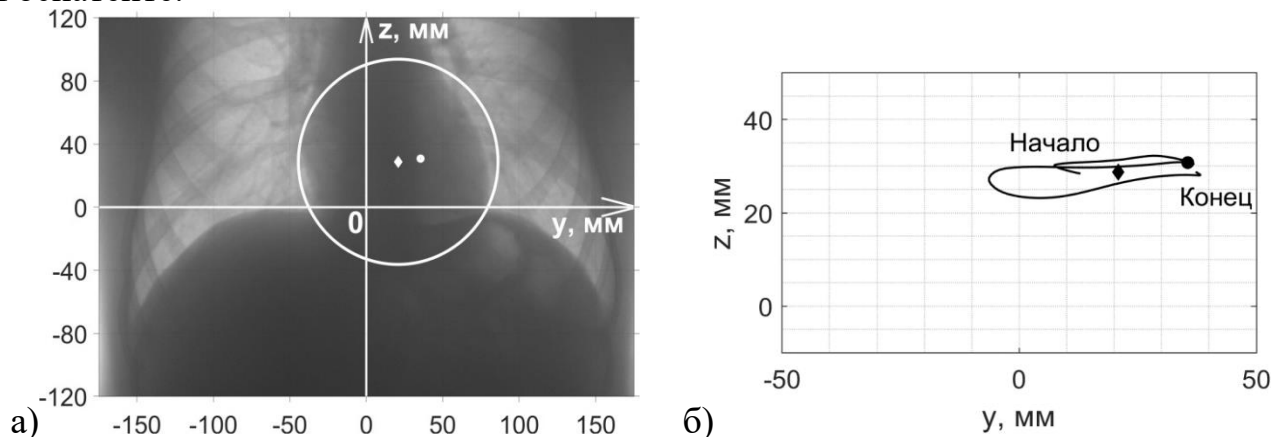


Рисунок 5 – а) Центр сердца со сферой квазиэпикарда; б) траектория движения мгновенного ЦС: ● – ЦС для момента R-пика; ◆ – ЦС, усредненный на QRS-комплексе

В рамках метода граничных элементов поверхности сердца S_H и торса S_B разбиваются на N_H и N_B элементов, соответственно, что позволяет прийти к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\sum_j (G_{ij}^{hb} g_j^h) - \sum_j (H_{ij}^{hb} \phi_j^h) = \sum_{k \neq i} (H_{ik}^{bb} \phi_k^b); P_i \in S_B; i, k = 1..N_B; \quad (4)$$

$$\sum_{l \neq j} (G_{jl}^{hh} g_l^h) - \sum_l (H_{jl}^{hh} \phi_l^h) = \sum_k (H_{jk}^{bh} \phi_k^b); P_j \in S_H; j, l = 1..N_H; \quad (5)$$

где $i, k \in (1..N_B)$; $j, l \in (1..N_H)$; символ b и индексы i, k относятся к торсу; символ h и индексы j, l относятся к эпикарду; ϕ^b, ϕ^h, g^h – одномерные массивы значений потенциала и его производных по направлению нормали в центрах граничных элементов поверхностей торса и эпикарда. Здесь первый нижний индекс соответствует точке наблюдения, второй индекс – индекс суммирования. Получены выражения для элементов матриц \mathbf{G}^{hb} ; \mathbf{G}^{hh} ; \mathbf{H}^{hb} ; \mathbf{H}^{hh} ; \mathbf{H}^{bb} ; \mathbf{H}^{bh} в случаях использования моделей сферического квазиэпикарда и триангуляционной реалистической модели поверхности эпикарда.

Реконструкция распределения потенциала ϕ^h на поверхности эпикарда проводится на основе решения СЛАУ (4), (5) итерационным методом. При обращении плохо обусловленной матрицы \mathbf{G}^{hb} в ходе реконструкции потенциала используется метод усеченного сингулярного разложения TSVD с фильтром малых сингулярных чисел, полоса пропускания которого определяется условием:

$$\left(\frac{\rho_1}{\rho_i} \right) > C_b, \quad (6)$$

где ρ_1 – первое сингулярное число в спектре матрицы \mathbf{G}^{hb} , ρ_{cb} – ближайшее к ρ_1 сингулярное число, для которого выполняется условие (6); параметр C_b , определяющий уровень регуляризации, связан с общеизвестным коэффициентом регуляризации по В.И.Тихонову соотношением:

$$\alpha = \frac{\rho_{cb}^2 (1 - K_{гр})}{K_{гр}}, \quad (7)$$

где $K_{гр}(\rho_{св}) = 1/\sqrt{2}$. Были получены и проанализированы спектры последовательности сингулярных чисел матрицы G^{hb} для модели сферического квазиэпикарда и триангуляционной модели, показано, что для этих моделей число обусловленности $cond \approx 10^{16}$. Сравнительный анализ карт распределений потенциала на поверхности эпикарда для используемых моделей поверхности эпикарда показал, что предпочтительно использовать параметр регуляризации C_b порядка 200 – 800.

Третья глава посвящена разработке метода визуализации карт распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда (КППЭ), включающего возможности отображения временной динамики изменения электрической активности сердца. Рассмотрены варианты 2D и 3D визуализации.

