

На правах рукописи



Моторина Светлана Валерьевна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ  
ДИАГНОСТИКИ ФИБРИЛЛЯЦИИ ПРЕДСЕРДИЙ ДЛЯ СИСТЕМ  
МОНИТОРИНГА СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Специальность:

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена на кафедре биотехнических систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Научный руководитель: **Калиниченко Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры биотехнических систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», (г. Санкт-Петербург)

Официальные оппоненты: **Мельник Ольга Владимировна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (г. Рязань);  
**Кирик Дмитрий Игоревич**, кандидат технических наук, доцент, декан факультета радиотехнологий связи, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация: Непубличное акционерное общество «Институт кардиологической техники» ИНКАРТ (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «19» декабря 2019 года в 13:00 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.10 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте [www.etu.ru](http://www.etu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан «18» октября 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент



Е.В. Садыкова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность исследования**

В последнее время патологии сердца занимают одну из лидирующих позиций среди заболеваний, приводящих не только к инвалидности, но и к летальным исходам, и являются одной из основных причин смертности в развитых странах. Распространенной группой сердечных заболеваний являются нарушения ритма и проводимости. Они возникают не только у людей с патологиями, но и у большинства здоровых людей, и в совокупности с другими заболеваниями могут перейти в патологическую форму. Одним из опасных нарушений сердечного ритма является фибрилляция предсердий (мерцательная аритмия). По данным ФГБУ ННПССХ им. А.Н. Бакулева» МЗ РФ она возникает у 1-2% населения планеты, преимущественно у людей пожилого возраста, при этом риск ее возникновения с годами возрастает.

На сегодняшний день существует множество алгоритмов автоматической диагностики фибрилляции предсердий, но большинство из них требует больших вычислительных затрат, что ограничивает возможность их практического применения. В настоящей работе представлен новый подход к решению задачи автоматического распознавания фибрилляции предсердий, на основе которого разработан алгоритм, предназначенный для внедрения в медицинских приборах и системах.

**Целью исследования** является разработка эффективного алгоритма распознавания фибрилляции предсердий, предназначенного для использования в системах мониторинга сердечного ритма.

### **Задачи исследования**

1. Анализ существующих проблем в области автоматической диагностики фибрилляции предсердий.
2. Формирование представительной верифицированной базы данных, позволяющей провести исследование характерных особенностей фибрилляции предсердий, разработку и тестирование методов распознавания этого нарушения ритма.
3. Выбор информативных признаков, характеризующих диагностически значимые особенности фибрилляции предсердий.
4. Разработка эффективного алгоритма распознавания фибрилляции предсердий, предназначенного для использования в различных системах мониторинга сердечного ритма.
5. Тестирование разработанного алгоритма на контрольном наборе данных.

**Объектом исследования** является система автоматической диагностики фибрилляции предсердий.

**Предметом исследования** являются методы и алгоритмы автоматической диагностики фибрилляции предсердий.

### **Методы исследования**

В ходе диссертационного исследования использован системный подход к изучению медицинских процессов и систем, применены методы

математической статистики, корреляционного анализа, обработки цифровых сигналов и обучения нейронных сетей.

Моделирование осуществлялось с использованием программного пакета математического моделирования MATLAB 9.5.0 (R2018b).

#### **Научная новизна результатов исследования**

В ходе исследования получены следующие новые научные результаты:

1. Методы преобразования последовательности кардиоинтервалов в форму, позволяющую акцентировать характерные особенности различных типов ритма;
2. Набор информативных признаков, характеризующих диагностически значимые особенности сердечного ритма при фибрилляции предсердий;
3. Помехоустойчивый алгоритм детектирования Р-волны, отражающей процесс нормальной деполяризации предсердий;
4. Алгоритм выделения f-волны, отражающей спонтанные электрические процессы в предсердиях при мерцательной аритмии;
5. Нейросетевой алгоритм распознавания фибрилляции предсердий по коротким интервалам ЭКГ в одном отведении, использующий комбинации информативных признаков, полученных с помощью альтернативных подходов.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенные методы преобразования последовательности кардиоинтервалов обеспечивают возможность получать информативные признаки, повышающие точность распознавания фибрилляции предсердий;
2. Предложенный алгоритм детектирования Р-волны кардиоцикла позволяет исключить ошибочное распознавание в случаях, когда нерегулярность в последовательности кардиоинтервалов вызвана синусовой аритмией или комплексом нарушений на фоне синусового ритма;
3. Предложенный алгоритм выделения f-волны позволяет осуществлять распознавание фибрилляции предсердий при отсутствии выраженной нерегулярности в кардиоинтервалах;
4. Совместное использование предложенных подходов к оценке последовательности кардиоинтервалов, процесса деполяризации предсердий и предсердной активности обеспечивает повышение уровня чувствительности и специфичности алгоритмов распознавания фибрилляции предсердий.

**Теоретическую значимость** представляют новые методы: метод оценки регулярности сердечного ритма по признаку сходства с синусовым ритмом и признаку регулярности ритма; метод оценки процесса деполяризации предсердий по признаку наличия Р-зубца и признаку отсутствия Р-зубца; метод оценки предсердной активности по оценке мощности f-волны и оценке формы f-волны; алгоритм автоматической диагностики фибрилляции предсердий на основе предложенных признаков.

**Практическую значимость** представляет разработанный алгоритм распознавания фибрилляции предсердий, который может быть использован в составе программного обеспечения приборов и систем контроля сердечного ритма, а также сформированная верифицированная база данных, которая может быть использована для продолжения настоящего и проведения других аналогичных исследований.

