

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Методы анализа variability сердечного ритма на основе данных электрокардиограмм» содержит 72 страницы текста, 1 приложение, 51 использованный источник.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВСР, ПОКАЗАТЕЛИ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ, ЭНТРОПИЙНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ.

Целью исследования является реализация математических методов анализа variability сердечного ритма на основе данных электрокардиограммы в норме и при патологии сердечно-сосудистой системы.

Основные результаты ВКР представлены ниже.

1. Изучены основные математические методы анализа variability сердечного ритма: методы временной области, частотной области, а также нелинейный анализ.
2. Разработан комплекс программ для проведения анализа ВСР на основе различных баз данных электрокардиограмм в норме и при патологии сердечно-сосудистой системы с исследовательского ресурса PhysioNet с получением показателей variability. Комплекс программ апробирован на четырех конференциях различного уровня и шести заседаниях научного семинара кафедры ВиПМ ИМиФИ СФУ.
3. Реализованы алгоритмы энтропийных методов ВСР.
4. Сформирована единая база данных методов анализа ВСР пациентов аннотированными электрокардиографическими записями пациентов с различными видами заболеваний.
5. Разработано web-приложение, которое позволяет визуализировать результаты анализа ВСР отдельного пациента, помогая в идентификации потенциальных патологий и состояний на основе графической интерпретации файла электрокардиограммы.

По результатам работы было написано две научные статьи.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Электрокардиография	9
1.1 Основные определения	9
1.2 Клиническое применение анализа ВСР	12
1.3 Выводы по главе 1	14
2 Математические методы анализа ВСР	15
2.1 Временной анализ	15
2.1.1 Статистические методы	15
2.1.2 Геометрические методы	18
2.2 Частотный анализ	21
2.2.1 Параметрические методы	22
2.2.2 Непараметрические методы	24
2.3 Нелинейный анализ	25
2.3.1 Анализ фазовых портретов	25
2.3.2 График Пуанкаре	26
2.3.3 Фрактальный анализ	28
2.4 Методы машинного обучения	29
2.4.1 Кластерный анализ	30
2.5 Выводы по главе 2	31
3 Энтروпийные методы	32
3.1 Энтропии временных рядов	32
3.1.1 Основные определения	32
3.1.2 Общий подход к оцениваю энтропии по эмпирическим дан- ным	33
3.2 Энтропийные методы анализа временных рядов	34
3.2.1 Энтропия Крутчфилда и Паккарда	34

3.2.2	Энтропия Грассбергера–Прокаччия	35
3.2.3	Энтропия Экманна-Рулла	36
3.3	Энтропии ВСП	37
3.3.1	Аппроксимированная энтропия	37
3.3.2	Выборочная энтропия	38
3.3.3	Символьная энтропия	39
3.4	Выводы по главе 3	40
4	Комплекс программ и вычислительных экспериментов	41
4.1	Материалы исследования	41
4.2	Алгоритм анализа ВСП на основе данных ЭКГ	42
4.2.1	Предварительная обработка	43
4.2.2	Построение временного ряда variability ритма	44
4.2.3	Фильтрация сигнала	44
4.2.4	Интерполяция сигнала	45
4.2.5	Результаты временного анализа	47
4.2.6	Результаты частотного анализа	49
4.2.7	Результаты нелинейного анализа	51
4.2.8	Формирование базы данных	53
4.3	Алгоритмы вычисления энтропий	53
4.3.1	Алгоритм вычисления аппроксимированной энтропии	53
4.3.2	Алгоритм вычисления символьной энтропии	54
4.4	Примеры использования базы данных	55
4.4.1	Корреляционный анализ	55
4.4.2	Кластерный анализ результатов	56
4.5	Web-приложение	57
4.6	Выводы по главе 4	58
	Заключение	60
	Список литературы	61
	Предметный указатель	67
	Приложение А	68

ВВЕДЕНИЕ

Анализ variability сердечного ритма (ВСР) на основе данных электрокардиограммы (ЭКГ) приобретает все большее значение как в медицинской диагностике, так и в научных исследованиях. ЭКГ является важнейшим инструментом для выявления и оценки различных сердечно-сосудистых патологий, предоставляя жизненно важную информацию о сердечной функции и деятельности. Неотъемлемым аспектом анализа ЭКГ является исследование ВСР, которое включает изучение колебаний временных интервалов между последовательными сердечными сокращениями. Получение информации о ВСР помогает выяснить механизмы нейрогуморальной регуляции сердца и предлагает неинвазивный, относительно простой метод оценки функциональности вегетативной нервной системы (ВНС).

Основная цель анализа ВСР состоит в том, чтобы определить и понять статистические, частотные и нелинейные свойства сигнала, генерируемого последовательностью длительностей интервалов между R-зубцами ЭКГ в течение определенного периода времени. Для достижения этой цели используются различные математические методы, начиная от традиционного анализа во временной и частотной области и заканчивая более сложными нелинейными методами. Эти методы позволяют исследователям и клиницистам извлекать ценную информацию из данных ЭКГ, помогая в разработке новых диагностических подходов, методов лечения и профилактических стратегий.

Однако практическое применение анализа ВСР сталкивается с рядом проблем, в том числе с отсутствием установленных диапазонов нормальных значений показателей variability сердечного ритма у здоровых людей и высокой индивидуальной variability результирующих параметров. Эти проблемы связаны с различными условиями записи ЭКГ, неоднородными протоколами исследования и использованием различного программного обеспечения для анализа. Несмотря на эти проблемы, существует постоянный интерес к совершенствованию и расширению доступных математических методов анализа ВСР с целью выявления новых закономерностей и надежных показателей здоровья и заболеваний сердечно-сосудистой системы.

Таким образом, анализ variability сердечного ритма на основе данных электрокардиограммы является жизненно важной областью исследований, которая имеет большой потенциал для медицинского сообщества. Изучая ЭКГ и ВСР с разных точек зрения и используя возможности передовых математических инструментов, исследователи и врачи могут продолжать углублять наше понимание сердечно-сосудистой системы и улучшать уход за пациентами.

Цели и задачи исследования. Целью исследования является реализация математических методов анализа variability сердечного ритма на основе данных электрокардиограммы в норме и при патологии сердечно-сосудистой системы.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи.

