

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Маркова Никиты Сергеевича

«Модели машинного обучения для автоматизированного анализа интервалограмм ритма сердца в диагностике аритмии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Актуальность темы исследования.

Диссертационная работа Маркова Никиты Сергеевича посвящена исследованию временных последовательностей между сердечными сокращениями, и сосредоточена на разработке информационных моделей для диагностики фибрилляции предсердий по интервалограммам ритма сердца. Разрабатываемые модели обработки интервалограмм направлены в три русла: детекцию пароксизмов фибрилляции предсердий, изучение взаимосвязей между пароксизмами аритмии и нормальным синусовым ритмом, а также идентификацию пациентов с недиагностированной «молчащей» аритмией по нормальному ритму.

Востребованность данного исследования не подлежит сомнению. Фибрилляция предсердий является одним из наиболее распространенных заболеваний сердца, требующее раннего обнаружения для благоприятного исхода лечения. Данная тематика особенно актуальна для развитых стран – в том числе России – где растущая доля пожилого населения ведёт к росту распространенности аритмии. Развиваемые в работе методы и предлагаемые модели позволяют обнаруживать относящиеся к аритмии нерегулярности в интервалограммах пациентов, и заявляют специфические особенности структуры сердечного ритма, связанные с сопутствующим заболеванием. Наибольший интерес представляет предлагаемый математический подход к детекции пароксизмов фибрилляции предсердий, требующий малого числа наблюдаемых примеров интервалограмм, что открывает возможность создания персонализированных и географо-ориентированных классификаторов ритмов.

В силу вышеизложенного, актуальность темы диссертационной работы Маркова Н.С. не вызывает сомнений.

Краткое содержание диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Введение содержит обоснование актуальности работы, определение цели и задач, описание научной новизны с теоретической и практической значимостью, формулировку положений, выносимых на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов исследования.

Первая глава посвящена обзору литературы. В ней приводится информация из медицинской предметной области, определяется интервалограмма как анализируемая временная последовательность, ставятся ключевые задачи анализа интервалограмм в контексте фибрилляции предсердий. Проводится сравнительный анализ существующих моделей детекции аритмии, представляется метод классификации сжатием с освещением его теоретической базы на основе Колмогоровской сложности. Излагаются математические основы анализа variability ритма сердца с помощью интервалограмм. В завершении главы даётся обзор моделей прогнозирования фибрилляции предсердий.

Во второй главе формулируется модель детекции пароксизмов фибрилляции предсердий, опирающаяся на использование сжатия данных и численного дифференцирования интервалограмм. Одним из ключевых элементов является введение $\Delta 5RR$ -представления интервалограммы, построенного по пятиточечной схеме конечных разностей. Такой подход позволяет модели более чутко реагировать на флуктуации сердечного ритма, демонстрируя статистически подтверждаемое улучшение качества классификации по сравнению со стандартным ΔRR подходом. Глава также включает проведение вычислительных экспериментов по оценке качества классификации предложенной моделью в рамках двух сценариев: при использовании достаточных и ограниченных объемов обучающих данных. Согласно приведенным результатам, на полной базе данных суточных электрокардиограмм модель достигает качества классификации, сравнимого с методами детекции фибрилляции предсердий, опубликованными в литературе. Наиболее примечательным результатом является то, что разработанная модель позволяет достоверно классифицировать большие тестовые выборки используя лишь 10-20 наблюдаемых классов двух ритмов, демонстрируя высокое качество детекции пароксизмов аритмии в условиях малого количества проб.

Третья глава посвящена построению регрессионных моделей, позволяющих оценить значения индексов variability ритма сердца, рассчитанным непосредственно на пароксизмах аритмии, по параметрам variability нормального ритма пациентов. Для этого на электрокардиограммах выборки из записей суточного мониторинга ЭКГ рассчитываются 96 математических индексов variability ритма (по 48 индексов для обоих ритмов), и регрессионные модели наименьших квадратов строятся с последовательным отбором наиболее значимых признаков. Ключевым результатом главы являются выделенные с помощью моделей статистические взаимосвязи, указывающие на структурные зависимости между нормальным ритмом и пароксизмами аритмии, вопреки классическим представлениям о хаотичности интервалограммы фибрилляции предсердий.

Четвертая глава опирается на результаты предыдущей главы — в ней строятся нейросетевые модели предсказания наличия фибрилляции предсердий у пациента по интервалограммам нормального синусового ритма. Модели строятся путём обучения сверточных и сверточно-рекуррентных нейронных сетей. Важным результатом главы является демонстрируемая валидационными вычислительными экспериментами точность классификации с фиксируемым преимуществом модели рекуррентной нейронной сети.

Пятая глава посвящена описанию комплекса программ, объединяющего разработанные модели в систему поддержки принятия врачебных решений. Комплекс программ разработан на языке Python 3 и подразумевает высокопроизводительную реализацию критических с позиции сложности вычислений компонентов.