#### **Реализация и внедрение результатов работы**

Практические и теоретические результаты диссертационного исследования внедрены в системе кардиомониторирования CardioQvark, а также в клинической и научно-исследовательской практике Института сердца и сосудов ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России.

#### **Степень достоверности результатов работы**

Достоверность результатов работы подтверждается соответствием результатов экспертного анализа экспериментальных и верифицированных специалистами данных результатам и выводам, которые были получены с применением разработанного методического и программно-алгоритмического обеспечения.

#### **Апробация результатов работы**

Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на конференциях: 68-я конференция профессорско-преподавательского состава, 2015; 70-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио, 2015; научная сессия «От трансляционных исследований – к инновациям», посвященная 35-летию ФГБУ «СЗФМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России, 2015; 69-я конференция профессорско-преподавательского состава, 2016; 71-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио, 2016; 12-я Российско-Германская Конференция по Биомедицинской Инженерии, 2016; 70-я конференция профессорско-преподавательского состава, 2017; 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио, 2017.

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 18 научных работ. Из них 7 статей – опубликовано в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи – в научном издании из базы данных Scopus, другие 8 работ – в материалах международных и российских научно-технических конференций и других изданиях.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 63 наименований. Основное содержание диссертации изложено на 102 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка и 25 таблиц.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы. Приведена информация о степени разработанности проблемы автоматической диагностики фибрилляции предсердий. Описаны объект и предмет исследования, методологическая,

теоретическая и эмпирическая база. Излагается научная новизна, теоретическая и практическая значимость представляемой работы вместе с научными положениями, выносимыми на защиту.

В **первой главе** анализируются проблема автоматической диагностики фибрилляции предсердий. Дается определение понятию «фибрилляция предсердий», описываются ее формы и характерные особенности, а также признаки на ЭКГ. Рассматриваются основные методы и алгоритмы распознавания этого нарушения, основанные на выявлении нерегулярности сердечного ритма, оценке предсердной активности и на сочетании этих подходов. Приведены результаты исследования по выявлению проблем в области автоматической диагностики фибрилляции предсердий. Выявлены следующие проблемы в исследуемой области:

1. Невысокая достоверность выявления фибрилляции предсердий по коротким фрагментам;
2. Вычислительная сложность применяемых методов;
3. Низкая специфичность существующих алгоритмов диагностики фибрилляции предсердий.

Сформированы цель и задачи исследования, направленные на преодоление выявленных проблем.

Во **второй главе** приведены сведения о составе и параметрах баз данных, на которых проводились исследования и апробация результатов (таблица 1).

Таблица 1

	База данных для исследования	MIT-BIH AF DB
Количество записей	110	23
Длительность одной записи	5 минут	10 часов
Частота дискретизации	257 Гц	250 Гц
Доля эпизодов с фибрилляцией предсердий	26%	36%
Количество различных типов ритма	12	4

В **третьей главе** предложен и исследован ряд следующих информативных признаков фибрилляции предсердий:

1. Признаки, характеризующие нерегулярность сердечного ритма:
  - признак сходства с синусовым ритмом;
  - признак регулярности ритма.
2. Признаки, характеризующие процесс деполяризации предсердий:
  - признак наличия Р-зубца;
  - признак отсутствия Р-зубца.
3. Признаки, характеризующие предсердную активность:
  - оценка мощности f-волны;

- оценка периодичности f-волны.

Для вычисления признаков, характеризующих нерегулярность сердечного ритма, предложен метод преобразования последовательности кардиоинтервалов в последовательность векторов, характеризующихся длиной  $L$  и направлением  $\alpha$  (углом наклона к оси абсцисс):

$$L = |\mathbf{RR}_i| = \sqrt{(RR_{i+1} - RR_i)^2 + (RR_{i+2} - RR_{i+1})^2} \quad (1)$$

$$\alpha = \arctg \frac{RR_{i+2} - RR_{i+1}}{RR_{i+1} - RR_i} \quad (2)$$

где  $RR_i$  – длина  $i$ -го кардиоинтервала.

Вектора строятся в полярной системе координат (рисунок 1а), а затем разворачиваются в декартовую со сдвигом по оси абсцисс таким образом, чтобы избежать попадания информативных участков на начало координат (рисунок 1б).