2D визуализация электрической активности сердца основывается на плоской развертке поверхности сердца (UV-mapping в трехмерной графике). Используется вариант развертки поверхности сферического квазиэпикарда по Л.И. Титомиру (рисунок 6). Достоинством использования плоской развертки поверхности эпикарда является возможность наблюдения электрической активности во **всех точках поверхности без смены ракурса** (угла наблюдения).

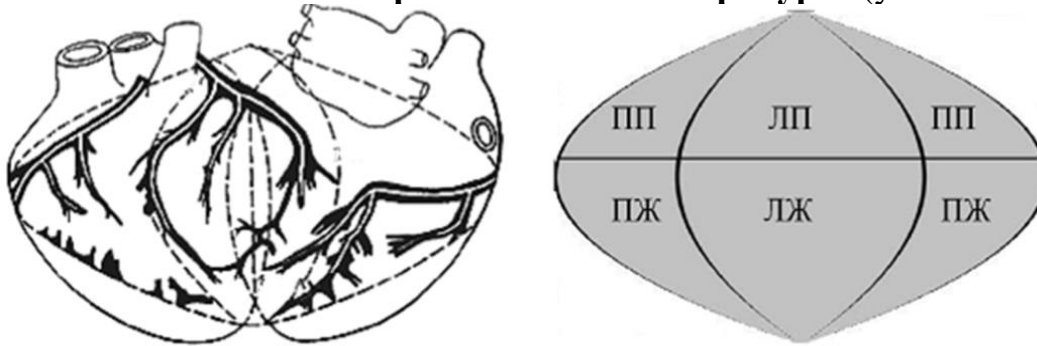


Рисунок 6 – Плоская развертка поверхности квазиэпикарда; ПП и ЛП – правое и левое предсердия; ПЖ и ЛЖ – правый и левый желудочки

Особенно заметно это преимущество проявляется при наблюдении 2D карт потенциала в динамике – при анимации этих карт в ходе всего кардиоцикла или для выбранных сегментов кардиоцикла.

Основные этапы работы алгоритма 2D визуализации представлены на рисунке 7. Используется сетка длин дуг в полярном и азимутальном направлении, соответствующих равномерной сетке углов:

$$l_{\theta}(i, j) = R_H \theta_i; \quad l_{\varphi}(i, j) = \pi R_H \left[1 - \sin(\theta_i) \left(1 - \frac{j-1}{N_{\theta}} \right) \right], \quad (8)$$

где длины дуг l_{θ} и l_{φ} в полярном и азимутальном направлениях; R_H - радиус сферической квазиэпикарда; $i = 0..(N_{\theta} - 1)$; $j = 0..(N_{\varphi} - 1)$, $N_{\varphi} = 2 N_{\theta}$; θ_i – полярный угол. При этом сохраняются расстояния (длины дуг) между точками на сферической поверхности и соответствующими точками на поверхности плоской развертки.

В соответствии с рисунком 6 центральный меридиан соответствует центру левого желудочка. Нами был предложен также вариант, когда центральный

меридиан соответствует границе между правым и левым желудочками. Для этого диапазон азимутальных углов сдвигается на 90° . Выбор варианта проводится опционально для удобства наблюдения.

Для удобства при визуализации электрической активности ориентация 2D карты потенциала на поверхности квазиэпикарда должна соответствовать положению электрической оси сердца, которая определяется для вершины R-пика ориентацией вектора электрического момента \mathbf{M} согласно дипольной модели электрического генератора сердца. Проекция вектора \mathbf{M} в системе координат торса определяются в результате решения переопределенной СЛАУ $\phi_{\alpha i} = \phi_{d i}$ ($i = 1.. N_3$), где $\phi_{\alpha i}$ – измеренный потенциал i -го электрода; $\phi_{d i}(M_x, M_y, M_z)$ – потенциал в точке расположения i -го электрода для дипольной электрической модели сердца.

