

На правах рукописи



Старченкова Карина Сmbатовна

**МЕТОДЫ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА БИОМЕДИЦИНСКИХ
СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗМА**

Специальность 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского
назначения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре биотехнических систем.

Научный руководитель: Манило Людмила Алексеевна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», профессор кафедры биотехнических систем.

Официальные оппоненты:

Гельман Виктор Яковлевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И.Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, профессор кафедры медицинской информатики и физики, (г. Санкт-Петербург).

Исаков Роман Владимирович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», доцент кафедры биомедицинских и электронных средств и технологий, (г. Владимир).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, (г. Санкт-Петербург).


Защита состоится “25” декабря 2020 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.10 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

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

Автореферат разослан “23” октября 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.10
кандидат технических наук

 Садыкова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Система функционирования организма человека способна адаптироваться к изменениям внешней среды. Малые нерегулярные изменения, зависящие от различных состояний организма, приводят к изменениям показателей физиологических ритмов. Известно, что вариабельность биологических ритмов обладает свойством нелинейности, в связи с этим методы нелинейной динамики нашли широкое применение в области медицины. Организм человека сложноорганизованная система, поэтому правильное определение наиболее информативных и качественных показателей биологических ритмов необходимо для задач создания систем диагностики. Одной из таких задач является возможность распознавания сердечных аритмий, решение которой намного упростило бы работу кардиологов, анализирующих вручную длительные записи электрокардиограмм (ЭКГ) с целью выявления эпизодов нарушения ритма. Следующей важной задачей на сегодняшний день является автоматическое определение фетальной аритмии плода (ФА), которая возникает приблизительно в 5% случаев всех беременностей и сопровождается возникновением водянки и высокой вероятностью внутриутробной смерти.

Определяющей составляющей хирургической операции является введение пациента в состояние наркоза и контроль его глубины, т. к. требуется поддержание состояния глубокого наркоза на протяжении всей операции, а также не допущения раннего выхода из него и введения лишней дозы анестетика. Несвоевременное нарушение состояния наркоза может привести к необратимым процессам в организме человека, поэтому разработка алгоритмов мониторинга состояния наркоза при оперативном вмешательстве необходима для безопасного проведения операций.

Во время сна проявляются заболевания, которые можно определить, только находясь в этом состоянии. Задача распознавания апноэ сна на фоне других нарушений по электроэнцефалограмме (ЭЭГ) ранее не была решена. В настоящее время исследуют нарушения сна используя записи полисомнографии, но ручная оценка таких записей очень трудоемка для врача. Еще одной важной задачей является возможность автоматического распознавания стадий сна. На сегодняшний день точность предложенных систем не превышает 76%, поэтому возникает потребность в разработке программно-алгоритмического комплекса, который обладает более высокой точностью распознавания и при этом будет менее трудоемким для использования.

Биомедицинские сигналы характеризуются наличием хаотической составляющей, причем степень хаотичности сигнала меняется в зависимости от физиологического состояния человека и наличия патологии. В связи с этим предполагается, что использование нелинейных методов для решения представленных задач откроет новые возможности для оценки текущего состояния пациента и повысит качество распознавания патологий.

Цель работы: Разработка и исследование методов нелинейной динамики для медицинских компьютерных систем, выявляющих различные функциональные состояния организма и патологии по ЭКГ и ЭЭГ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Обоснование и выбор методов для решения задач анализа биосигналов в системах контроля и медицинской диагностики.
2. Исследование возможности применения методов нелинейной динамики для решения ряда задач медицинской диагностики.
3. Формирование набора классификационных признаков, на основе которых решаются задачи выявления патологий и физиологических состояний организма человека.
4. Разработка алгоритма принятия решений при определении патологий и состояний организма человека.
5. Разработка программно-алгоритмического комплекса для оценки хаотических компонент биосигналов в среде MATLAB.
6. Тестирование разработанного алгоритма на контрольном наборе данных.

Объектом исследования является биотехническая система, предназначенная для распознавания физиологического состояния человека и диагностики патологий.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы автоматического анализа физиологического состояния человека.

Методология и методы исследования: Для решения поставленных задач в диссертационной работе были использованы методы статистической теории принятия решений, аппарат нелинейной динамики, теория случайных процессов и линейный дискриминантный анализ. Программные комплексы разработаны в среде MATLAB.

Научная новизна исследований, проводимых в диссертационной работе, состоит в теоретическом обосновании и экспериментальном обеспечении для решения задач определения патологий и физиологического состояния организма. В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие научные результаты:

1. Сформирован набор морфологических признаков псевдоаттрактора биосигналов, используемый для классификации ряда функциональных состояний и патологий по ЭКГ и ЭЭГ.
2. Предложен новый подход к оценке информативности морфологических признаков аттрактора, отличающийся от известных обобщением результатов анализа методов: Фишера, Шеннона и накопленных частот.
3. Проведена сравнительная оценка эффективности предложенных методов анализа ритмограмм на двух длинах выборок данных.
4. Предложены и экспериментально исследованы методы распознавания ряда патологий и функциональных состояний с применением математического аппарата нелинейной динамики. Установлено, что в

задаче распознавания мерцательной аритмии и апноэ сна наибольшей точностью обладают фрактальные показатели, а в задачах распознавания фетальной аритмии и стадий наркоза наибольшую прогностическую значимость имеют показатель Херста и энтропия Шеннона. Энтропийные параметры обладают высокой точностью при определении стадий сна.