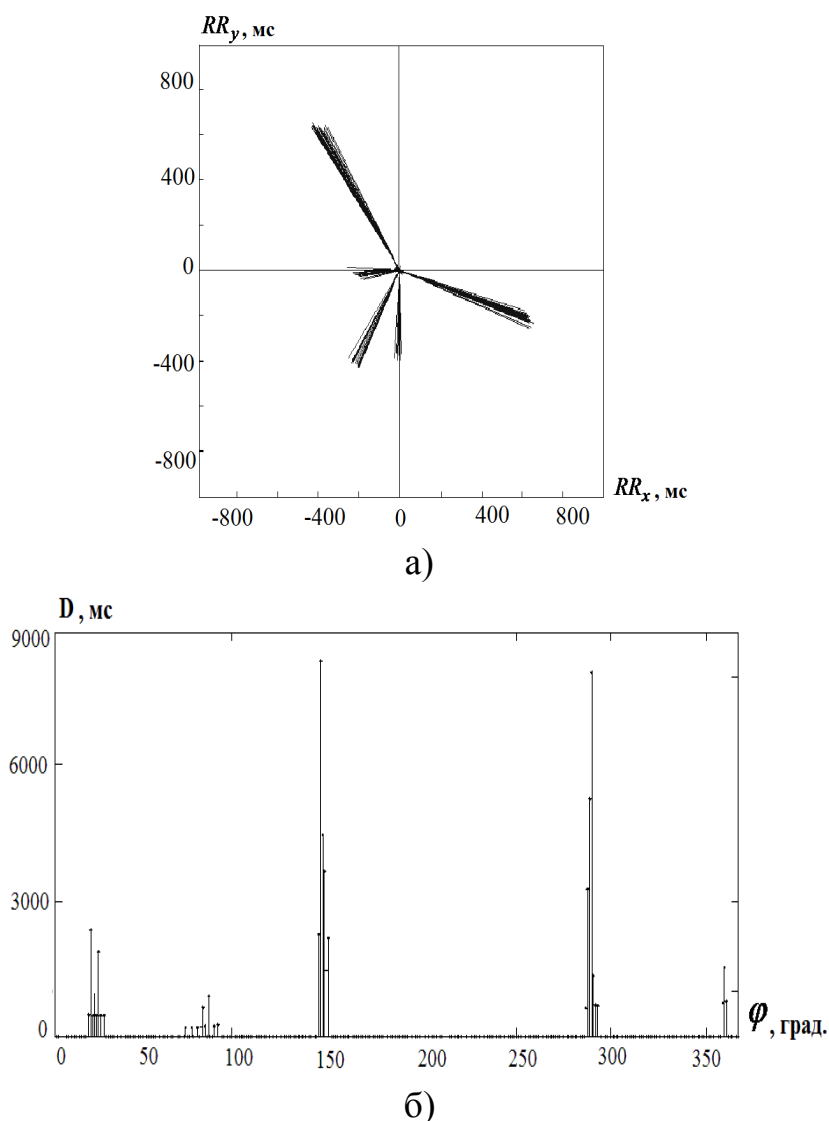


Рисунок 1

Такое представление данных позволяет оценить не только закономерности в последовательности кардиоинтервалов, но свести задачу обработки

изображения (псевдофазового портрета) к анализу одномерного сигнала. Этот метод преобразования сигнала использован при вычислении признака сходства с синусовым ритмом и признака регулярности ритма.

Признак сходства с синусовым ритмом  $N_0$  вычисляется как нормированное по количеству RR-интервалов в записи число векторов, длина которых не превышает заданный порог:

$$N_0 = \frac{\sum_{i=1}^N N_i}{N}, \quad \begin{cases} N_i = 1, & L_i \leq L_n \\ N_i = 0, & L_i > L_n \end{cases} \quad (3)$$

где  $L_i$  – длина  $i$ -го вектора,  $L_n$  – пороговая длина вектора,  $N$  – количество RR-интервалов в записи.

Признак регулярности ритма  $R$  рассчитывается как нормированное по количеству RR-интервалов в записи максимальное значение счетчика числа пар векторов  $R_k$ , для которых разность по длинам и по направлениям не превышает пороговых значений:

$$R_k = \sum_{i=1}^N R_i, \quad \begin{cases} R_i = 1, & \begin{cases} L_i - L_j \leq \Delta L \\ L_{i+1} - L_{j+1} \leq \Delta L \\ \beta_i - \beta_j \leq \Delta \beta \\ \beta_{i+1} - \beta_{j+1} \leq \Delta \beta \end{cases} \\ R_i = 0, & \begin{cases} L_i - L_j > \Delta L \\ L_{i+1} - L_{j+1} > \Delta L \\ \beta_i - \beta_j > \Delta \beta \\ \beta_{i+1} - \beta_{j+1} > \Delta \beta \end{cases} \end{cases}, \quad j = \overline{1, N} \quad (4)$$

$$R = \frac{\max R_k}{N} \quad (5)$$

где  $L_i$  и  $\beta_i$  – длина и направление  $i$ -го вектора,  $\Delta L$  и  $\Delta \beta$  – пороговые значения разброса по длине и направлению,  $N$  – количество RR-интервалов в записи.

Для вычисления признаков, характеризующих процесс деполяризации предсердий, используется усредненный кардиокомплекс. Признак наличия P-зубца  $S$ , определяется как площадь под графиком в пределах определенных границ P-зубца на усредненном кардиокомплексе:



$$S = \int_{p1}^{p2} U(t) dt \quad (6)$$

где  $p1$  и  $p2$  – границы Р-зубца,  $U(t)$  – усредненный кардиокомплекс.

Признак отсутствия Р-зубца  $L$ , вычисляется как максимальная длительность плоского участка в области до QRS-комплекса на усредненном кардиокомплексе:

$$L = \max L_i \quad (7)$$

где  $L_i$  – длительность  $i$ -го плоского участка.

Для вычисления признаков, характеризующих предсердную активность, к исследуемому фрагменту ЭКГ применяется вейвлет-преобразование, а области QRS-комплексов заменяются нулевым сигналом. Оценка мощности  $f$ -волны  $P$ , рассчитывается как максимальная мощность уровней вейвлет-разложения ЭКГ в диапазоне от 5 до 12 Гц:

$$P = \max \frac{\int_0^T U_i(t) dt}{T} \quad (8)$$

где  $U_i(t)$  –  $i$ -й уровень вейвлет-разложения,  $T$  – длительность фрагмента.

Оценка периодичности  $f$ -волны  $C$ , определяется как максимум корреляционной функции между уровнями вейвлет-разложения ЭКГ в диапазоне от 5 до 12 Гц и синусоидами соответствующих частот:

$$C = \max \int_0^T U_i(t) S_i(t + dt) dt \quad (9)$$

где  $U_i(t)$  –  $i$ -й уровень вейвлет-разложения,  $S_i(t)$  – синусоида заданной частоты, соответствующей частоте  $i$ -го уровня вейвлет-разложения,  $T$  – длительность фрагмента.