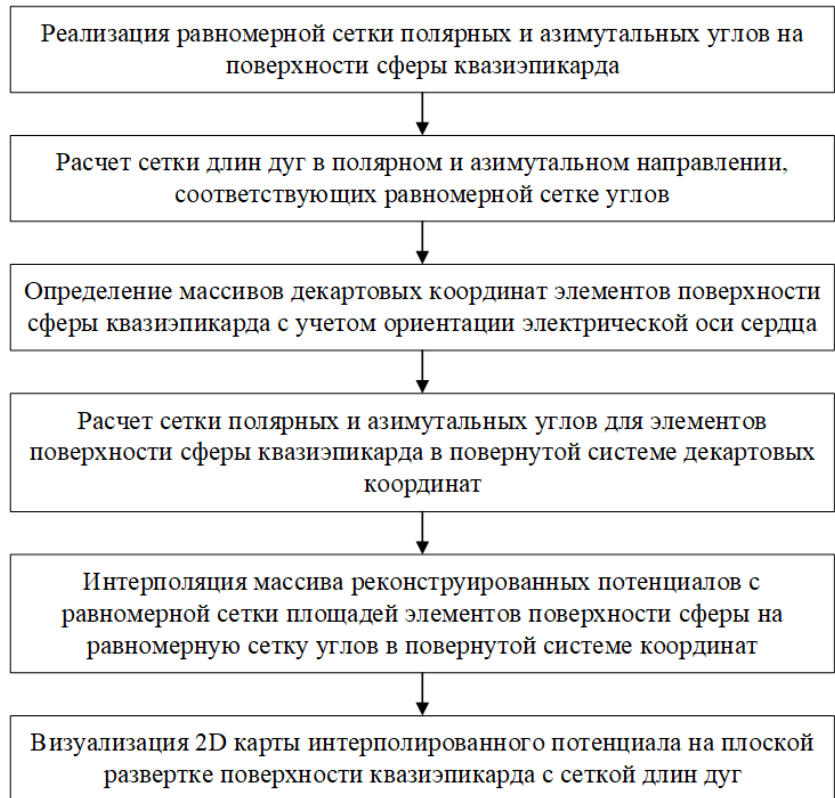


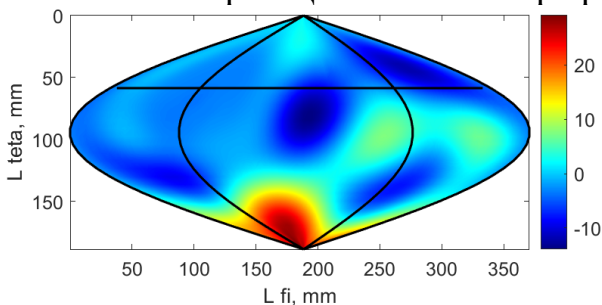
Рисунок 7 – Основные этапы работы алгоритма 2D визуализации

Поворот 2D карты потенциала проводится по формулам:

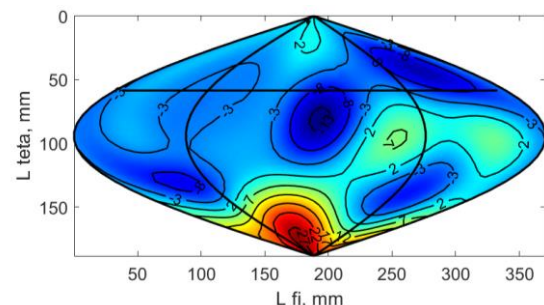
$$\begin{aligned} x'' &= -z \cdot \sin(\theta) + x \cdot \cos(\theta); \\ y'' &= z \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) + x \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) + y \cdot \cos(\varphi); \\ z'' &= z \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) + x \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) - y \cdot \sin(\varphi); \end{aligned} \quad (9)$$

где θ и φ – углы ориентации вектора \mathbf{M} в пространстве; $\theta = \left(-\vec{1}_z, \vec{M}_{zx} \right)$;

$\varphi = \left(\vec{M}_{zx}, \vec{M} \right)$. На рисунке 8 представлена 2D карта в случае использования цветовой палитры. Цветовая палитра размечается в милливольтгах.



а) 2D карта с цветовой палитрой



б) 2D карта с показом изолиний потенциала

Рисунок 8 – Пример 2D карты для момента вершины R-зубца

На экране монитора кардиологу должна предъявляться исключительно цветовая палитра. Полутоновой вариант может использоваться только для цели публикаций материалов, поскольку при этом диапазон изменения градаций яркости не учитывает знака потенциала и в 2 раза меньше суммарного диапазона изменения оттенков цвета (градации красного и голубого).

3D визуализация электрической активности сердца основывается на объемном изображении поверхности эпикарда с использованием триангуляционной реалистической модели этой поверхности. Достоинством такого подхода является наглядность за счет объемного восприятия объекта, а также за счет знакомого кардиологу реалистического очертания поверхности сердца, позволяющего отделять области предсердий от области желудочков. При таком подходе для наблюдения всех точек поверхности сердца необходимо изменять ракурс, т.е. поворачивать картинку. Это требует дополнительных вычислительных и временных затрат а также создает неудобства при визуализации изменения 3D карты в течение кардиоцикла.

Основные этапы работы алгоритма 3D визуализации представлены на рисунке 9. На 1-м этапе загружается матрица с координатами точек, образующих триангуляционную сетку $pnt = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1.. N_{pnt}$, где N_{pnt} – количество точек сетки. На 2-м этапе загружается матрица с номерами точек, образующих вершины треугольников $dhk = (i_A(tr), i_B(tr), i_C(tr))$, $tr = 1..N_h$, где $i_A(tr)$, $i_B(tr)$, $i_C(tr)$ – номера точек А, В, С, образующих треугольник с номером tr ; N_h – количество треугольников; $N_{pnt} > N_h$. На рисунке 10 представлен пример 3D карты.

В четвертой главе рассмотрены вопросы реализации системы неинвазивной электрокардиодиагностики на основе визуализации электрической активности на поверхности сердца.