5. Разработан программно-алгоритмический комплекс, предназначенный для классификации ряда функциональных состояний и патологий по ЭКГ и ЭЭГ. Комплекс основан на использовании методов нелинейной динамики и реализован в среде MATLAB.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в изучении возможности использования методов нелинейной динамики для функциональной диагностики состояния организма. Изменения связанные с заболеваниями организма или с функциональными состояниями, ведут к изменениям показателей вариабельности физиологических ритмов, которые, как правило, имеют хаотическую составляющую. Это позволяет говорить, что физиологические системы проявляют сложную нелинейную динамику. В связи с этим знания о хаотических особенностях сигналов могут помочь врачам в постановке правильного диагноза и выработке эффективной тактики лечения пациента. Также использование показателей нелинейности в мониторинговых системах позволяет автоматически определять функциональное состояние человека. В работе установлено, что нелинейные показатели сигналов различны:

1. Для групп пациентов с разными кардиозаболеваниями. С помощью совокупности предложенных методов нелинейной динамики улучшено распознавание мерцательной аритмии на фоне частой экстрасистолии.
2. Показана возможность определения фетальной аритмии плода с точностью распознавания 97.0%.
3. В решении задачи определения стадий наркоза объединение графического и нелинейных методов привело к улучшению распознавания глубокой (BIS-20) и неглубокой (BIS-60) стадии наркоза.
4. При различных нарушениях сна. Нелинейные методы позволили распознать апноэ сна по ЭЭГ сигналу на фоне таких патологий сна, как бруксизм, нарколепсия, ночная эпилепсия лобной доли и ночное движение ног.
5. Для определения стадий сна. Представлена возможность распознавания стадий сна по ЭЭГ.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Приведены методы анализа биосигналов (ЭКГ, ЭЭГ) для решения задач контроля и диагностики состояния организма.
2. На основе методов нелинейной динамики (построение аттракторов, расчет морфологических признаков аттракторов, расчеты корреляционной размерности, старшего показателя Ляпунова, энтропий динамической системы и фрактальных характеристик) были получены новые

диагностические признаки, основанные на оценке выраженности хаотических компонент в сигнале.

3. Разработаны алгоритмы и программы, которые позволили решить, как ряд новых задач, так и известные задачи, но с лучшим качеством распознавания биосигналов. Задачи распознавания фетальной аритмии плода, стадий сна и наркоза были решены с точностью распознавания 96.0%, 99.0% и 80.9% соответственно. Благодаря методам нелинейной динамики стало возможным распознавание первой стадии сна от второй и третьей стадии от четвертой, что ранее не имело решения. В отличие от известных методов оценки полисомнограммы впервые решена задача распознавания апноэ сна только по ЭЭГ.
4. Получено новое морфологическое описание псевдофазового портрета (ПфП), что в отличие от визуальной оценки позволило численно оценить свойства аттрактора и на этой основе построить решающие правила. Для каждой конкретной задачи определён свой набор морфологических признаков.
5. Проведено сравнение графического метода и нелинейных показателей, которые имеют приблизительно одинаковую общую точность, при этом графический метод отличается более высокой специфичностью, а нелинейные показатели более высокой чувствительностью. Метод морфологического анализа ПфП прост в вычислении и будет эффективен для скрининга состояния сердечнососудистой системы и выявления задержек дыхания во время сна. Для мониторинга состояния организма целесообразно использовать нелинейные параметры, т.к. они обладают прогностической значимостью и изменяются, как при ухудшении состояния организма, так и при переходе стадий сна и наркоза.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении грантов РФФИ: №16-01-00159 «Исследование методов распознавания биомедицинских данных для задач медицинской диагностики и наблюдения», №18-29-02036 «Разработка новых алгоритмов автоматического распознавания опасных нарушений сердечного ритма по поверхностной и инвазивной электрокардиограмме» и №19-07-00475 «Разработка методов анализа биомедицинских сигналов с применением аппарата нелинейной динамики и множественного дискриминантного анализа данных».

Достоверность научных положений и выводов обеспечивается сопоставлением расчетных данных с реальными, результатами обсуждения на научно-практических конференциях, а также результатами внедрения результатов диссертационного исследования.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы обсуждались на следующих конференциях: Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2016 г. (г. Саратов, 2016); Всероссийская конференция Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. **БИОМЕДСИСТЕМЫ**

(г. Рязань 2016, 2017, 2019); Международная конференция 20th Conference of Open Innovations Association (FRUCT) (St. Petersburg, Russia, 2017); Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио (г. Санкт-Петербург, 2017, 2018, 2019); Международная конференция Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT) (Yekaterinburg, Russia, 2018); XIII Международный конгресс «КАРДИОСТИМ» - 2018, (г. Санкт-Петербург, 2018); Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2018 (г. Владимир-Суздаль, 2018); Международная конференция 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2020ElConRus) (г. Санкт-Петербург, 2020); Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2020 (г. Владимир-Суздаль, 2020).

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 17 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 материала докладов опубликованы в зарубежных изданиях, включенных в системы цитирования Scopus и Web Of Science, 9 публикаций в научных сборниках и трудах российских и международных конференций. Получены 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Соответствие паспорту специальности: диссертация соответствует паспорту специальности «05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения». Область исследований:

– Исследование, разработка и создание медицинской техники, изделий, инструментов, методов и способов диагностики и лечения человека, которые рассматриваются как средства восстановления нарушенной поливариантной системы, представление которой возможно математической, физико- и биотехнической, механической моделью, а также энергетической, физикохимической, химической, электрохимической моделью и т.д.

Личный вклад автора: все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично.

Структура и объем диссертации

Научная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, двух приложений и списка литературы, включающего 112 наименований. Содержание диссертационной работы изложено на 183 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научные положения, выносимые на защиту, а также описана теоретическая и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена методам диагностики физиологического состояния организма человека по ЭКГ и ЭЭГ. Проведен анализ особенностей ЭКГ при аритмиях (частой экстрасистолии и мерцательной аритмии). Приведены общие сведения о методе ЭЭГ и представлены основные ритмы с их частотными диапазонами. Приведен аналитический обзор ранее предложенных методов диагностики физиологического состояния организма человека. Анализ литературных источников показал, что основными методами исследования биосигналов являются: статистические, геометрические и нелинейные методы, автокорреляционный, спектральный и фрактальный анализ. В связи со сложнопериодическим характером изменений параметров биомедицинских сигналов для анализа ЭКГ и ЭЭГ были предложены методы нелинейной динамики.

Во второй главе проведен анализ выбранных методов нелинейной динамики для оценки хаотических свойств биосигналов. Предложен геометрический способ анализа сигналов – построение псевдофазового портрета, который является на сегодняшний день принципиально новой методикой. Нелинейная динамика сигналов анализируется путем построения ломаной линии в системе координат, где по оси абсцисс откладываются текущие значения, а по оси ординат последующие. Для оценки морфологических признаков псевдофазового портрета был выбран ряд параметров, позволяющих дифференцировать разные виды анализируемых сигналов. В работе исследуются семь параметров, описывающих особенности псевдофазового портрета: периметр, площадь, коэффициент (отношение квадрата периода к площади), длина кривой, средняя длина линий, количество скачков и количество точек в диапазоне $(0-45)^\circ$.

За «скачок» принимались те линии, у которых перепад значений от текущей точки к последующей был больше одной трети текущего значения. В качестве последнего морфологического признака выбрано количество точек фигуры, попадающих в диапазон от 0 до 45 градусов. Абсцисса координатной плоскости для определения выбранного диапазона проходила через нижнюю точку фигуры, а ордината через центр масс фигуры. Такой угловой диапазон был выбран в связи с тем, что в нерегулярных сигналах наблюдается значительный разброс точек и в эту область попадает псевдофазовый портрет тех ритмов, которые имеют более выраженную хаотическую компоненту.

Для сравнения эффективности предложенного графического метода, а также создания системы анализа биосигналов было решено оценить ряд нелинейных показателей. Отличительной особенностью представленных в работе нелинейных методов является способность прогнозировать изменения физиологического состояния человека. В работе исследовались следующие

нелинейные методы: корреляционная размерность, старший показатель Ляпунова, энтропии (аппроксимированная энтропия, энтропия Шеннона и Реньи) и фрактальный анализ (R/S-анализ, мультифрактальный детрендрованный флуктуационный анализ). Во второй главе все алгоритмы расчета были проверены на модельных сигналах: гармоническом сигнале, белом шуме, их смеси и отображении Хенона. Проведенные исследования на модельных сигналах показали возможность применения нелинейных методов для анализа биосигналов с хаотическими свойствами.

Третья глава посвящена нелинейному анализу сердечного ритма. Рассматриваются две задачи: распознавание мерцательной аритмии на фоне частой экстрасистолии и мерцательной аритмии, как на короткой, так и на длинной выборке и определение фетальной аритмии плода. Для проведения первого исследования использовались сигналы нормального ритма, частой экстрасистолии и мерцательной аритмии из баз данных: MIT-BIH Atrial Fibrillation Database, MIT-BIH Arrhythmia Database и Normal Sinus Rhythm RR Interval Database. Для каждой группы ритма было обработано по пятьдесят реализаций, представляющих собой последовательности длительностей 50 и 300 кардиоциклов. В таблице 1 представлен набор признаков, которые были выявлены на основе анализа псевдофазового портрета, а также результаты их сравнительного анализа на выборке экспериментальных данных (длина выборки $n=300$).

Таблица 1 – Результаты расчета морфологических признаков ПфП

№	Параметры ПфП	Виды сердечного ритма		
		<i>НР</i>	<i>ЧЭ</i>	<i>МА</i>
1	Периметр	58.62±19.23	627.65±229.80	846.54±272.20
2	Площадь	6.38±7.68	89.64±69.90	77.05±57.11
3	Коэффициент	1066.19±996.84	44820.42±179548.5	16886.85±20615.14
4	Длина ломаной	1188.05±424.06	6300.64±1748.41	18023.72±5188.35
5	Средняя длина линий	3.97±1.41	21.07±5.85	60.81±18.11
6	Число «скачков»	0.00±0.00	10.36±5.99	34.84±12.60
7	Количество точек в диапазоне (0-45)°	1.40±1.30	3.30±3.09	13.04±6.51

Чем больше хаотических составляющих в сигнале, что характерно для МА, тем больше разброс фазовых точек на плоскости, вследствие чего больше периметр, длина контура ПфП, средняя длина линий, число скачков и количество точек в заданном диапазоне. Информативность морфологических признаков определялась с помощью методов накопленных частот, Шеннона и Фишера. Чувствительность метода ПфП составила 94.0%, специфичность – 98.0%, общая точность – 96.7%. При уменьшении длины выборки уменьшился показатель чувствительности (90.0%) и как следствие понизилась общая точность (специфичность – 97.0%, общая точность – 95.3%), но при этом данный метод все еще остается достаточно эффективным.

Для сравнения полученных результатов предложенного геометрического метода был проведен расчет нелинейных показателей. Для оценки эффективности применения нелинейных методов, был использован дисперсионный критерий F (таблица 2).

Таблица 2 – Значения F в задаче распознавания МА: 1 – 300 RR интервалов ($\alpha=0.05$ ($k=3$, $N=150$), $F_{кр}=3.07$, $n=300$), 2 – 50 RR интервалов ($\alpha=0.05$ ($k=3$, $N=900$), $F_{кр}=2.87$, $n=50$).

№	Корреляционная размерность	Старший показатель Ляпунова	ApEn	Энтропия Шеннона	Энтропия Ренья	Показатель Херста	W
1	4.48	3.15	5.12	4.25	3.12	6.23	6.12
2	2.29	3.15	3.23	2.85	3.04	4.52	6.21

По проведенному сравнению показателей эффективности предложенных методов, на длинной и короткой выборках данных наилучшие результаты показали фрактальные методы: показатель Херста и ширина спектра.

Второй решенной задачей была задача распознавания фетальной аритмии плода. Аритмии плода могут проявляться в виде нерегулярных, неритмичных сокращений либо в изменении их частоты. Возможность применения предложенных методов в задаче распознавания фетальной аритмии была исследована с помощью базы данных Non-Invasive Fetal ECG Arrhythmia Database. Для каждой группы сигналов было обработано по пятьдесят реализаций, представляющих собой десятисекундные записи ЭКГ.

В ходе экспериментов установлено, что морфологические признаки ПфП обеспечивают высокую точность распознавания аритмии. Чувствительность метода – 96.0%, специфичность – 96.0%, общая точность – 96.0%. По результатам расчета дисперсионного критерия наиболее эффективными методами стали показатель Херста и энтропия Шеннона. Динамика изменения результатов показателя Херста при обнаружении ФА представлена на рисунке 1. Точность метода составила 97.0%.

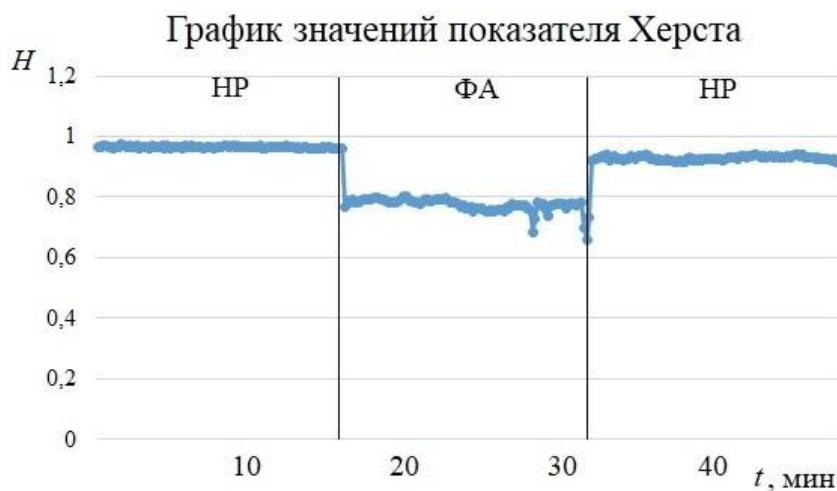


Рисунок 1 – График изменения показателя Херста

В результате проведенного исследования распознавания патологий сердца по ЭКГ можно заключить, что морфологические признаки ПФП обладают высокой точностью распознавания аритмии. Общая точность графического метода и показателя Херста имеет приблизительно одинаковое значение. Анализ двух задач показал, что графический метод обладает наибольшей специфичностью, в то время как у нелинейных показателей чувствительность выше. Это наблюдение навело мысли о возможности объединения этих методов для улучшения точности распознавания.

В четвертой главе исследованы нелинейные свойства ЭЭГ сигналов. Рассматривается три задачи: определение стадий наркоза, стадий сна и апноэ сна. Для первой задачи были использованы сигналы ЭЭГ для четырех стадий наркоза: глубокий, неглубокий (начало выхода из наркоза) и состояние до и после выхода из наркоза. Съём ЭЭГ осуществлялся по одному каналу с помощью электродов, наложенных на лоб пациента. Данные для распознавания стадий сна и апноэ сна получены из базы данных CAP Sleep. Для каждой группы сигналов выбрано по 50 реализаций. Для задачи распознавания стадий наркоза длительность сигнала – 5 секунд, частота дискретизации 250 Гц, для двух других задач – 30 секунд при 512Гц.

На первом этапе для трех задач были построены ПФП и оценены ошибки классификации (таблица 3), также в таблице представлены ошибки классификации двух нелинейных методов имеющих наибольший дисперсионный критерий в каждой конкретной задаче.

Таблица 3 – Ошибки классификации стадий наркоза

Классы	Ошибки классификации					
	α	β	α	β	α	β
Наркоз	ПФП		Энтропия Шеннона		Показатель Херста	
Бодрствование	0.00%	4.10%	0.00%	5.00%	0.20%	4.02%
Глубокий наркоз Неглубокий наркоз	22.00%	23.10%	23.00%	19.00%	22.00%	20.00%
Стадии сна	ПФП		Аппроксимированная энтропия		Энтропия Реньи	
	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%

Метод псевдофазового портрета, и энтропия Шеннона не имеют ложноположительных результатов в задаче классификации состояния наркоза от бодрствования. Процент ложноотрицательного результата приблизительно одинаков у всех методов. В случае классификации глубокого и неглубокого наркоза процент ложноположительного результата (ЛПР) у графического метода и нелинейных параметров приблизительно одинаков, а ложноотрицательный (ЛОП) больше у метода псевдофазового портрета. Наибольшим значением дисперсионного критерия обладают энтропия Шеннона и показатель Херста. На рисунке 2 представлено изменение энтропии Шеннона в зависимости от стадии наркоза.

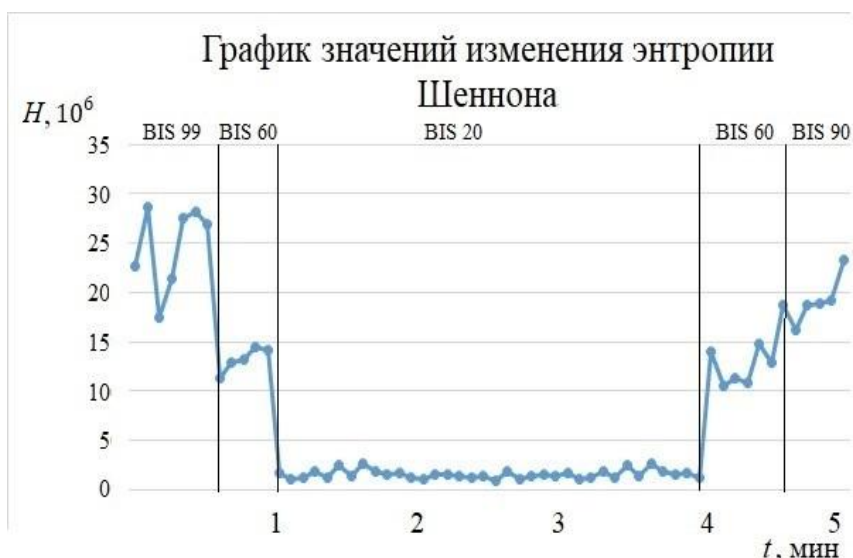


Рисунок 2 – График изменения значений энтропии Шеннона

Для задачи распознавания апноэ сна была рассчитана чувствительность и специфичность применения предложенных морфологических признаков. Чувствительность морфологических признаков ПфП составила 90.0%, специфичность – 98.0%, а точность 95.2%, что является хорошим показателем возможности применения предложенных морфологических признаков для распознавания апноэ на фоне предложенных нарушений сна. В таблице 4 представлены расчеты дисперсионного критерия. По результатам оценки наилучшими методами для распознавания являются показатель Херста и ширина спектра.

В задаче распознавания стадий сна метод ПфП не имеет ошибок на обучающей выборке данных. По результатам оценки критерия Фишера наилучшими нелинейными методами для распознавания являются аппроксимированная энтропия и энтропия Реньи. С помощью применения нелинейных методов стадии сна распознаются с наибольшей точностью, чем при ранее известных автоматических алгоритмах диагностики. Точность распознавания с помощью нелинейных методов на обучающей выборке составляет 99%.

Таблица 4 – Значения F для трех задач распознавания по ЭЭГ: 1 – распознавание стадий наркоза $\alpha=0.05$ ($k=4$, $N=100$), $F_{кр}=2.70$; 2-3 – распознавание стадий сна и апноэ сна: $\alpha=0.05$ ($k=5$, $N=250$), $F_{кр}=2.42$.

Метод	Корреляционная размерность	Старший показатель Ляпунова	ArEn	Энтропия Шеннона	Энтропия Реньи	Показатель Херста	W
1	3.59	2.88	4.24	5.24	3.05	4.75	4.56
2	3.08	6.27	6.66	2.34	6.57	2.64	5.75
3	4.25	3.15	2.25	4.62	2.89	5.28	5.15

По всем задачам наименьший ложноположительный результат имеет метод ПфП, в то время как нелинейные показатели обладают наименьшим ложноотрицательным результатом. В задаче обнаружения апноэ сна показатель специфичности наибольший у графического метода, что значительно увеличивает его общую точность. В тоже время чувствительность нелинейных показателей незначительно выше. В связи с этим на следующем этапе произведем объединение этих методов.

В главе пять приводится описание системы диагностики физиологических состояний организма. Используя полученную информацию об эффективности показателей, был произведен отбор четырех морфологических признаков ПфП и двух нелинейных показателей (таблица 7 и 8). В связи с тем, что графический метод (оценка ПфП) имеет большую специфичность, чем нелинейные параметры, а лучшие нелинейные признаки обладают большей чувствительностью, было принято решение объединить четыре наиболее информативных нелинейных признака с двумя нелинейными показателями.

Таблица 7 – Оценка эффективности предложенных методов в задачах распознавания сердечного ритма

Задача	Методы	Обучающая выборка, %			Контрольная выборка, %		
		<i>Se</i>	<i>Sp</i>	<i>Ac</i>	<i>Se</i>	<i>Sp</i>	<i>Ac</i>
I. Распознавание МА (300 RR)	Показатель Херста Ширина спектра	96.0	96.0	96.0	92.0	95.0	94.0
	Морфологические признаки	94.0	98.0	96.7	92.0	98.0	96.0
	Объединение	98.0	98.0	98.0	94.0	98.0	96.7
I. Распознавание МА (50 RR)	Показатель Херста Ширина спектра	92.0	95.0	94.0	88.0	91.0	90.0
	Морфологические признаки	90.0	97.0	94.7	90.0	95.0	93.3
	Объединение	94.0	97.0	96.0	94.0	96.0	95.3
II. Распознавание ФА	Показатель Херста Энтропия Шеннона	98.0	98.0	98.0	96.0	94.0	95.0
	Морфологические признаки	96.0	96.0	96.0	96.0	96.0	96.0
	Объединение	98.0	98.7	98.4	96.0	98.0	97.0

Таблица 8 – Оценка эффективности предложенных методов в задачах распознавания ЭЭГ

Задача	Методы	Обучающая выборка, %			Контрольная выборка, %		
III. Определение глубины наркоза	Энтропия Шеннона	Наркоз	$\alpha - 0$		$\alpha - 0$		
		Бодрствование	$\beta - 4$		$\beta - 5$		
	Показатель Херста	Глубокий наркоз	$\alpha - 24$		$\alpha - 25$		
		Неглубокий наркоз	$\beta - 23$		$\beta - 25$		
	Морф. признаки	Наркоз	$\alpha - 0$		$\alpha - 0$		
		Бодрствование	$\beta - 4$		$\beta - 5$		
		Глубокий наркоз	$\alpha - 22$		$\alpha - 25$		
		Неглубокий наркоз	$\beta - 23$		$\beta - 25$		
	Объединение	Наркоз	$\alpha - 0$		$\alpha - 0$		
		Бодрствование	$\beta - 2$		$\beta - 4$		
		Глубокий наркоз	$\alpha - 16$		$\alpha - 17$		
		Неглубокий наркоз	$\beta - 19$		$\beta - 19$		
IV. Определение стадий сна	АрЕп	$\alpha - 5$		$\alpha - 6$			
	Энтропия Реньи	$\beta - 3$		$\beta - 4$			
	Морф. признаки	$\alpha - 0$		$\alpha - 2$			
Объединение		$\beta - 0$		$\beta - 1$			
		$\alpha - 0$		$\alpha - 1$			
V. Определение апноэ сна	Показатель Херста	Se	Sp	Ac	Se	Sp	Ac
		92.0	98.0	96.8	86.0	95.5	93.6
	Ширина спектра						
Морф. признаки		90.0	98.5	96.8	90.0	96.0	94.8
	Объединение	94.0	98.5	97.6	92.0	96.0	95.2

В таблицах 7 и 8 приведены результаты расчета эффективности предложенной системы, как на экспериментальной, так и на контрольной выборке. По полученным результатам видно, что объединение графических методов и нелинейных показателей дает лучшие результаты, чем использование каждого метода по отдельности. Отмечено, что в разных задачах наилучшие методы разные, т.к. в каждой задаче своя специфика и сигналы имеют разную природу. К примеру, в задаче распознавания мерцательной аритмии наилучшими были фрактальные методы, а в задаче распознавания стадий сна энтропийные параметры. Алгоритм распознавания патологии (на примере распознавания МА) представлен на рисунке 3.

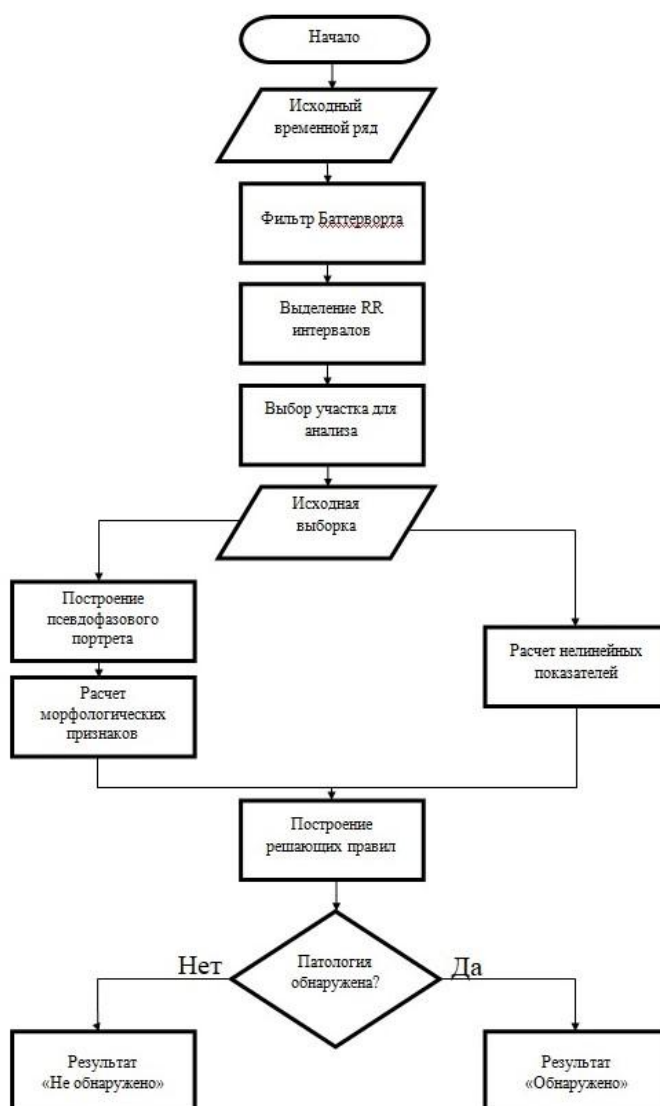


Рисунок 3 – Алгоритм проведения диагностики МА

В заключении изложены основные результаты теоретических исследований и практических разработок.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обоснован выбор методов анализа биосигналов (ЭКГ, ЭЭГ) для решения задач контроля и диагностики состояния организма.
2. Получены диагностические показатели, с помощью которых можно оценить выраженность хаотических компонент в биосигнале.
3. Выявлено новое морфологическое описание ПфП, которое позволило оценить его не только визуально, но и численно. Отмечено, что для каждой конкретной задачи выявлены свои наиболее информативные морфологические признаки.
4. Предложен подход к оценке информативности морфологических признаков аттрактора.

5. Проведено сравнение графического метода и нелинейных параметров. Показано, что данные методы имеют приблизительно равную общую точность, но при этом графический метод эффективен для скрининга состояния сердечнососудистой системы и выявления задержек дыхания во время сна. В случае мониторинга состояния организма целесообразно использовать нелинейные параметры.
6. Построены решающие правила определения патологий и состояний организма человека.
7. Разработаны программно-алгоритмические комплексы, которые позволили решить, ряд задач с высоким качеством распознавания биосигналов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации автора в журналах, рекомендованных ВАК

1. Хачатрян К.С. Метод анализа псевдофазового портрета в задаче распознавания биомедицинских сигналов [Текст]/ Хачатрян К.С., Манило Л.А.// АО «Издательство «Политехника». Биотехносфера. – 2016. – №5. – С.14-18.
2. Хачатрян К.С. Способы оценки информативности признаков при формировании морфологического описания псевдофазового портрета ритмограмм [Текст] / Хачатрян К.С., Манило Л.А. // АО «Издательство «Политехника». Биотехносфера. – 2018. – №2. – С.2-6.
3. Старченкова К.С. Показатель Хёрста в анализе ритмограмм сердечного ритма [Текст]/ К.С. Старченкова// АО «Издательство «Политехника». Биотехносфера. – 2019. – №6. – С.37-40.
4. Старченкова К.С. Распознавание стадий сна по ЭЭГ с применением методов нелинейной динамики [Текст]/ К.С. Старченкова, Л.А. Манило//АО «Издательство «Политехника». Биотехносфера. – 2019. – №6. – С.28-32.
5. Старченкова К.С. Использование старшего показателя Ляпунова для распознавания биомедицинских сигналов[Текст]/ К.С. Старченкова, Л.А. Манило//АО «ЦНИИ «Электроника». Вопросы радиоэлектроники. –2020.– №3. – С. 23-29.

Публикации в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus

6. K. Khachatryan The method of analysis pseudo-phase portrait in the problem of recognition of biomedical signals [Текст]/ K. Khachatryan, L. Manilo, A. Anisimov// 20th Conference of Open Innovations Association (FRUCT) - IEEE, 2017. - P. 146-153.
7. K. Khachatryan Estimation of informational contents of morphological features of pseudo-phase portrait of rhythmograms on the basis of cluster analysis [Текст] / K. Khachatryan, L. Manilo// 2018 Ural Symposium on

Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT) - IEEE, 2018. - P. 120-123.

8. K. Starchenkova Evaluation of the Senior Lyapunov Exponent for Different Types of Cardiac Arrhythmias [Текст] / K. Starchenkova, L. Manilo// 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2020ElConRus) - IEEE, 2020. - P. 1604-1606.

Материалы международных и всероссийских конференций

9. Хачатрян К.С. Анализ псевдофазового портрета в задаче распознавания сердечного ритма [Текст] / К.С. Хачатрян, Л.А. Манило//Сборник трудов конференции методы компьютерной диагностики в биологии и медицине. – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2016. – С. 113-115.
- 10.Хачатрян К.С. Распознавание сердечного ритма на основе анализа псевдофазового портрета [Текст] / Хачатрян К.С.//Сборник трудов конференции Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. БИОМЕДСИСТЕМЫ. – Рязань:Изд-во «Рязанский государственный радиотехнический университет», 2016. – С. 306-308.
- 11.Хачатрян К.С. Анализ морфологических признаков псевдофазового портрета для разных видов сердечного ритма[Текст] / Л.А. Манило, К.С. Хачатрян //Сборник трудов 72-й Всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню радио. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017.– С. 481-482.
- 12.Хачатрян К.С. Оценка информативности морфологических признаков псевдофазового портрета[Текст] / Хачатрян К.С.// Сборник трудов конференции Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. БИОМЕДСИСТЕМЫ. – Рязань: Изд-во «Рязанский государственный радиотехнический университет», 2017. – С. 590-593.
- 13.Хачатрян К.С. Применение метода К-средних в оценке информативности морфологических признаков псевдофазового портрета[Текст] / К.С. Хачатрян, Л.А. Манило//Сборник трудов 73-й Всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню радио. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. – С. 468-469.
- 14.Хачатрян К.С. Кластерный анализ в задаче формирования морфологического описания псевдофазового портрета ритмограмм[Текст] / К.С. Хачатрян, Л.А. Манило //Сборник материалов XIII Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2018. – Владимир-Суздаль, 2018. – Книга 1, С. 243-247
- 15.Старченкова К.С. Оценка размерности вложения аттракторов ритмограмм для разных видов сердечных аритмий[Текст] / К.С. Старченкова, Л.А. Манило // Сборник трудов 74-й Всероссийской

- научно-технической конференции, посвященной Дню радио. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. – С. 349-352.
16. Старченкова К.С. Оценка энтропии ритмограмм для разных видов сердечных аритмий [Текст] / Старченкова К.С., Манило Л.А. // Сборник трудов конференции Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. **БИОМЕДСИСТЕМЫ**. – Рязань: Изд-во «Рязанский государственный радиотехнический университет», 2019. – С. 206-209.
17. Старченкова К.С. Использование показателя Херста в анализе ЭЭГ сигналов [Текст] / Старченкова К.С., Манило Л.А. // Сборник материалов XIV Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2020. – Владимир-Суздаль, 2020 – Книга 1, С. 184-188.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

18. Хачатрян К.С. Программный комплекс для построения и расчета морфологических признаков псевдофазового портрета; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). - №2018616485 от 01.06.2018г.
19. Старченкова К.С. Программный комплекс для расчета корреляционной размерности биомедицинских сигналов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). - №2019617559 от 17.06.2019г.
20. Старченкова К.С. Программный комплекс для расчета энтропии биомедицинских сигналов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). - №2020614254 от 27.03.2020г.