Также в третьей главе приведены результаты эксперимента по определению значения оптимальной длительности фрагмента ЭКГ для распознавания фибрилляции предсердий по предложенным признакам. В ходе эксперимента для каждого из предложенных признаков при каждом значении длительности фрагмента строились гистограммы распределения относительного числа фрагментов по значениям признака. По гистограммам определялось оптимальное пороговое значение, относительно которого данные могут быть разделены на фибрилляцию предсердий и другие типы ритма, и значение ошибки верификации при таком положении порога. Таким образом для каждого из признаков построены графики зависимости ошибки распознавания от длительности анализируемого фрагмента (рисунок 2).

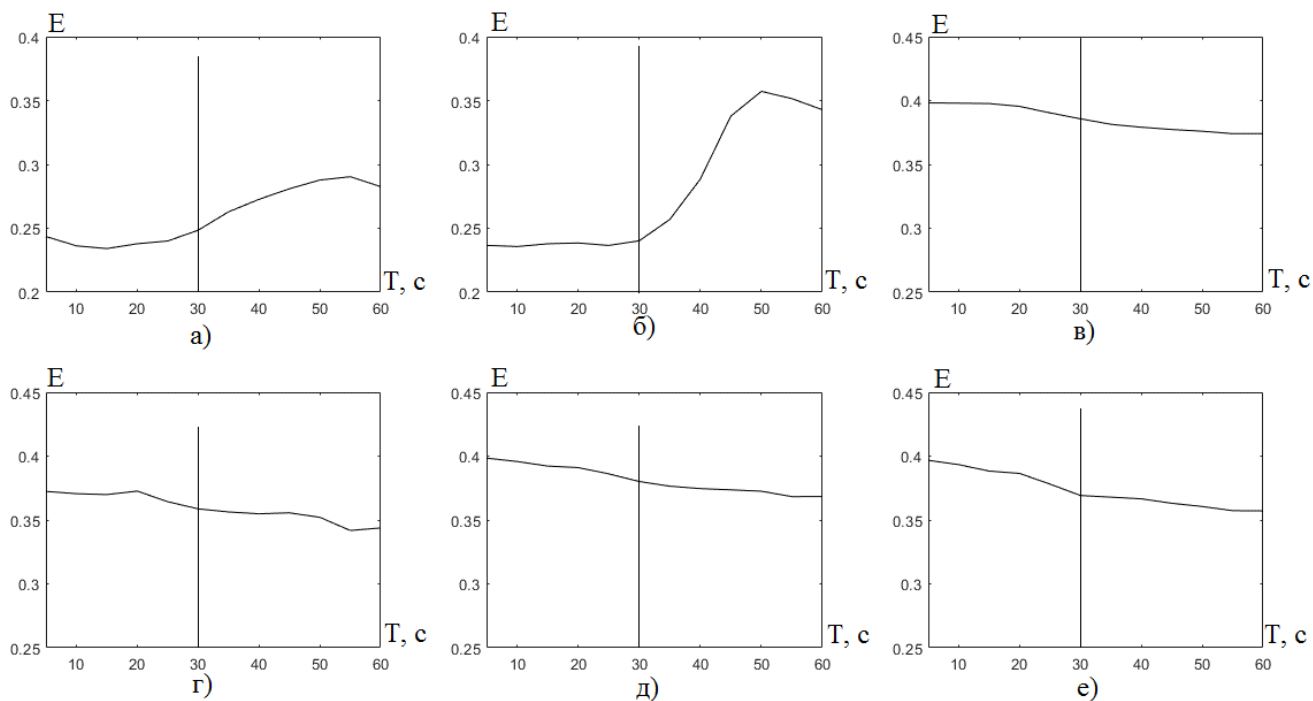
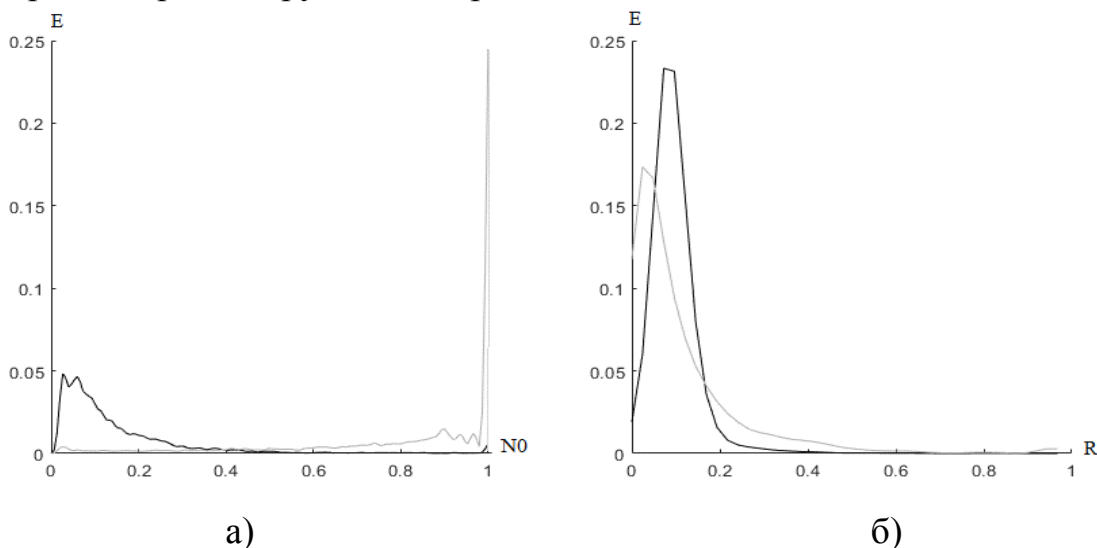


Рисунок 2

Оптимальными для распознавания фибрилляции предсердий с помощью предложенных признаков являются фрагменты длительностью в тридцать секунд. Это значение длительности, при котором ошибка распознавания с помощью признаков, характеризующих процесс деполяризации предсердий и предсердную активность, снижена, а ошибка распознавания с помощью признаков, характеризующих нерегулярность сердечного ритма, еще не возрастает.