Предложен **динамически изменяющийся масштаб** цветовой палитры для карт электрического потенциала, когда для каждого момента времени максимальные по модулю уровни положительного и отрицательного потенциала соответствуют максимальной насыщенности красного и

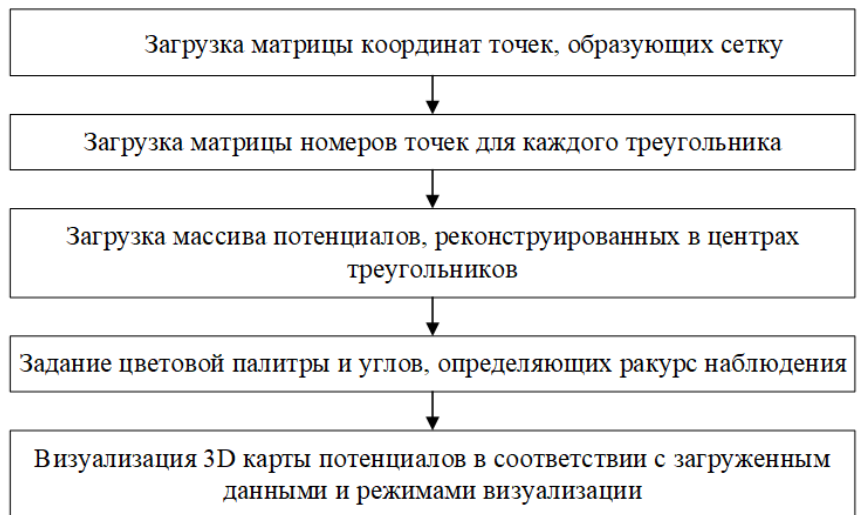


Рисунок 9 – Основные этапы работы алгоритма 3D визуализации

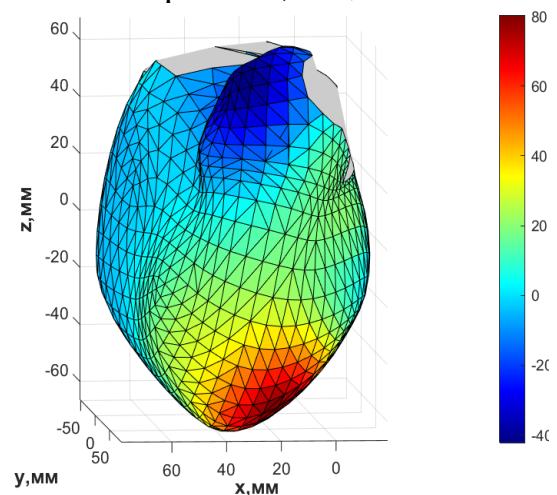


Рисунок 10 – Визуализация 3D карты потенциалов

синего цвета, соответственно. При этом наиболее наглядно отображаются неоднородности в распределении потенциала. Для сравнения карт для разных моментов времени опционально предлагается **фиксированный масштаб** палитры, когда максимальная насыщенность красного и синего цвета соответствует уровням потенциала, предельным для всего наблюдаемого сегмента кардиоцикла. Отображение **временной динамики** электрической активности сердца возможно в двух вариантах: 1) после реконструкции серии карт для выбранного сегмента кардиоцикла, пользователь сам кнопкой мыши запускает процедуру визуализации очередного кадра (1-2 секунды в зависимости от уровня ПК); 2) пользователь просматривает видеоматериал, сохраненный в форматах AVI (с возможностью остановки в нужном месте) или GIF. Второй вариант требует примерно в 5 раз больше памяти, к тому же в данном варианте теряется возможность оперативно менять точку наблюдения (ракурс).

Разработано меню выбора режима обследования для АРМ врача-кардиолога, на рисунке 11 показан вид основного окна программы на этапе визуализации. Режимы цветовой палитры устанавливаются кнопками *Auto Scale* и *Manual*.

При перемещении слайдера по временной шкале, обновляется соответствующая карта потенциала. При этом **синхронно смещается временной маркер на знакомой кардиологу электрокардиограмме в верхней части экрана**. Это способствует наглядности при визуализации в динамике электрической активности сердца на кардиоцикле.