Научная новизна.

1. Разработан метод детекции фибрилляции предсердий, использующий универсальные алгоритмы сжатия информации для классификации ритмов.
2. Предложен численный метод разностного представления интервалограммы, позволяющий улучшить качество детекции аритмии.
3. Классифицирующие модели, строящиеся данными методами, допускают обучение с малым объёмами данных, с достигаемой эффективной классификацией при 10-20 наблюдениях двух классов временных последовательностей.
4. Построены линейные модели, демонстрирующие релевантные взаимосвязи между эпизодами квази-хаотического ритма фибрилляции предсердий и нормальным синусовым ритмом.
5. Разработана модель на основе сверточно-рекуррентных нейронных сетей, позволяющая идентифицировать пациентов с аритмией по интервалограмме нормального ритма за сутки перед пароксизмом фибрилляции предсердий.

Обоснованность научных результатов подтверждается материалами публикаций, выполненных автором. По теме диссертации автором опубликовано 7 работ в рецензируемых научных журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus, и 1 работа в журнале из перечня ВАК. Зарегистрирована программа для ЭВМ.

Теоретическая значимость

Заключается в построенных моделях, раскрывающих клинически значимые взаимосвязи между вариабельностями нормального синусового ритма и ритма фибрилляции предсердий. Продемонстрировано, что алгоритмы сжатия могут применяться для классификации биомедицинских данных в разностном представлении.

Практическая значимость

Предлагаемые в работе методы и модели могут применяться в качестве инструментов поддержки принятия врачебных решений, и допускают имплементацию на носимых мониторинговых устройствах для ускорения диагностики аритмии.

Апробация работы.

Все положения диссертационной работы докладывались автором на 12 международных конференциях в Екатеринбурге, Казани и Санкт-Петербурге. Результаты, вынесенные на защиту, опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных изданиях. Разработанный комплекс программ имеет свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Достоверность приведенных результатов обеспечивается использованием экспертно верифицированных данных пациентов, валидацией классификаторов проводимыми процедурами вычислительного эксперимента, и обоснованием выводов с помощью классических методов статистики.

Замечания по диссертационной работе

1. Во второй главе при построении моделей детекции пароксизмов ФП производится исследование ряда параметров – размера алфавита Q для квантования кардиоинтервалов к конечному числу символов, количества ближайших соседей k для принятия решений моделью, ширины окна M используемого количества кардиоинтервалов при классификации. Для каждого M предлагается использовать определенные значения Q и k . То есть, может наблюдаться адаптация параметров под тестовую выборку. В дополнение к перекрестной валидации на основном датасете имеет смысл провести верификацию моделей с вычислительными экспериментами на внешних данных, не применявшихся при исследовании пространства параметров, чтобы исключить возможность такой адаптации.

2. Также во второй главе автор выдвигает тезис, что поскольку модель детекции ФП допускает обучение на малом количестве примеров, то модель может быть с легкостью адаптирована под смещение популяции. Справедливость данного утверждения требует более тщательного изучения, поскольку в самой главе исследование качества классификации с малым количеством проб производится со случайно отобранными малыми выборками, никак не берущими во внимание такие факторы как, например, возраст и пол пациентов.

3. В третьей главе расчёт индексов variability ритма сердца производится на интервалограммах, выделяемых из записей суточного мониторинга ЭКГ. Известно, что эктопии достаточно существенно влияют на измеряемую variability ритма. Производилась ли фильтрация эктопических сокращений перед расчётом индексов?

4. В четвертой главе изучаются две архитектуры нейронной сети для предсказания наличия фибрилляции предсердий у пациентов используя интервалограммы исключительно нормального синусового ритма. Автор выдвигает предположение, что рекуррентные слои, используемые в сверточно-рекуррентной архитектуре, позволяют обучать модели, различающие более тонкие флуктуации ритма, что улучшает качество предсказания. Это предположение подтверждается раундами вычислительного эксперимента. Однако используемая архитектура сверточно-рекуррентной сети имеет большее количество обучаемых параметров. Может ли быть так, что выигрыш в качестве

классификации обеспечен увеличенной вычислительной сложностью сверточно-рекуррентных моделей, и углубление сверточных моделей приведет к тому же результату?

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа Маркова Н.С. «Модели машинного обучения для автоматизированного анализа интервалограмм ритма сердца в диагностике аритмии» является самостоятельной и законченной научно-квалифицированной работой, в которой содержатся новаторские результаты в области построения математических моделей и численного анализа биомедицинских последовательностей.

Отмеченные выше замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа Маркова Никиты Сергеевича «Модели машинного обучения для автоматизированного анализа интервалограмм ритма сердца в диагностике аритмии» выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий лабораторией биожидкостей.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Контактные данные: email: kychymov@inbox.ru

Адрес места работы: 614990, Россия, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Кучумов Алексей Геннадьевич



(подпись)

01.09.2025

(дата)