При таком значении длительности фрагмента ЭКГ получены распределения данных обучающей выборки по значениям предложенных признаков. Они представлены на рисунке 3 (а) – признак сходства с синусовым ритмом, б) – признак регулярности ритма, в) – признак наличия Р-зубца, г) – признак отсутствия Р-зубца, д) – оценка мощности f-волны, е) – оценка периодичности f-волны). Черным цветом на графиках обозначена фибрилляция предсердий, серым – другие типы ритма.



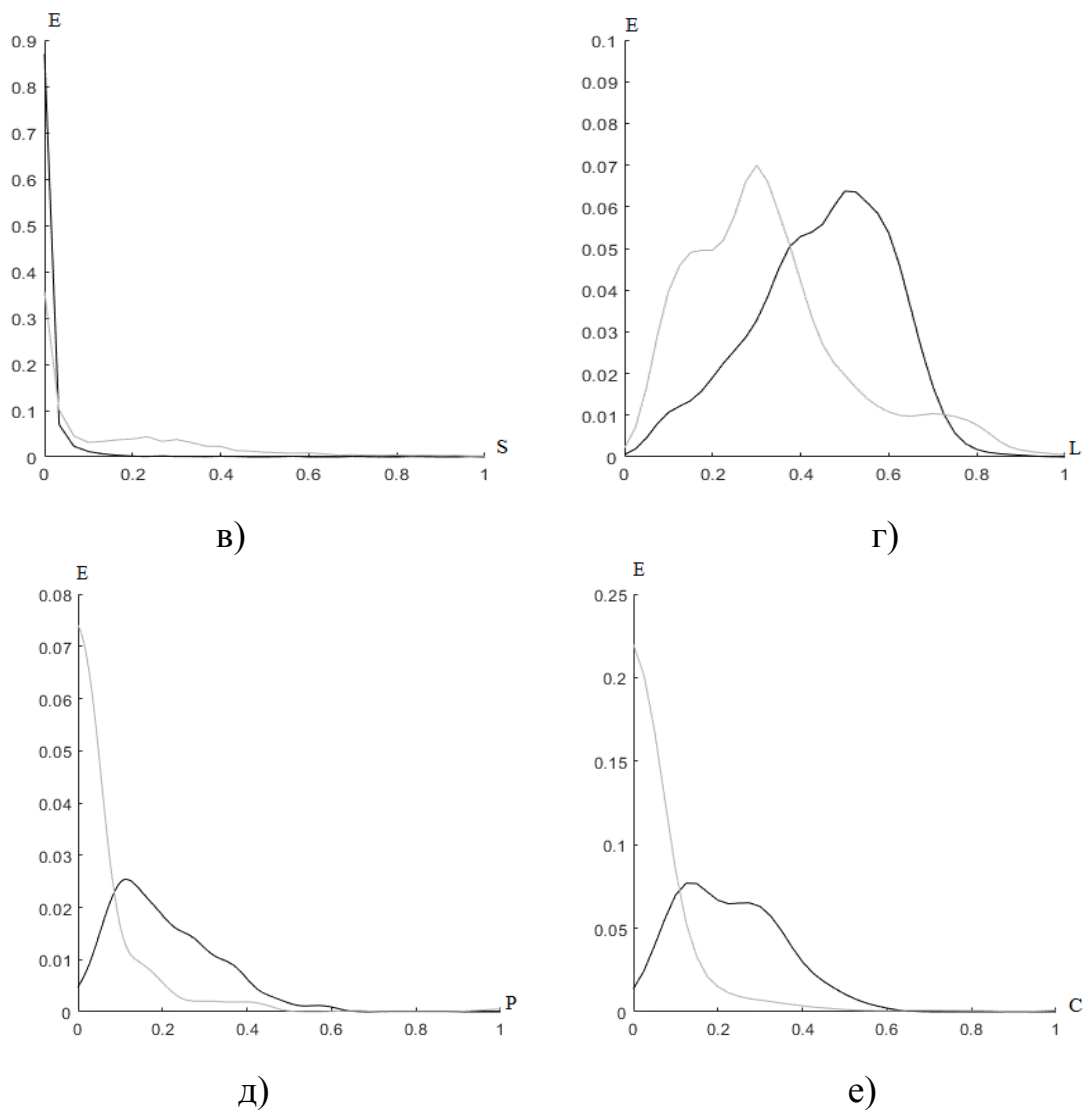


Рисунок 3

Как показывает анализ представленных зависимостей, ни один из признаков не позволяет распознавать фибрилляцию предсердий с достаточным уровнем точности. При этом их совместное использование может быть оправдано, поскольку каждый из признаков характеризует отдельный процесс, отражающийся на ЭКГ.

В завершении третьей главы обоснован выбор решающего правила для распознавания фибрилляции предсердий по предложенным признакам. Для этого выполнена предварительная оценка наиболее распространенных классификаторов:

- наивный байесовский метод;
- дискриминантный анализ;
- метод опорных векторов;
- нейронные сети.

Анализ метода нейронных сетей проводился с использованием сетей, параметры которых выбраны в пределах, адекватных для решения задачи распознавания двух состояний по шести признакам. В таблице 2 приведены ошибки распознавания типа ритма для исследованных методов классификации.

Таблица 2

Классификатор	Тип	Ошибка
Наивный байесовский классификатор	линейный	17,37
	квадратичный	19,31
Дискриминантный анализ	линейный	13,90
	квадратичный	19,69
	с использованием расстояния Махаланобиса	11,97
Метод опорных векторов	линейный	15,06
	с полиномиальным ядром	13,51
	с радиально-базисным ядром	12,74
Нейронная сеть	двуслойная	13,13
	трехслойная	11,58
	четырёхслойная	12,36

В качестве решающего правила выбрана нейронная сеть, поскольку предварительный анализ показал, что этот классификатор является наиболее перспективным для дальнейшей оптимизации при решении задачи распознавания фибрилляции предсердий по предложенным признакам.

В **четвертой** главе обоснован выбор параметров обучения и гиперпараметров нейронной сети. В главе описан процесс предварительной обработки данных для их дальнейшего анализа с помощью нейронных сетей, подразумевающий:

- сведение задачи распознавания фибрилляции предсердий к бинарной классификации (1 – фибрилляция предсердий, 0 – другие типы ритма);
- масштабирование признаков и помещение их в тензор (массив, состоящий из шести столбцов, по количеству признаков, и 1100 строк, по количеству тридцатисекундных фрагментов);
- разделение данных на обучающую, валидационную и контрольную выборки.

Также в четвертой главе обоснован выбор модели нейронной сети. Наиболее подходящей для решения задачи бинарной классификации по относительно небольшому количеству признаков является модель с сигмоидной функцией активации во всех слоях, кросс-энтропийной функцией потерь, алгоритмом обучения Левенберга-Марквардта, и шагом обучения, равном 0,38.

Для определения оптимальных гиперпараметров сети предварительно обозначены верхние и нижние границы поиска значений количества слоев и нейронов в каждом слое (таблица 3). Границы установлены с учетом информации о входных данных, типе решаемой задачи и объеме обучающей выборки.

Таблица 3

Количество слоев	Количество нейронов во входном слое		Количество нейронов в скрытых слоях		Количество нейронов в выходном слое
	Min	Max	Min	Max	
2	6	110	-	-	1
3	6	109	1	15	1
4	6	108	1	14	1
5	6	107	1	13	1

С использованием наложенных ограничений на гиперпараметры сети экспериментально определено, что оптимальной для решения поставленной задачи является трехслойная нейронная сеть с девятью входными нейронами, пятью нейронами в скрытом слое и одним выходным нейроном.

Для выбора оптимального количества эпох обучения исследован эффект переобучения сети, в ходе которого с каждой итерацией сеть все больше настраивалась на данные обучающей выборки и теряла способность к обобщению. В результате для алгоритма Левенберга-Марквардта получено две зависимости: зависимость средней ошибки от количества эпох для обучающей выборки и зависимость средней ошибки от количества эпох для валидационной выборки (рисунок 4).

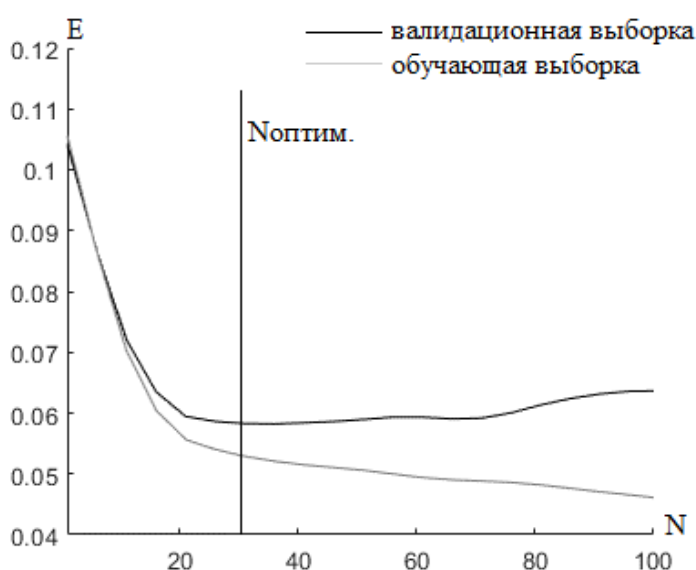


Рисунок 4

С помощью полученных зависимостей определено оптимальное количество эпох обучения для алгоритма Левенберга-Марквардта, при котором график для валидационной выборки достиг минимума, но еще не возрастает, а график для обучающей выборки продолжает убывать. Это значение равно тридцати.

Также в четвертой главе проведена оценка информативности предложенных признаков при распознавании фибрилляции предсердий с помощью разработанной нейронной сети. Для этого признаки поочередно

исключались из входных данных, проводилось обучение сети и вычисление средней ошибки (таблица 4).

Таблица 4

	Все признаки	Без N0	Без R	Без S	Без L	Без P	Без C
Ошибка, %	5,53	8,77	9,73	6,10	6,53	5,67	6,98

Проведенный эксперимент показал, что наиболее информативными являются признак сходства с синусовым ритмом (N0) и признак регулярности ритма (R). В то же время дополнительные признаки: признак наличия P-зубца (S), признак отсутствия P-зубца (L), показатель периодичности f-волны (C), в меньшей степени оказывают влияние на эффективность работы нейронной сети, поскольку появление f-волны и отсутствие P-зубца на ЭКГ возможно не только при фибрилляции предсердий. При этом оценка мощности f-волны (P) исключена из дальнейшего исследования, поскольку не оказывает существенного влияния на эффективность работы нейронной сети.

В результате проведенного исследования для решения задачи автоматического распознавания фибрилляции предсердий по разработанным признакам построена трехслойная нейронная сеть, состоящая из девяти нейронов во входном слое, пяти скрытых нейронов и одного нейрона в выходном слое с сигмоидной функцией активации (рисунок 5). Обучение сети проводилось по алгоритму Левенберга-Марквардта с шагом 0,38 в тридцать эпох.

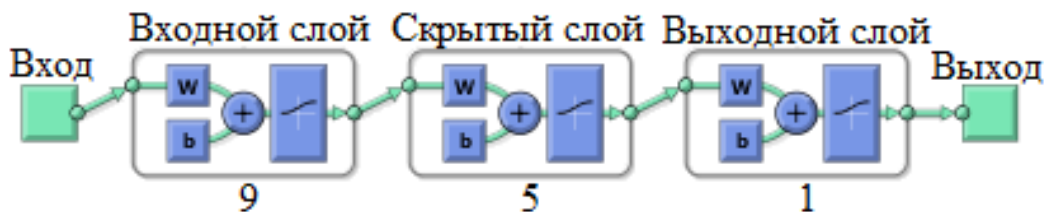


Рисунок 5

Построенная нейронная сеть стала основой алгоритма распознавания фибрилляции предсердий (рисунок 6), согласно которому сначала вычисляется признак сходства с синусовым ритмом. Если он превышает пороговое значение, найденное по графику зависимости относительного числа фрагментов от значения этого признака и равное 0,5, тип ритма определяется как «не фибрилляция предсердий», в противном случае вычисляются другие четыре признака и вместе с признаком сходства с синусовым ритмом подаются на вход нейронной сети.

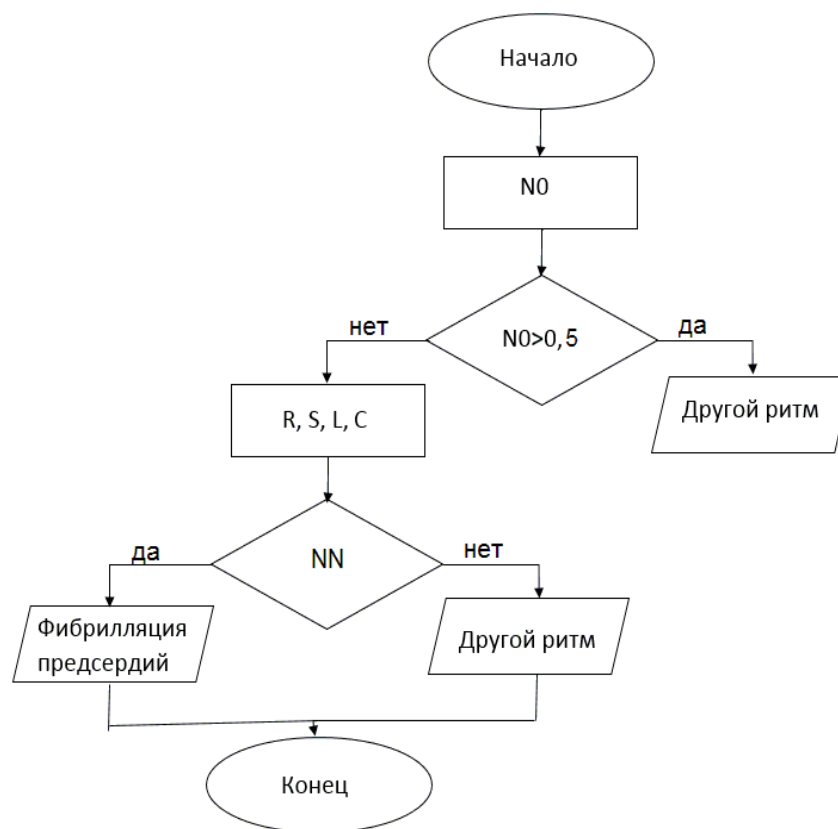


Рисунок 6

Результаты тестирования алгоритма приведены в таблице 5. Также в таблице приведены данные по алгоритмам, которые проходили проверку на базе данных MIT-BIH Atrial Fibrillation Database.

Таблица 5

Алгоритм	T, с	Se, %	Sp, %	Err, %
Разработанный (MIT-BIHAFDB)	30	90,68	95,57	6,67
Moody и Mark	60	87,54	95,14	7,88
Logan и Healey	120	87,30	90,31	10,89
Linker	30	97,64	85,55	9,61
Tatento и Glass	50	91,20	96,08	5,32
Cerutti и др.	90	96,10	81,55	16,62
Slocum и др.	180	62,80	77,46	28,39
Schmidt и др.	60	89,20	94,58	7,57
Babaeizadeh и др.	40	87,27	95,47	7,80
Couceiro и др.	60	96,58	82,66	11,77

При тестировании разработанного алгоритма получены показатели эффективности сравнимые с показателями других алгоритмов в исследуемой области.

В заключительной части четвертой главы приведено описание исследования производительности разработанного нейросетевого алгоритма. Производительность оценивалась с использованием трех компьютеров с низкой (Acer Aspire 5755), средней (Dell OptiPlex 24 7440) и высокой (компьютер с индивидуальной сборкой) вычислительной мощностью и двух выборок:

- полностью состоящей из фрагментов с нормальным синусовым ритмом и имитирующей записи, полученные с автономных систем мониторинга сердечного ритма;
- состоящей из равного количества фрагментов с нормальным синусовым ритмом и фрагментов с фибрилляцией предсердий или другими видами аритмий, имитирующей записи, полученные с холтеровских мониторов.

Оценка производительности разработанного алгоритма проводилась путем измерения времени, затрачиваемого на обработку записей описанных выборок (таблица 6).

Таблица 6

Длительность выборки	Состав выборки	Acer Aspire 5755	Dell OptiPlex 24 7440	Индивидуальная сборка
1 час	Нормальный синусовый ритм	3,13 с	1,13 с	0,92 с
	Смешанный ритм	42,87 с	13,70 с	2,55 с

Оценка производительности алгоритма показала, что на обработку записей автономных систем мониторинга сердечного ритма затрачивается не более четырех секунд, а на обработку записей холтеровских мониторов – несколько минут.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы по проведенному диссертационному исследованию. Выделены основные преимущества разработанного алгоритма диагностики фибрилляции предсердий:

1. Возможность распознавания типа сердечного ритма по коротким фрагментам ЭКГ в одном отведении.
2. Невысокая вычислительная сложность, позволяющая использовать алгоритм в автономных системах мониторинга сердечного ритма и для анализа длительных записей холтеровских мониторов.
3. Сбалансированные значения чувствительности и специфичности.

### **ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК**

1. Моторина С.В. Алгоритм распознавания мерцательной аритмии на основе графических методов. / С.В. Моторина, А.Н. Калиниченко // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – 10. – С. 55-60.
2. Моторина С.В. Выбор метода кластеризации для алгоритма выявления мерцательной аритмии / С.В. Моторина, А.Н. Калиниченко, А.П. Немирко // Биотехносфера. – 2015. – 4(40). – С. 2 -5.



3. Моторина С.В. Алгоритм распознавания фибрилляции предсердий на основе анализа закономерностей в последовательности кардиоинтервалов ЭКГ. / С.В. Моторина, А.Н. Калиниченко // Трансляционная медицина. – 2015. – 2. – С. 78.
4. Моторина С. В. Алгоритм выявления мерцательной аритмии в реальном масштабе времени. / С.В. Моторина, А.Н. Калиниченко // Медицинская техника. – 2016. – 3. – С. 12-15.
5. Моторина С.В. Оценка регулярности в порядке следования и длине кардиоинтервалов методами математической статистики. / С.В. Моторина, А.Н. Калиниченко // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2016. – 8. – С. 14-18.
6. Моторина С.В. Пороговый метод обнаружения Р-зубца при диагностике мерцательной аритмии. / С.В. Моторина // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2017. – 5. – С. 63-65.
7. Моторина С. В. Двухэтапный алгоритм обнаружения мерцательной аритмии. / С.В. Моторина, А.Н. Калиниченко // Медицинская техника. – 2018. – 2. – С. 34-37.

#### **Статьи, входящие в перечень изданий базы SCOPUS**

1. Motorina S.V. Real-time Algorithm for Detection of Atrial Fibrillation. / S.V. Motorina, A.N. Kalinichenko // Biomedical Engineering. – 2016. – V. 50, I. 3. – Pp.1-7.
2. Kalinichenko A.N., Motorina S.V., Uskov A.V. Algorithms for ECG Analysis in Mobile Cardiac Monitoring System. Proceedings of The 20th Conference of Open Innovations Association FRUCT, St.Petersburg, 3-7 April 2017, pp. 112 – 117.
3. Motorina S. V. A Two-Stage Algorithm for Detection of Atrial Fibrillation. / S.V. Motorina, A.N. Kalinichenko // Biomedical Engineering. – 2018. – V. 52, I. 2. – Pp.116-119.

#### **Публикации в других изданиях**

1. Моторина С.В., Калиниченко А.Н. Алгоритм распознавания фибрилляции предсердий на основе графических методов. 68-я конференция профессорско-преподавательского состава, Санкт-Петербург, 28 января-5 февраля 2015, с.55.
2. Моторина С.В., Калиниченко А.Н. Графический метод выявления фибрилляции предсердий. 70-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио, Санкт-Петербург, 21-22 апреля 2015, с. 31.
3. Моторина С.В., Калиниченко А.Н. Оценка нерегулярности сердечного ритма методами математической статистики. 69-я конференция профессорско-преподавательского состава, Санкт-Петербург, 26 января-4 февраля 2016, с. 60.
4. Моторина С.В. Метод статистической оценки закономерностей в последовательности линий фазового портрета для обнаружения фибрилляции предсердий. 71-я Всероссийская научно-техническая

- конференция, посвященная Дню радио, Санкт-Петербург, 20-28 апреля 2016, с. 25.
5. Калиниченко А.Н., Моторина С.В. ECG Analysis Algorithms for Smartphone Based Cardiac Monitor. 12-я Российско-Германская конференция по биомедицинской инженерии, Суздаль, 4-7 июля 2016, с. 1.
  6. Моторина С.В., Калиниченко А.Н. Обнаружение отсутствия Р-зубца в качестве дополнительного признака при диагностике фибрилляции предсердий. 70-я конференция профессорско-преподавательского состава, Санкт-Петербург, 1-11 февраля 2017, с. 56.
  7. Моторина С.В. Метод обнаружения Р-зубца при диагностике фибрилляции предсердий. 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио, Санкт-Петербург, 20-28 апреля 2017, с. 26.
  8. Моторина С.В. Двухэтапный алгоритм выявления фибрилляции предсердий / С.В. Моторина // Вестник аритмологии. – 2018. – 13. – С. 190.