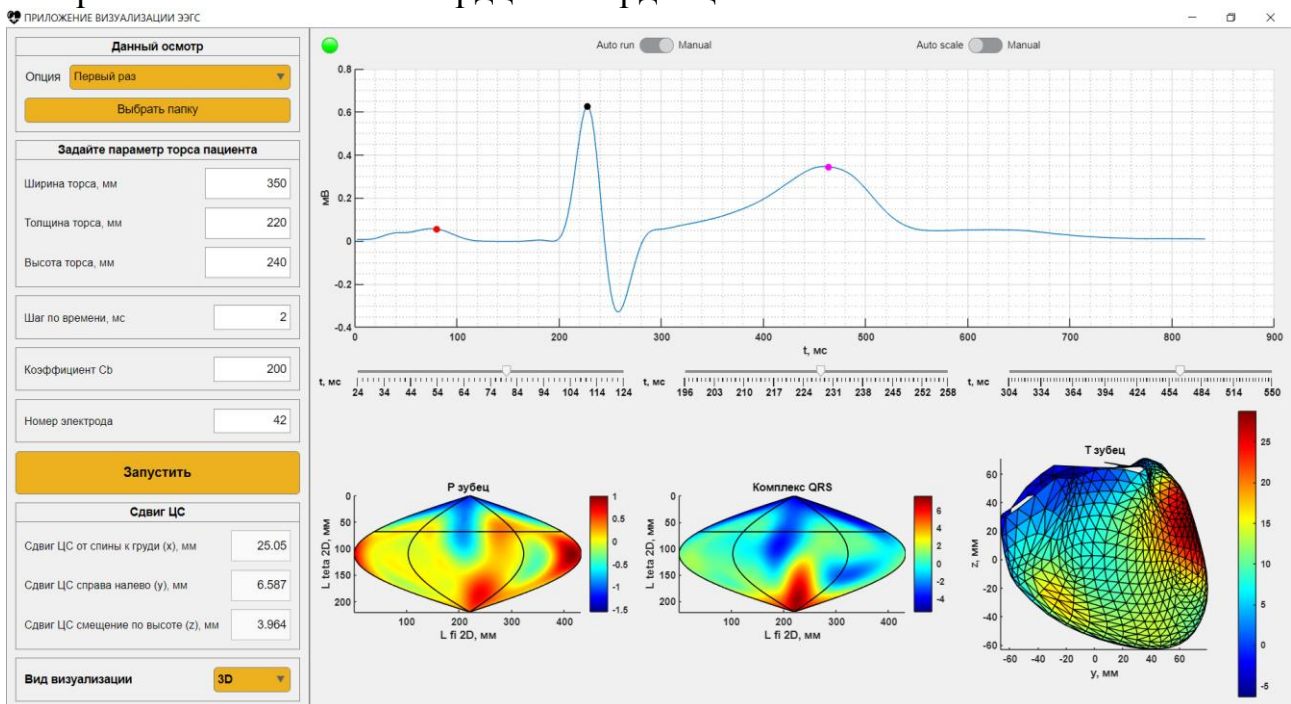


Рисунок 11 – Интерфейс программы на этапе визуализации

В работе проведен **анализ ресурсоемкости и временных затрат** на обследование.

В таблице 1 представлены данные по временным затратам на обследование для типичных параметров алгоритма обработки данных в системе неинвазивного электрокардиологического скрининга. При этом рассматривался вариант, когда число точек разбиения $N_{\theta} = 30$; $N_{\varphi} = 60$; параметры ПК 1: Core(TM) i5-5200U;

2.20ГГц, 8.00ГБ; для ПК 2: Core(TM) i5-10400; 2.90ГГц; 8.00 ГБ, 6 ядер, 12 логических процессоров.

Приведенные ниже параметры приведены по пп.1-5 для обработки 280 отсчетов времени (560 мс) кардиоцикла. Расчеты по пп.6-9 соответствуют QRS-комплексу (46 точек времени, 92 мс). В итоге ожидаемое время обследования составляет около 6–10 минут, обработка в ПК1 занимает 101 секунду, в ПК2 – только 53 секунды.

Таблица 1 – Временные затраты

		ПК 1	ПК 2
1. Установка жилета, соединение электронного блока с жилетом и с ПК		3-5 мин	
2. Предварительный мониторинг для проверки качества записи		30 с - 1 мин	
3. Регистрация многоканальных ЭКС		30 с - 1 мин	
4. Установка параметров обработки в интерактивном режиме		1 - 2 мин	
5. Препроцессинг		9,615 (с)	11,164 (с)
6. Интерполяция потенциалов на торса		6,124 (с)	4,959 (с)
7.1. Определение ЦС		0,077 (с)	0,075 (с)
7.2. Привязка модели эпикарда	2D	0,0033 (с)	0,016 (с)
	3D	0,0786 (с)	0,112 (с)
8. Реконструкция распределения потенциала на эпикарде	2D	29,409 (с)	12,152 (с)
	3D	28,666 (с)	10,372 (с)
9.1. Расчет карт для визуализации	2D	10,299 (с)	3,899 (с)
	3D	0 (с)	0 (с)
9.2. Визуализация (3 рисунки)	2D	11,014 (с)	7,249 (с)
	3D	5,407 (с)	3,001 (с)

В таблице 2 представлены затраты памяти на диске ПК для проведения одного обследования. Для расчета матриц, связывающих поверхности торса и эпикарда, требуется наибольшая емкость из всех разделов хранилища – порядка 234 МБ, что составляет 99% от общих затрат памяти. Однако сохранение этих данных позволит сократить время обработки в случае повторного осмотра и поступления новых записей – в соответствии с таблицей 1, реализуется сокращение времени обработки при повторном осмотре на 18-20 %.

Для проверки работоспособности предлагаемого программного обеспечения было проведено исследование устойчивости результатов картирования. Сравнивались карты электрического потенциала: 1) полученные в одном состоянии сердечно-сосудистой системы – по записям, отстоящим во времени на малый интервал порядка 20 секунд; 2) полученные в смежных состояниях по записям, отстоящим во времени на 1 неделю. В первом случае различий в картах практически не наблюдалось. Для интервала в 1 неделю наблюдается только незначительное различие в распределении потенциала, связанное с возможным изменением позы или незначительной разницей в положении электродов на торсе при регистрации потенциалов. В таблице 3 представлены коэффициенты корреляции Пирсона, свидетельствующие о высоком уровне корреляции между

рассмотренными случаями и об устойчивости получаемых карт электрического потенциала на поверхности эпикарда.