1. Изучить математические методы используемые для анализа ВСР на основе научной литературы.
2. Реализовать методы в виде алгоритмов и программ для проведения анализа ВСР на основе различных баз данных электрокардиограмм в норме и при патологии сердечно-сосудистой системы с исследовательского ресурса PhysioNet с получением показателей variability.
3. Провести анализ ВСР методами машинного обучения с использованием сформированной базы данных.
4. Разработать web-приложение для визуализации результатов анализа ВСР конкретного пациента.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования разработанного web-приложения для обработки рядов RR интервалов, получения показателей variability и визуализации анализа ВСР в учебных целях. Также в работе был проведён обзор математических методов анализа ВСР.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в работе. Научная работа проводилась совместно с студенткой «Красноярского государственного медицинского университета имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого» Гусаровой Анастасией Анатольевной. Автор лично участ-

вовал в получении всех результатов, изложенных в работе, а именно в разработке алгоритмов, составлении базы данных и разработке web-приложения для визуализации результатов.

Публикации. По тематике ВКР опубликовано две работы в соавторстве в материалах конференций, входящих в перечень рецензируемых научных изданий [47, 48].

Апробация работы. Основные положения работы и отдельные ее вопросы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и научных семинарах.

1. XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив Свободный – 2022», секция «Прикладная математика и информатика», подсекция «Математические методы анализа данных» (29.04.2022, СФУ, Красноярск, диплом III степени).
2. IV Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция студентов, аспирантов и работников образования и промышленности «Системы Управления, Информационные Технологии и Математическое Моделирование – 2022» (19.05.2022, ОмГТУ, Омск, диплом победителя).
3. The 16th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies AICT2022 (Hybrid mode, 12-14 October 2022 www.aict.info/2022). SESSION 3.1. Machine learning and other AI techniques.
4. XIX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив Свободный – 2023» в секции «Прикладная математика и информатика» подсекции «Математические методы анализа данных» (28.04.2022, СФУ, Красноярск, сертификат участника).
5. Заседаниях №14/2021, № 9/2022, № 13/2022, №14/2022, № 23/2022, № 10/2023 научного семинара кафедры высшей и прикладной математики Института математики и фундаментальной информатики Сибирского федерального университета.

Структура и объем бакалаврской работы. ВКР состоит из введения,

четырёх глав, заключения, списка литературы, одного приложения, списка таблиц, списка иллюстраций и списка условных обозначений. Общий объем ВКР составляет 72 страницы, включая приложения; иллюстративный материал представлен 19 рисунками и 9 таблицами (из них 2 в приложениях); список литературы содержит 51 наименований.

1 Электрокардиография

Данная глава посвящена основным принципам работы электрокардиограммы, а также литературному обзору различных видов задач решаемых посредством анализа ВСР.

Сердце, состоящее из проводящих и сократительных клеток, отвечает за генерацию электрических импульсов и сокращений, необходимых для правильного кровообращения. Эти процессы формируют электрическое поле, которое в свою очередь изменяется во времени в течение сердечного цикла. При этом между различными точками тела создается разность потенциалов. Электрокардиография — это метод, используемый для регистрации этих электрических потенциалов, что позволяет получить электрокардиограмму, графически отражающую деятельность работы сердца. Стандартная клиническая ЭКГ состоит из записи 12 отведений, включая отведения от конечностей, грудные отведения и усиленные отведения. Для оценки функции работы сердца и выявления аномалий при интерпретации ЭКГ используются диагностические критерии и методы ручного или компьютерного анализа. Недавние технологические достижения стимулировали разработку компьютеризированных систем, мобильных приложений и носимых устройств, обеспечивающих мониторинг в реальном времени и большую доступность для электрокардиографии. Эти достижения изменили способ проведения оценки здоровья сердца, что привело к более эффективной и точной диагностике при решении различных задач.

1.1 Основные определения

Электрическая активность сердца записывается посредством электрокардиографии, а сама электрокардиограмма представляет из себя графическое изображение состоящее из волн, сегментов и интервалов, связанных с последовательным распространением волны возбуждения по всему сердцу. Изоэлектрическая линия ЭКГ, прямая линия, представляет собой мембранные потенциалы покоя, а отклонения от этой линии обозначаются латинскими буквами P, Q, R, S и T (рисунок 1.1).

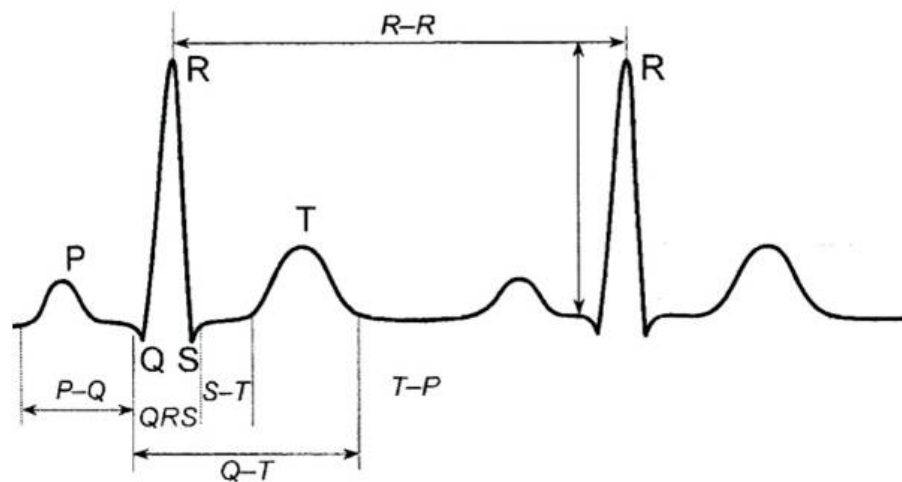


Рисунок 1.1 — Графическое изображение кривой ЭКГ [13]

Комплекс QRS является критическим элементом на ЭКГ, так как он указывает на распространение возбуждения по желудочкам. Он включает зубец Q (возбуждение межжелудочковой перегородки), зубец R (возбуждение миокарда желудочков) и зубец S (возбуждение базальных желудочков). Понимание структуры и компонентов электрокардиограммы имеет решающее значение для диагностики и отслеживания различных сердечных заболеваний и аномалий [13, 15].