Таблица 2 – Ресурсоемкость для одного обследования

	Сохранение	Объем
1	Записи (1мин)	2,9 МБ
2	Дополнительная информация, сохраненная после обработки сигнала	5 КБ
3	Память для хранения рассчитанных параметров для повторно просмотра результатов (при числе разбиений $N_{\theta} = 30$)	234 МБ
3.1	Временные параметры	160 КБ
3.2	Структуры для торса	8 КБ
3.3	Структуры для сферической модели КЭ	16 КБ
3.4	Структуры для триангуляционной модели эпикарда	120 КБ
3.5	Матрица коэффициентов для сферической модели КЭ	136 МБ
3.6	Матрица коэффициентов для триангуляционной модели эпикарда	93 МБ
3.7	Матрица для визуализации сферической модели КЭ	2,65 МБ
3.8	Матрица для визуализации триангуляционной модели эпикарда	1,3 МБ

Таблица 3 – Коэффициенты корреляции Пирсона между картами в случаях 1 и 2

	Случай 1 (интервал 20 секунд)	Случай 2 (интервал 1 неделя)
Расчет распределения потенциала для сферической модели квазиэпикарда	0,9965	0,9770
Расчет распределения потенциала для триангуляционной модели эпикарда	0,9956	0,9757

Дополнительным этапом оценки работоспособности программного обеспечения явилась проверка согласованности 2D и 3D карт электрического потенциала. Отмечается четкое соответствие областей на триангуляционной модели эпикарда (3D карты) и на плоской развертке поверхности квазиэпикарда (2D карты).

В качестве предварительной оценки диагностической значимости получаемых результатов нами было проведено выборочное сравнение здоровых и больных с установленным (верифицированным) постинфарктным синдромом (ПИС) в условиях стационара в больнице «Клиническая больница № 6 им. Г.А. Захарьина», г. Пенза. На рисунках 12 - 13 представлены соответствующие 2D карты потенциалов для момента R-пика, свидетельствующие об уменьшении площади положительных значений потенциала для больного с ПИС.

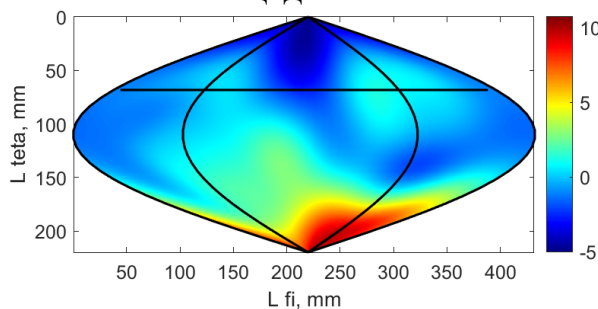


Рисунок 12 – 2D карты потенциалов на поверхности КЭ у больного ПИС

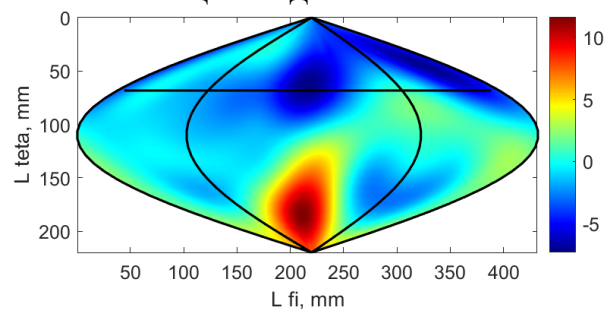


Рисунок 13 – 2D карты потенциалов на поверхности КЭ у здорового

Были предложены оценки нормированных площадей возбуждения желудочков. Сравнивались временные зависимости и максимальные значения площадей возбуждения на интервале QRS, нормировка проводилась по общей площади желудочков. Мы получили, что для здоровых обследуемых максимальная нормированная площадь возбуждения составляет величину не менее 0,7. В то же время для больных с ПИС максимальная нормированная площадь возбуждения не превышает 0,5. Полученные данные свидетельствуют о визуальном различии 2D карт и о значимом уменьшении площади возбуждения на R зубце для больных с ПИС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработан алгоритм предобработки, который позволяет перейти от зарегистрированных многоканальных электрокардиосигналов к карте электрического потенциала на поверхности торса.

2. Разработан метод реконструкции КППЭ, обеспечивающий привязку геометрических моделей поверхности сердца к системе координат торса, на основе обработки зарегистрированных многоканальных ЭКС.

3. Разработаны и реализованы методы визуализации карт эпикардального потенциала, позволяющие совместно использовать 2D карты на плоской развертке поверхности квазиэпикарда и 3D карты для триангуляционной реалистической модели эпикарда, обеспечивающие поворот 2D карт в направлении электрической оси сердца и предоставляющие удобство наблюдения временной динамики изменения КППЭ синхронно со стандартным ЭКГ-сигналом

4. Разработан пакет алгоритмов и программ для скрининговой системы электрокардиодиагностики на основе компьютерной обработки многоканальных ЭКС, позволяющий реализовать режим визуализации КППЭ и предоставляющий врачу-кардиологу удобный интерфейс с организацией режимов архивирования, обработки ЭКС, способов визуализации карт эпикардального потенциала.

5. Разработана методика исследования работоспособности алгоритмического и программного обеспечения, подтвердившая устойчивость КППЭ, согласованность 2D и 3D карт потенциала и показавшая приемлемое время обработки многоканальных ЭКС порядка 50 – 100 секунд при общем времени обследования 6 – 10 минут.

Рекомендации. Результаты диссертационной работы позволяют расширить функциональные и диагностические возможности неинвазивной электрокардиодиагностики при скрининговых обследованиях широких слоев населения.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных
ВАК Минобрнауки России*

1. Крамм, М.Н. Особенности построения многоэлектродной системы электрокардиологического скрининга / М.Н. Крамм, О.Н. Бодин, А.Ю. Бодин, Т.Л.Н. Чьюнг, Г.В. Жихарева // Медицинская техника – 2022 – №5(335). – С.37–41.

2. Крамм, М. Н. Реконструкция и визуализация электрической активности сердца с помощью многоэлектродной системы электрокардиодиагностики / М. Н. Крамм, О. Н. Бодин, А. Ю. Бодин, Г. В. Жихарева, **Т. Л. Н. Чьонг**. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2022 – № 4. – С. 93–101.

3. Батяев, А. С. Обеспечение электромагнитной совместимости в системе регистрации множественных отведений электрокардиосигнала / А. С. Батяев, О. Н. Бодин, **Т. Л. Н. Чьонг**, М. Н. Крамм, А. Ю. Бодин. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2023. № 2. – С. 89–96.

4. Крамм, М.Н. Алгоритм обработки электрокардиосигналов в многоэлектродной системе электрокардиологического скрининга для визуализации электрического потенциала на эпикарде / М.Н. Крамм, **Т.Л.Н. Чьонг**, А.Ю. Бодин, О.Н. Бодин, Г.В. Жихарева. // Медицинская техника. – 2023 – №5(341). – С.13–17.

5. Бодин, А.Ю. Классификация электрокардиографических помех и разработка способа сегментации электрокардиосигнала / А. Ю. Бодин, М. Н. Крамм, Л. Ю. Кривоногов, Н. А. Сержантова, **Т.Л.Н. Чьонг**. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2023 – № 4. – С. 64–71.

Публикации в изданиях, индексируемых в международной наукометрической базе Scopus

6. Kramm, M. N. Constructional Features of a Multielectrode Electrocardiology Screening System / M. N. Kramm, O. N. Bodin, A. Yu. Bodin, **T. L. N. Truong**, G. V. Zhikhareva // Biomed Eng. – 2023. – Vol. 56, No. 5. – Pp. 345–352.

7. Bodin, O. N. Issues of Interference-Resistant Processing for Electrocardiodiagnostics / O. N. Bodin, M. N. Kramm, A. Y. Bodin, **T. L. N. Truong** and L. Y. Krivonogov // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) (29 June-3 July 2023 y.). – 2023. – Pp. 1260-1269.

8. Kramm, M. N. Issues of Electrocardiosignal Processing for the Visualization of Electrical Potential Maps on the Epicardium in a Multielectrode Electrocardiological Screening System / M. N. Kramm, **T. L. N. Truong**, A. Y. Bodin, O. N. Bodin and G. V. Zhikhareva // 2023 Systems and Technologies of the Digital HealthCare (STDH) (4-6 October 2023 y.). – 2023. – Pp. 66-68.

9. Kramm, M.N. An algorithm for electrocardiosignals processing in a multielectrode electrocardiological screening system for visualization of the electrical potential of the epicardium/ M.N. Kramm, **T.L.N. Truong**, A.Y. Bodin, et al. // Biomed Eng. – 2024. – 57, Pp. 316–320.

10. Danilkina, Y.S. Multichannel ECG Recording from the Surface of the Female Torso and Visualization of Heart Characteristics / Y.S. Danilkina, M.N. Kramm, **T.L.N. Truong**, A.Y. Bodin, D.V. Krayushkin. // Scientific Visualization. 2024. – Vol. 16, No. 3. – Pp. 97 – 105.

Патенты, заявки на патенты и свидетельства о государственной регистрации программ

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686240. Программа для определения координат электрического центра сердца / М. Н. Крамм, **Т.Л.Н. Чьонг**, Г.В. Жихарева. – заявка № 2024685751, дата поступления 24.10.2024 г., дата регистрации 06.11.2024г, Бюл. № 11.

Статьи и материалы конференций

12. **Чьонг, Т.Л.Н.** Реконструкция электрического генератора сердца на сферическом квазиэпикарде / Т.Л.Н. Чьонг, А.А. Гушин. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать пятая Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (14–15 марта 2019 г.), – Москва: ООО «Центр полиграфических услуг “Радуга,»», 2019. – С. 163.

13. **Чьонг, Т.Л.Н.** Реконструкция распределения эквивалентного электрического генератора сердца на сферическом квазиэпикарде по реальным ЭКС / Т.Л.Н. Чьонг, М.Н. Крамм // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать шестая Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (12–13 марта 2020 г.), – Москва: ООО «Центр полиграфических услуг “Радуга,»», 2020. – С. 162.