Интервалы RR (иногда называемые интервалами NN (normal to normal) при рассмотрении только нормальных сокращений) представляют собой разницу во времени между последовательными зубцами R, а так же характеризуют один сердечный цикл. Зубцы R представляют собой самые высокие пики в комплексе QRS, что означает деполяризацию желудочков, то есть электрическую активацию сердечной мышцы, приводящую к сокращению, а RR интервал, в свою очередь показывает частоту сердечных сокращений. Анализом RR интервалов называется анализ вариабельности сердечного ритма (BCP), по которому можно определять наличие и развитие различных сердечно-сосудистых заболеваний [3].

Вариабельность сердечного ритма определяется как вариативность продолжительности временных интервалов между последовательными сердеч-

ными сокращениями в течение определенного периода [1, 3, 27]. Это один из лучших неинвазивных методов оценки механизмов нейрогуморальной регуляции физиологических функций организма [5, 47]. Анализ ВСР охватывает различные подходы, в том числе функционально-кибернетические, адаптивные реакции и клинические подходы, которые оценивают баланс между симпатическим и парасимпатическим отделами вегетативной нервной системы [47, 48].

Исследование ВСР включает три этапа [47, 48]: измерение длительности интервалов между R-зубцами на ЭКГ, анализ динамических рядов кардиоинтервалов с помощью математических методов и оценку результатов. На рисунке 1.2 представлено графическое изображение динамического ряда кардиоинтервалов называют кардиоинтервалограммой (КИГ) [1]. По оси ординат отложены различающие значения длительности интервалов RR в секундах или миллисекундах, а по оси абсцисс указано фактическое время регистрации в часах, минутах и секундах или их соответствующие порядковые номера. Запись ЭКГ может быть краткосрочной (5 минут) или долгосрочной (24 часа) в зависимости от целей последующего анализа [2, 16]. Для анализа ВСР используются различные математические методы, которые подразделяются на три основные категории: во временной области, в частотной области и методы нелинейного анализа [1, 16, 26, 27]. Эти методы позволяют получить количественные показатели активности симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы, которые в конечном итоге могут служить маркерами или предикторами конкретных заболеваний [12, 26].

Понимание и анализ ВСР имеет решающее значение для мониторинга уровня стресса, оценки общего состояния сердечно-сосудистой системы и выявления потенциальных отклонений. Являясь отражением такой сложной системы как сердце, анализ ВСР широко используется в клинических условиях, исследованиях и спортивной науке для самых разных целей, демонстрируя многогранную ценность этого метода в оценке и поддержании оптимального здоровья [4].

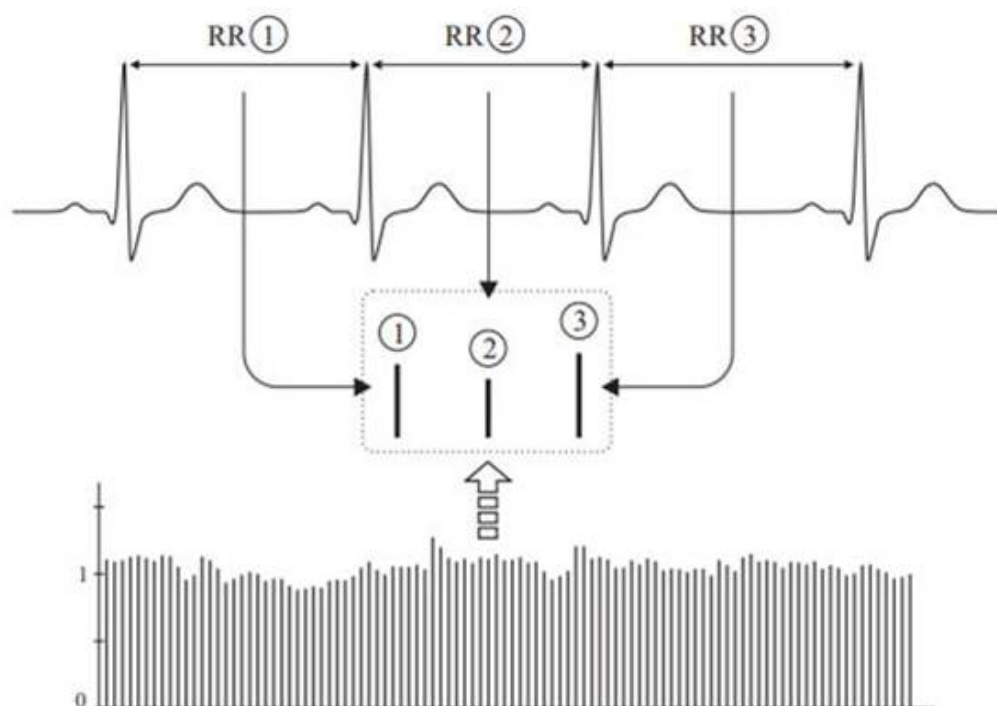


Рисунок 1.2 — Формирование кардиоинтервалограммы по электрокардиограмме. Стрелками отмечены последовательные элементы КИГ, соответствующие интервалам между R зубцами ЭКГ [5]

1.2 Клиническое применение анализа ВСР

Анализ ВСР в клинической практике получило признание как мощный инструмент для оценки функционального состояния и возможных изменений регуляторных механизмов организма. Результаты анализа ВСР могут служить маркерами и предикатами для некоторых сердечно-сосудистых заболеваний, а также для изучения роли вегетативной нервной системы (ВНС) в развитии аритмии и связанных с ней электрофизиологических процессов.

В наше время растет актуальность в изучения методов нелинейного анализа ВСР, поскольку они учитывают нелинейную сущность структур ритма, возникающих в результате взаимодействия различных регуляторов деятельности сердца [3]. Исследования показывают, что стандартный синусовый ритм колебаний интервала RR воплощает хаотические изменения, которые можно исследовать с помощью нелинейных методов. Патологические состояния и внешние воздействия, такие как физический и эмоциональный стресс,

могут привести к «упрощенной» структуре сердечного ритма с измененными динамическими характеристиками. Это побудило к расчету конкретных нелинейных количественных параметров, которые передают жизненно важную информацию о сложности поведения сердечного ритма, позволяя различать здоровые и патологические состояния.

Кроме того, методы анализа ВСР нашли применение при несердечно-сосудистых патологиях, таких как инсульт, эпилепсия, хронические мигрени, клиническая депрессия и синдром обструктивного апноэ во сне [22, 25, 33]. Также исследуется потенциальное улучшение диагностики за счет комбинации показателей ВСР и других критериев. Несмотря на потенциальные преимущества нелинейных методов исследования, их широкое применение в клинических условиях остается ограниченным, что подчеркивает необходимость дальнейшего изучения и понимания их практического применения.

При широком применении анализа ВСР сохраняется несколько проблем и ограничений. Прежде всего, это отсутствие нормальных значений для групп здорового населения, что затрудняет сопоставимость результатов анализа ВСР в разных исследованиях и затрудняет установление референтных значений параметров [5, 37, 39]. Способствующие факторы, включая генетику, пол, возраст, образ жизни и условия записи ЭКГ (такие как частота дискретизации, продолжительность записи, положение тела, отдых/упражнения, бодрствование/сон, частота, глубина и ритм дыхания), психические и физические состояния, все они оказывают влияние на измерения ВСР, что приводит к высокой индивидуальной вариабельности [37, 39]. Кроме того, расхождения в методологиях исследований между программными системами, разработанными для анализа ВСР, еще больше усложняют сравнение результатов исследований [35]. Эта проблема усугубляется включением условно здоровых контрольных групп по конкретным заболеваниям, а не действительно здоровых субъектов.

Учитывая эти ограничения и нехватку всесторонних исследований с участием здоровых участников, результаты анализа ВСР, полученные в результате различных исследований, трудно сравнивать, что делает референтные

значения параметров в стандартах [14, 27] в основном рекомендательными по своему характеру. Клинические выводы не могут быть сделаны только на основании этих параметров. Таким образом, для исследователей по-прежнему крайне важно учитывать смягчающие факторы, такие как продолжительность записи ЭКГ, одинаковое время суток и положение тела испытуемого при сравнении показателей ВСП [39].

В заключение, успехи в методах нелинейной динамики для анализа ВСП укрепили понимание сложных взаимодействий ритмических структур. Хотя в настоящее время существуют проблемы и ограничения, текущие исследования методов анализа ВСП имеют решающее значение для расширения диагностических возможностей и расширения знаний в этой области. Изучая практическое применение этих методов, медицинские работники и исследователи могут лучше понять и контролировать вариабельность сердечного ритма, способствуя улучшению ухода за пациентами с различными сердечно-сосудистыми и несердечно-сосудистыми патологиями [3, 23, 29].

1.3 Выводы по главе 1

Анализ ВСП с помощью данных электрокардиограммы необходим для выявления и оценки сердечно-сосудистых патологий. Использование различных математических методов, позволяет получить ценную информацию о деятельности вегетативной нервной системы и механизмах нейрогуморальной регуляции. Дальнейшие достижения в области анализа ВСП обладают значительным потенциалом для улучшения медицинской диагностики, лечения и стратегий профилактики, связанных со здоровьем сердечно-сосудистой системы.

4.5 Web-приложение

В данной работе одной из задач была разработка web-приложения для визуализации результатов анализа ВСР для отдельных пациентов с использованием представленных математических методов описанных в предыдущих главах. Приложение реализовано с использованием программного пакета Shiny, реализованного в Rstudio [38].

Приложение состоит из четырех разделов или вкладок, каждая из которых соответствует определенному этапу анализа. Вкладка «Пациент» содержит информацию о пациенте (таблица «Данные пациента»), графики исходных временных рядов мгновенных значений ЧСС и интервалов RR , а также график Пуанкаре для выявления наличия артефактов на ЭКГ. При выявлении нарушений ритма специалист может определить дальнейшую тактику лечения.

Вкладка «Фильтрация» предназначена для визуализации временных рядов после удаления артефактов, что обеспечивает достаточное редактирование ритмограммы для дальнейшего изучения variability.

На вкладке «Временной анализ» отображаются результаты статистического и геометрического анализов в виде таблицы рассчитанных показателей, гистограммы распределения интервалов NN и диаграммы длительностей интервалов NN для визуального представления стандартных статистических показателей (рисунок 4.14).

Вкладка «Частотный анализ» содержит таблицу рассчитанных параметров частотного анализа, спектрограмму для графического представления частотного спектра и график изменения составляющих спектра мощности во времени — это позволяет отслеживать динамику отделов ВНС.

На вкладке «Нелинейный анализ» представлены рассчитанные нелинейные показатели, выбранные для анализа, фазовый портрет сердечного ритма, дополнительный график Пуанкаре для определения его количественных характеристик ($SD1$, $SD2$ и отношение $SD1/SD2$), а также его отфильтрованная форма и график функции флуктуаций, полученный в ходе анализа флуктуаций относительно тренда.

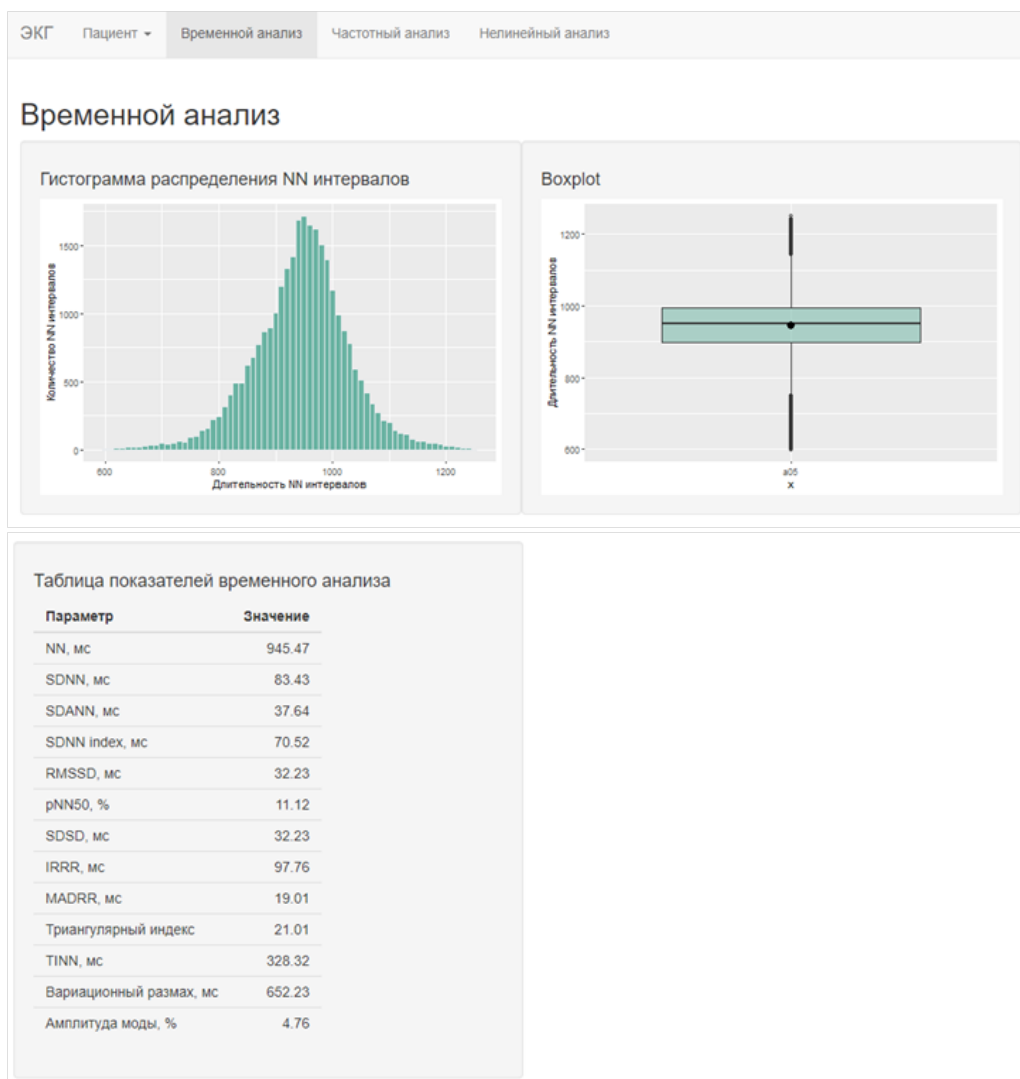


Рисунок 4.14 — Вкладка приложения «Временной анализ»

4.6 Выводы по главе 4

В данной главе была рассмотрена реализация двух алгоритмов относящихся к нелинейному анализу (алгоритмы 4.1,4.2) для вычисления аппроксимированной и символьной энтропии. Выполнен анализ временной сложности разработанных алгоритмов. Алгоритмы программно реализованы в модуле проблемно-ориентированного программного комплекса RStudio. На основе реализованных алгоритмов были вычислены значения энтропий для каждого пациента.

Помимо этого, был описан алгоритм предварительной обработки ЭКГ и с последующей математической обработкой временных рядов ВСП, которая обеспечивает информативное представление о различных регуляторных си-

стемах организма.

Отдельный акцент в данной главе ставится на формирование единой базы данных и ее анализе с помощью метасоматических методов описанных в второй главе. Подведением итога данной главы было представление разработанного web-приложения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты ВКР представлены ниже.

1. Изучены основные математические методы анализа variability сердечного ритма: методы временной области, частотной области, а также нелинейный анализ.
2. Разработан комплекс программ для проведения анализа ВСР на основе различных баз данных электрокардиограмм в норме и при патологии сердечно-сосудистой системы с исследовательского ресурса PhysioNet с получением показателей variability. Комплекс программ апробирован на четырех конференциях различного уровня и шести заседаниях научного семинара кафедры высшей и прикладной математики Института математики и фундаментальной информатики Сибирского федерального университета.
3. Реализованы алгоритмы энтропийных методов ВСР (алгоритмы 4.1,4.2).
4. Сформирована единая база данных методов анализа ВСР пациентов аннотированными электрокардиографическими записями пациентов с различными видами заболеваний.
5. Разработано web-приложение, которое позволяет визуализировать результаты анализа ВСР отдельного пациента, помогая в идентификации потенциальных патологий и состояний на основе графической интерпретации файла электрокардиограммы.

По результатам работы было написано две научные статьи [47, 48].

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баевский Р. М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) / Р. М. Баевский, Г. Г. Иванов, Л. В. Чирейкин [и др.] // Вестник аритмологии. — 2001. — №4. — С. 65–87.
2. Анализ ЭКГ [Электронный ресурс] // Научная библиотека лаборатории электрофизиологии НЦИЛС. — 2022. — Режим доступа: <https://cmi.to/анализ-экг/> (дата обращения: 20.05.2023).
3. Практические аспекты современных методов анализа variability сердечного ритма / А. В. Ардашев, А. Ю. Лоскутов. — Москва : ИД «МЕДПРАКТИКА-М», 2010. — 127 с.
4. Анализ variability сердечного ритма: физиологические основы и основные методы проведения / Р. М. Баевский, А. Черникова. — DOI 10.12710/cardiometry.2017.6676 // *Cardiometry*. — 2017. — №10. — С. 66–76.
5. Практическая кардиоритмография / Е. А. Берёзный, А. М. Рубин, Г. А. Утехина. — 3-е изд., перераб. и доп. — Научно-производственное предприятие «Нео», 2005. — 140 с.
6. Variability сердечного ритма: методы измерения, интерпретация, клиническое использование / Л. А. Бокерия, О. Л. Бокерия, И. В. Волковская // *Анналы аритмологии*. — 2009. — №4. — С. 21–32.
7. Атриовентрикулярная узловая реципрокная тахикардия: классификация, клинические проявления, диагностика и лечение / Е. Г. Желяков, А. А. Шаваров, А. В. Ардашев // *Суправентрикулярные нарушения ритма сердца*. — 2009. — С. 742–796.
8. Изучение зависимостей между показателями вариационной пульсометрии, энтропии ритма сердца, временного и спектрального анализов variability ритма сердца в норме и при ишемической болезни сердца / Н. Ю. Дурнова, Я. П. Довгалецкий, А. Н. Бурлака [и др.] // *Саратовский научно-медицинский журнал*. — 2011. — № 3. — С. 607–611.
9. Использование гребневой регрессии для оценки степени тяжести острого панкреатита / Д. В. Черданцев, А. В. Строев, Е. С. Мангалова [и др.] // *Вестник аритмологии*. — 2011. — № 4. — С. 105–110.

- др.] // Бюллетень сибирской медицины. — DOI 10.20538/1682-0363-2019-3-107–115 // Бюллетень сибирской медицины. — 2019. — Т. 18, №3. — С. 107–115.
10. Биофизика сердца. Методы обработки и анализа электрокардиографической информации при донозологических исследованиях : учебное пособие / А. А. Кузнецов. — Владимир : ВлГУ, 2012. — 237 с.
 11. Сравнение методов Ридж-регрессии и LASSO в задачах обработки данных / Л. Э. Мелкумова, С. Я. Шатских // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017) : сборник трудов III международной конференции и молодежной школы. — Самара, 2017. — С. 1748–1755.
 12. Вариабельность ритма сердца. Опыт практического применения метода / В. М. Михайлов. — Иваново, 2000. — 200 с.
 13. Физиология сердечно-сосудистой системы / Д. Морман, Л. Хеллер. — Санкт-Петербург : Питер, 2000. — 256 с.
 14. Национальные Российские Рекомендации по применению методики холтеровского мониторирования в клинической практике. Российский Национальный Конгресс Кардиологов / Л. М. Макаров, В. Н. Комолятова, О. О. Куприянова [и др.] // Российский кардиологический журнал. — 2014. — Т. 2, № 106. — С. 6–71.
 15. Основы электрокардиографии. Нормальная электрокардиография / Е. А. Нестерова // Кардиология: Новости. Мнения. Обучение. — 2016. — № 2. — С. 77–85.
 16. Математические методы оценки вариабельности сердечного ритма (обзор) / А. М. Носовский, С. В. Поздняков, Е. В. Каминская // Norwegian Journal of development of the International Science. — 2018. — №16. — С. 22–39.
 17. Оценка качества в задаче кластеризации [Электронный ресурс]. — 2022. — Режим доступа: <http://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title>.
 18. Нелинейный анализ вариабельности ритма сердца: прогностические возможности метода у пациентов с хронической сердечной недостаточностью ишемической этиологии / Н. Ф. Побиванцева // Журнал Гродненско-

- го государственного медицинского университета. — 2013. — Т. 4, №44. — С. 37–41.
19. Методические аспекты анализа временных и спектральных показателей variability сердечного ритма (обзор литературы) / Г. Н. Ходырев, С. В. Хлыбова, В. И. Циркин // Вятский медицинский вестник. — 2011. — №3-4. — С. 60–70.
 20. Шитиков В. К. Классификация, регрессия, алгоритмы Data Mining с использованием R / В. К. Шитиков, С. Э. Мастицкий // [Электронный ресурс]. — 2022. — Режим доступа: <https://github.com/ranalytics/data-mining>.
 21. Advances in heart rate variability signal analysis: joint position statement by the e-Cardiology ESC Working Group and the European Heart Rhythm Association co-endorsed by the Asia Pacific Heart Rhythm Society / R. Sassi, S. Cerutti, F. Lombardi [et al.]. — DOI 10.1093/europace/euv015 // Europace. — 2015. — Vol. 17, №9. — P. 1341–1353.
 22. A Review of Heart Rate Variability and its Applications / H. ChuDuc, K. NguyenPhan, D. NguyenViet. — DOI 10.1016/j.apcbee.2013.08.016 // APCBEE Procedia. — 2013. — Vol. 7. — P. 80–85.
 23. Nonlinear Analysis of Heart Rate Variability: A Comprehensive Review / M. F. de Godoy. — DOI 10.17554/j.issn.2309-6861.2016.03.101-4 // Journal of Cardiology and Therapy. — 2016. — Vol. 3, №3. — P. 528–533.
 24. Heart rate variability analysis with the R package RHRV / C. A. Martínez, A. O. Quintana, X. A. Vila [et al.]. — DOI 10.1007/978-3-319-65355-6 // Springer International Publishing. — 2017. — P. 173.
 25. Heart Rate Variability as Indicator of Clinical State in Depression / R. Hartmann, F. M. Schmidt, C. Sander [et al.]. — DOI 10.3389/fpsy.2018.00735 // Frontiers in Psychiatry. — 2019. — Vol. 9. — P. 1–8.
 26. Heart Rate Variability in Psychology: A Review of HRV Indices and an Analysis Tutorial / T. Pham, Z. J. Lau, S. H. Annabel Chen [et al.]. — DOI 10.3390/s21123998 // Sensors. — 2021. — Vol. 21, №12. — P. 3998.

27. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task force of the European society of cardiology and the North American society of pacing and electrophysiology. // *Circulation*. — 1996. — Vol. 93, № 5. — P. 1043–1065.
28. Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging / A. L. Goldberger, L. A. N. Amaral, Je. M. Hausdorff [et al.]. — DOI 10.1073/PNAS.012579499 // *PNAS*. — 2002. — № 99. — P. 2466–2472.
29. Non-linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractals, and complexity at the bedside / A. L. Goldberger. — DOI 10.1016/s0140-6736(96)90948-4 // *Lancet*. — 1996. — № 347. — P. 131.
30. LightWAVE: Waveform and Annotation Viewing and Editing in a Web Browser [Электронный ресурс]. — 2022. — Режим доступа: <https://physionet.org/lightwave/>
31. Voss A., Schulz S., Schroeder R. et al. Methods derived from nonlinear dynamics for analysing heart rate variability / A. Voss, S. Schulz, R. Schroeder // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. — 2009. — Vol. 367. — P. 277–296.
32. Mirvis D. M., Goldberger A. L. Electrocardiography / D. M. Mirvis, A. L. Goldberger // *Heart Disease. A textbook of cardiovascular medicine*. — 2018. — P. 126–165.
33. Shao S., Wang T., Song Ch. et al. Obstructive Sleep Apnea Recognition Based on Multi-Bands Spectral Entropy Analysis of Short-Time Heart Rate Variability / S. Shao, T. Wang, Ch. Song // *Entropy*. — 2019. — Vol. 21, №8. — P. 812.
34. Goldberger A., Amaral L., Glass L. et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource for complex physiologic signals / A. Goldberger, L. Amaral, L. Glass // *Circulation*. — 2000. — Vol. 101, №23. — P. 215–220.
35. Bauer A. Reference Values of Heart Rate Variability / A. Bauer, A. J. Camm, S. Cerutti // *Heart Rhythm*. — 2017. — Vol. 14, №2. — P. 302–303.

36. Richman J. S. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy / J. S. Richman, J. R. Moorman // American journal of physiology – Heart and circulatory physiology. — 2000. — Vol. 278, №6. — P. 2039–2049. DOI 10.1152/ajpheart.2000.278.6.H2039
37. Shaffer F. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms / F. Shaffer, J. P. Ginsberg // Frontiers in Public Health. — 2017. — Vol. 5. — P. 1–17. DOI 10.3389/fpubh.2017.00258
38. Shiny [Электронный ресурс]. — 2022. — URL: <https://shiny.rstudio.com/> (дата обращения 20.05.2023).
39. Vila X. A. Evidence Based Recommendations for Designing Heart Rate / X. A. Vila, M. J. Lado, P. Cuesta-Morales // Journal of Medical Systems. — 2019. — 43(10). — P. 311. DOI 10.1007/s10916-019-1437-8
40. Кубланов В.С. Анализ биомедицинских сигналов в среде MATLAB : учебное пособие / В. С. Кубланов, В. И. Борисов, А. Ю. Долганов // Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 120 с.
41. Цветков О. В. Энтропийный анализ данных в физике, биологии и технике / О. В. Цветков // СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. — 202 с.
42. Pandian P., Srinivasa M G. Application of Entropy Techniques in Analyzing Heart Rate Variability using ECG Signals / P. Pandian, M. G. Srinivasa // International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. — 2019. — Vol. 7. — P. 9–16. DOI 10.17762/ijritcc.v7i1.5219.
43. Манило Л. А., Зозуля Е. П. Автоматическое распознавание мерцательной аритмии с использованием оценок аппроксимированной энтропии / Л. А. Манило, Е. П. Зозуля // Информационно-управляющие системы. — 2006. — №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskoe-raspoznvanie-mertsatelnoy-aritmii-s-ispolzovaniem-otsenok-approksimirovannoy-entropii> (дата обращения: 11.06.2023).
44. CH.RenuMadhav, A.G.Ananth. Quantification of Heart Rate Variability (HRV) Data using Symbolic Entropy to Distinguish between Healthy and Disease Subjects / CH. RenuMadhav, A. G. Ananth.

45. Hornero R. et al. Interpretation of approximate entropy: analysis of intracranial pressure approximate entropy during acute intracranial hypertension / R. Hornero // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 2005. — Vol. 52. — P. 1671–1680.
46. Чумак О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных / О. В. Чумак // Москва–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. — 164 с.
47. Gusarova A. A., Semenova D. V., Chernov G. N., Goldenok E. E., Lukyanova N. A., Mishina N. V. Analysis of Normal and Pathological Heart Rate Variability Based on Electrocardiogram Data / A. A. Gusarova, D. V. Semenova, G. N. Chernov, E. E. Goldenok, N. A. Lukyanova, N. V. Mishina // 2022 IEEE 16th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Washington DC, DC, USA, 2022. — pp. 1-4. doi: 10.1109/AICT55583.2022.10013602.
48. Гусарова А. А., Семенова Д. В., Чернов Г. Н. Анализ вариабельности сердечного ритма математическими методами на основе данных электрокардиограммы в норме и при патологии : доклад, тезисы доклада [доклад, тезисы доклада, статья из сборника материалов конференций] / А. А. Гусарова, Д. В. Семенова, Г. Н. Чернов, отв. редактор В. Н. Задорожный.— 2022, Системы управления, информационные технологии и математическое моделирование.
49. Normal Sinus Rhythm RR Interval Database. — URL: <https://physionet.org/content/nsr2db/1.0.0/> (дата обращения: 26.06.2023).
50. Congestive Heart Failure RR Interval Database. — URL: <https://physionet.org/content/chf2db/1.0.0/> (дата обращения: 26.06.2023).
51. MIT-BIH Long-Term ECG Database. — URL: <https://physionet.org/content/ltldb/1.0.0/> (дата обращения: 26.06.2023).

Предметный указатель

- AIC* — информационный критерий
Акаике, 23
- ApEn* — аппроксимированная энтропия, 37
- KS* — энтропия Колмогорова – Синая, 33
- SampeEn* — выборочная энтропия, 38
- SyEn* — символьная энтропия, 39
- RHRV — R Heart Rate Variability, 42
- ВНС — вегетативная нервная система, 5
- BCP — вариабельность сердечного ритма, 5
- ЖЭ — желудочковая экстрасистолия, 41
- КИГ — кардиоритмограмма, 12
- НСР — нормальный синусовый ритм, 41
- ХСН — хроническая сердечная недостаточность, 41
- ЧСС — частота сердечных сокращений, 43
- ЭКГ —электрокардиограмма, 5

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 — Результаты проведенного анализа ВСР для групп нормального синусового ритма и желудочковой экстрасистолии

Параметр	Группа	
	Нормальный синусовый ритм	Желудочковая экстрасистолия
Временной анализ		
NN, мс	780,40 (735,50; 825,00)	820,7 (781,50; 946,10)
SDNN, мс	135,68 (117,69; 154,34)	78,27 (58,08; 104,12)
SDANN, мс	128,10 (111,38; 146,10)	71,27 (41,95; 91,76)
SDNN index, мс	45,94 (39,01; 57,31)	36,56 (22,74; 55,10)
RMSSD, мс	24,08 (19,15; 30,27)	24,68 (13,39; 37,27)
pNN50, %	3,57 (1,82; 8,55)	4,79 (1,26; 12,84)
SDSD, мс	24,08 (19,15; 30,27)	24,68 (13,39; 37,27)
IRRR, мс	200,30 ± 49,75	100,40 (68,92; 128,72)
MADRR, мс	11,97 (10,78; 15,47)	11,40 (6,43; 17,62)
HRV index	35,93 (29,24; 39,14)	21,07 (15,75; 26,94)
TINN, мс	561,40 (456,90; 611,60)	329,20 (246,10; 420,90)
MxDMn, мс	803,10 ± 163,10	483,00 (432,00; 663,00)
AMo, %	2,78 (2,56; 3,42)	4,81 (3,74; 6,42)
Частотный анализ		
TPav, мс ²	970,60 (771,00; 1483,10)	569,40 (268,30; 1599,00)
HFav, мс ²	60,77 (31,28; 116,08)	58,70 (18,11; 138,99)
LFav, мс ²	218,68 (88,42; 371,21)	152,92 (39,96; 286,59)
VLFav, мс ²	195,68 (130,83; 249,18)	99,51 (36,92; 200,64)
ULFav, мс ²	561,4 (401,10; 782,70)	241,28 (154,87; 965,21)
(LF/HF)av	3,60 (2,14; 4,90)	1,84 (1,67; 2,25)
Нелинейный анализ		
Показатель Ляпунова	0,029 (0,011; 0,060)	0,020 (0,001; 0,031)
ApEn	1.178876 ± 0.4267289	1.14494 ± 1.020659
SyEn	0.9569239 ± 0.4395041	1.168626 ± 0.4395041
SampEn	0,026 (0,012; 0,040)	0,018 (0,007; 0,031)
SD1	17,03 (13,54; 21,40)	17,45 (9,47; 26,36)
SD2	191,20 (165,70; 217,80)	109,82 (80,25; 145,13)
SD1/SD2	0,09 (0,07; 0,11)	0,15 (0,12; 0,19)
DFA α_1	1,30 (1,23; 1,37)	1,16 (1,12; 1,21)
DFA α_2	1,09 ± 0,09	1,10 (1,03; 1,16)

Таблица А.2 — Результаты проведенного анализа ВСР для групп хронической сердечной недостаточности I, II, III классов

Параметр	Группа		
	ХСН I	ХСН II	ХСН III
Временной анализ			
NN, мс	760,10 (731,60; 803,2)	632,10 ± 69,90	696,20 ± 86,57
SDNN, мс	152,30 (137,80; 162,60)	59,66 ± 23,18	58,06 ± 28,13
SDANN, мс	139,35 (120,59; 159,73)	52,95 ± 19,66	49,81 ± 25,35
SDNN index, мс	52,57 (43,47; 61,20)	19,94 (13,96; 27,69)	25,75 ± 12,45
RMSSD, мс	31,98 (25,11; 36,12)	14,37 ± 7,29	16,63 ± 6,59
pNN50, %	8,77 (6,57; 9,83)	0,50 (0,07; 1,51)	1,73 (0,45; 3,46)
SDSD, мс	31,98 (25,11; 36,12)	14,37 ± 7,29	16,63 ± 6,59
IRRR, мс	205,50 (180,20; 234,10)	79,30 ± 34,08	79,16 ± 45,41
MADRR, мс	14,24 (12,53; 14,91)	7,38 ± 3,03	6,98 (6,21; 9,27)
HRV index	33,20 (29,51; 37,87)	15,91 ± 8,13	14,35 (10,57; 22,82)
TINN, мс	518,80 (461,20; 591,80)	248,60 ± 126,97	224,19 (165,19; 356,56)
MxDMn, мс	813,40 (728,70; 851,90)	430,20 ± 191,70	419,80 ± 170,40
АМО, %	3,03 (2,66; 3,41)	7,69 ± 3,47	6,97 (4,38; 9,46)
Частотный анализ			
TPav, мс ²	1279,50 (926,20; 1747,80)	184,18 (92,25; 371,20)	278,06 (152,24; 482,90)
HFav, мс ²	106,99 (73,28; 137,86)	8,41 (4,99; 18,55)	20,52 (6,80; 50,58)
LFav, мс ²	177,22 (80,85; 356,73)	15,83 (5,32; 30,38)	21,26 (10,33; 60,80)
VLFav, мс ²	236,54 (118,23; 437,70)	34,62 (11,03; 157,63)	30,55 (21,55; 74,49)
ULFav, мс ²	736,30 (641,00; 785,60)	101,01 (62,79; 184,97)	170,61 (78,37; 268,95)
(LF/HF) _{av}	2,48 (1,87; 2,97)	2,10 ± 1,34	1,45 (1,00; 1,70)
Нелинейный анализ			
Показатель Ляпунова	-0,001 (-0,017; 0,019)	0,002 ± 0,022	0,025 (-0,002; 0,046)
ApEn	0.7792425 ± 0.2003503	1.707972 ± 0.6760766	1.400783 ± 0.576534
SyEn	0.837243 ± 0.1947286	1.249719 ± 0.5548645	1.550884 ± 0.580259
SampEn	0,031 (0,021; 0,049)	0,003 (0,0007; 0,0079)	0,004 (0,0001; 0,0143)
SD1	22,61 (17,76; 25,54)	10,16 ± 5,16	11,76 ± 4,66
SD2	214,10 (193,70; 228,90)	83,68 ± 32,59	81,19 ± 39,67
SD1/SD2	0,10 (0,09; 0,11)	0,13 ± 0,05	0,16 ± 0,05
DFA α ₁	1,26 (1,23; 1,28)	1,28 (0,84; 1,32)	1,05 ± 0,22
DFA α ₂	1,11 (1,01; 1,21)	1,15 ± 0,13	1,15 ± 0,15


Министерство науки и высшего образования РФ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт математики и фундаментальной информатики
Кафедра высшей и прикладной математики

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

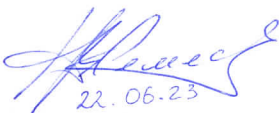
 / С.Г. Мысливец

«22» июня 2023 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Направление 01.03.02 Прикладная математика и информатика

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВАРИАбельНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ

Руководитель  22.06.23 доцент, кандидат физико- Д.В. Семенова
математических наук

Выпускник  22.06.23 Г.Н. Чернов

Нормоконтролер  22.06.23 Т.Н. Шипина

Красноярск 2023