14. **Чьонг, Т.Л.Н.** О влиянии параметров алгоритма реконструкции на распределение эквивалентного электрического генератора сердца на поверхности эпикарда / Т.Л.Н. Чьонг, М.Н. Крамм // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать восьмая Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (17–19 марта 2022 г.), – Москва: ООО «Центр

полиграфических услуг «Радуга,», 2022. – С. 188.

15. Крамм, М.Н. 2D визуализация электрической активности сердца на квазиэпикарде / М.Н. Крамм, **Т.Л.Н. Чьонг**, А.Ю. Бодин, О.Н. Бодин // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2022: труды XV Международной научной конференции с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова (28-30 июня 2022 г.). – Владимир-Суздаль: ВГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2022. – Книга 1.– С. 155–158.

16. Бодин, А.Ю. Особенности регистрации множественных отведений электрокардио сигналов / А.Ю. Бодин, О.Н. Бодин, М.Н. Крамм, **Т.Л.Н. Чьонг**, Д.С. Гомзин // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2022: труды XV Международной научной конференции с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова (28-30 июня 2022 г.). – Владимир-Суздаль: ВГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2022. – Книга 1.– С. 461–465.

17. **Чьонг, Т.Л.Н.** Поиск координат центра сердца для реконструкции распределения эквивалентного электрического генератора сердца / Т.Л.Н. Чьонг, М.Н. Крамм // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать девятая Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (16–18 марта 2023 г.), – Москва: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга,», 2023. – С. 191.

18. Жихарева, Г.В. Восстановление электрической активности миокарда по сигналам многоэлектродной электрокардиографической системы / Г.В. Жихарева, М.Н. Крамм, Я.А. Куприянова, И.В. Андреев, И.А. Останин, **Т.Л.Н. Чьонг** // Агаджаньяновские чтения. IV Всероссийская научно-практическая конференции с международным участием (25–27 мая 2023 г.). – Москва: РУДН, 2023.- С. 137-140.

19. Крамм, М.Н. Построение многоэлектродной электрокардиографической скрининговой системы / М.Н. Крамм, Г.В. Жихарева, **Т.Л.Н. Чьонг**, А.Ю. Бодин, О.Н. Бодин // Агаджаньяновские чтения. IV Всероссийская научно-практическая конференции с международным участием (25–27 мая 2023 г.). – Москва: РУДН, 2023. – С. 219–222.

20. Данилкина, Ю.С. Разработка электрокардиографического женского жилета / Ю.С. Данилкина, **Т.Л.Н. Чьонг**, А.Ю. Бодин, М.Н. Крамм // В книге: Современные проблемы физики и технологий. Сборник тезисов докладов X Международной молодежной научной школы-конференции (25 – 27 апреля 2023). Москва: МИФИ, 2023. С. 147–148.

21. **Чьонг, Т.Л.Н.** Многоэлектродная система электрокардиологического скрининга / Т.Л.Н. Чьонг // Сборник научных статей по материалам XX Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию юбилею Пензенского государственного университета (16–17 ноября 2023г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2023.– С. 71–73.

22. **Чьонг, Т.Л.Н.** Вопросы визуализации эпикардального потенциала в многоэлектродной электрокардиологической системе/ Т.Л.Н. Чьонг // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2023: труды XXXVI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов (6-8 декабря 2023 г.). - Рязань: ИП Коняхин А.В., 2023. – С. 34-37.

23. **Чьонг, Т.Л.Н.** Смена ракурса для 2D визуализации эпикардального потенциала / Т.Л.Н. Чьонг, М.Н. Крамм // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тридцатая Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (29 февраля–02 марта 2023 г.), – Москва: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга,», 2024. – С. 183.

24. Крамм, М.Н. Особенности регистрации и обработки электрокардиосигналов в многоэлектродной электрокардиографической скрининговой системе/ М.Н. Крамм, О.Н. Бодин, А.Ю. Бодин, **Т.Л.Н. Чьонг**// 25-м Юбилейном Конгрессе РОХМиНЭ, 17-м Всероссийском Конгрессе «Клиническая электрокардиология» и Десятой Всероссийской конференции детских кардиологов ФМБА России (26-27 апреля 2024г.) // Российский кардиологический журнал – 2024. –№ 7S, Том 29 – С. 33-34.

25. **Чьонг, Т.Л.Н.** Визуализация карт эпикардального электрического потенциала для триангуляционной модели поверхности сердца / **Т.Л.Н. Чьонг**, М.Н. Крамм, А.Ю. Бодин, О.Н. Бодин, Е.В. Шалимова // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2024: труды XVI Международной научной конференции с научной молодежной

школой им. И.Н. Спиридонова (02-04 июля 2024 г.). – Владимир-Суздаль: ВГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2024. – С. 74–78.

26. Бодин, А. Ю. Способ построения многопоточных приложений, работающих с последовательным потоком данных на примере многоканальной электрокардиологической системы/ А.Ю. Бодин, М.Н. Крамм, О.Н. Бодин, **Т.Л.Н. Чьонг**// Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2024: труды XVI Международной научной конференции с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова (02-04 июля 2024 г.). – Владимир-Суздаль: ВГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2024. – С. 385–389.

Чьонг Тхи Лан Нхи

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
СЕРДЦА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ
МНОГОКАНАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук