

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Мангилевой Дарьи Владимировны

«Нейросетевые методы анализа динамических сцен и математические модели электрофизиологии сердца для изучения аритмий», 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 Мангилевой Дарьи Владимировны посвящена актуальной теме применения вычислительных подходов к исследованиям процессов, протекающих в миокарде во время аритмии. Автор обосновывает значимость проблемы и демонстрирует комплексный подход, направленный на использование современных компьютерных технологий для изучения наиболее частого источника аритмий – спиральных волн, которые распространяются посредством передачи возбуждения мембранного потенциала между кардиомиоцитами. Первая часть работы направлена на разработку и исследование новой неконтролируемой нейронной сети DisplacementMLP+ для вычисления полей смещения по двум последовательным кадрам видеоряда. С помощью специально разработанного протокола для её создания и тестирования было показано, что данная нейронная сеть превосходит передовые аналоги на изображениях открытого неизолированного миокарда лабораторной свиньи. С её помощью была осуществлена визуализация образов механических следов спиральных волн на поверхности сердца. Также в работе автор впервые применяет специально разработанный алгоритм и использует критерий вихревого растяжения для различия механического функционирования миокарда в норме и при аритмии. Во второй части исследования автор демонстрирует на современных электрофизиологических двумерных и трёхмерных моделях характер влияния размеров постинфарктного рубца и пограничной полупроводящей зоны на период вращения спиральных волн вокруг них, что углубляет понимание влияния нарушений электропроводимости сердечной ткани на выраженность аритмий и может быть полезно для клинической практики. Сильными сторонами работы являются полный обзор современных исследований по тематике диссертации и оригинальные подходы к анализу видеоряда изображений открытого неизолированного сердца. В целом диссертация представляет значимый вклад в развитие вычислительных подходов и открывает перспективы для дальнейших исследований в компьютерных науках и кардиологии.

На основании вышеизложенного актуальность темы диссертационной работы Мангилевой Д.В. не вызывает сомнений.

Краткое содержание диссертационной работы.

Введение. Во введении подчёркивается актуальность темы исследования, дан краткий обзор передовых научных трудов в соответствующей области, сформулированы цель и задачи исследования.

Глава 1. Теоретические основы и обзор. Глава охватывает базовые теоретические основы, современные исследования близкие к тематике диссертации. Представлен обзор численных методов и глубоких нейронных сетей для вычисления поля смещений по двум последовательным кадрам. Приводятся основы математического моделирования в электрофизиологии.

Глава 2. Разработка нейронной сети для определения поля смещений. Глава посвящена этапам разработки и исследованиям, которые привели к созданию новой модели нейронной сети на основе MLP – DisplacementMLP+, предназначенной для определения полей смещений между двумя последовательными кадрами. Приведены результаты тестирования новой модели и сравнительный анализ с другими нейронными сетями.

Глава 3. Алгоритм анализа видеозаписей неизолированного сердца. Глава описывает разработанный алгоритм для анализа видеозаписей открытого неизолированного сердца и выявления различий в механическом функционировании при норме и аритмии. В конце главы представлены, полученные с помощью DisplacementMLP+, изображения вихреобразных образов, которые являются механическими следами спиральных волн.

Глава 4. Численные эксперименты по моделям электрической активности миокарда. В главе приведены результаты численных экспериментов, проведённых на моделях электрической активности миокарда. Выявлены зависимости периода вращения спиральных волн от размеров непроводящего препятствия и его пограничной зоны.

Заключение. В заключении представлены выводы диссертационного исследования и даны рекомендации по дальнейшему развитию темы и направлений для будущих работ.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем.

В области математического моделирования. 1. Изобретена новая неконтролируемая нейронная сеть DisplacementMLP+, разработанная для расчёта полей смещений между последовательными кадрами и демонстрирующая превосходство над современными аналогами на изображениях неизолированного сердца. 2. Используя современные подходы математического моделирования, впервые обнаружены четыре режима вращения спиральной волны в миокарде вокруг электрически невозбудимого препятствия. Эти режимы имеют различный тип зависимости периода спиральной волны от размеров препятствия и прилегающей полупроводящей зоны.

В области численных методов. 3. Создан новый протокол для разработки и исследования новой нейронной сети и её сравнения с другими методами. 4. Предложен метод обработки видеоматериалов открытого неизолированного сердца для вычисления полей смещений между последовательными кадрами. На основе этого подхода выявлены новые различия в механической активности миокарда между нормой и аритмией. 5. Впервые использовался критерий вихревого растяжения для выявления вихревой механической активности сердца при аритмии, подтверждённой на электрокардиограмме.

В области создания комплексов программ. 6. Предложен программный пакет для работы нового протокола, ориентированного на создание и тестирование DisplacementMLP. 7. Предложен программный пакет, реализующий данную модель. 8. Предложен программный пакет для алгоритма обработки видеозаписей открытого неизолированного сердца.

Обоснованность научных результатов и апробация работы. По итогам диссертационного исследования автор опубликовала 7 работ в рецензируемых научных журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, и представила их на международных и всероссийских конференциях. Среди работ автора есть 1 статья в журнале из первого квартиля и 2 статьи в журналах из второго квартиля.

Теоретическая значимость. Настоящая работа вносит вклад в развитие теории анализа динамических изменений в видеопоследовательностях. Показано, что модель на

основе многослойных персептронов демонстрирует преимущества перед существующими аналогами на изображениях с градиентными изменениями значений пикселей в пространстве. Предложенная модель DisplacementMLP+ обеспечивает более высокую точность анализа смещений на видеокдрах открытого неизолированного сердца.

На основании исследования трёхмерных и двумерных математических моделей удалось обнаружить различные характеры зависимости периода вращения спиральной волны от размера непроводящего рубца и окружающей его полупроводящей зоны. Полученные результаты позволяют понять, как вариации объёма патологических участков миокарда влияют на интенсивность протекания аритмии.

Практическая значимость. Был предложен алгоритм и его реализация в виде программного комплекса для обработки видеозаписей неизолированного миокарда. С помощью него удалось оценить динамику механической активности миокарда и получить необходимые механические параметры в условиях нормы и при аритмиях. С помощью новой модели DisplacementMLP+ удалось распознать механический след от волны изменения мембранного потенциала кардиомиоцитов. Полученные методики обработки видеозаписей могут дать возможность для более обширного исследования и разработки клинических методов в области лечения аритмии.

Достоверность диссертационной работы. В исследовании проводится проверка предлагаемых методов на синтетических наборах данных с заранее известным результатом. Был произведён полноценный статистический анализ вычислений. Итоговые результаты коррелируют с базовой электрофизиологической теорией.

Замечания по диссертационной работе

- 1) В разделах 1.3 и 4.1 приводятся формулы (1.23) и (4.4) для вычисления мембранных токов I_* . Для чего в этих формулах используются параметры α и β , и чем отличаются коэффициенты g_* и $g_{\bullet}$?
- 2) В разделе 2.3 для сравнения результатов используются две метрики – среднеквадратичная ошибка и индекс структурного сходства. Как именно вычисляется индекс структурного сходства? Почему на графиках на Рисунках 2.5, 2.7 и в Таблице 2 его амплитуда достигает 1000, а в Таблицах 1 и 3 этот индекс не превышает 1?
- 3) В разделе 2.4 для модели DisplacementMLP+ используется функция потерь, учитывающая одновременно условия (2.2), (2.3) и (2.4). Как именно выглядит эта функция потерь? Используются ли какие-то весовые коэффициенты в сумме среднеквадратичной и абсолютной ошибок?
- 4) В главе 3 для тестирования методики детектирования аритмогенных процессов была использована модель электрической спиральной волны (см. Рис. 3.6(а,б) и Рис. 3.8). Однако “смещения” электрических потенциалов в спиральной волне могут значительно отличаться от перемещений материальных точек на деформируемой поверхности под действием механического сокращения. Более корректным подходом было бы использование механической модели для построения полей смещений по результатам моделирования электрической спиральной волны.
- 5) В главе 3 используется критерий вихревого растяжения для локализации центра спиральной волны. Может ли предложенный подход ошибочно детектировать

- спиральную волну в области с завихренностью волокон миокарда (например, вблизи верхушки левого желудочка) при нормальной работе сердца?
- 6) В главе 4 период спиральной волны определён как интервал между моментами прихода волны в заданную точку. Как именно выбиралось положение этой точки? Было ли оно фиксированным, или зависело от ширины серой зоны и радиуса постинфарктного рубца? Зависит ли период спиральной волны от выбора этой точки?
- 7) В разделе 4.3 представлены четыре режима вращения спиральных волн. Из текста диссертации и Рисунков 4.9 и 4.10 не понятно, чем именно отличается функциональное вращение от вращения вокруг рубца.

Общая оценка диссертационной работы.

Диссертационная работа Мангилевой Д. В. «Нейросетевые методы анализа динамических сцен и математические модели электрофизиологии сердца для изучения аритмий» является самостоятельной и завершённой научно-квалификационной работой и представляет важные результаты в области глубокого обучения и математического моделирования электрофизиологии миокарда.

Отмеченные выше замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа Мангилевой Дарьи Владимировны «Нейросетевые методы анализа динамических сцен и математические модели электрофизиологии сердца для изучения аритмий» выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,

Старший научный сотрудник,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук

Контактные данные: Тел.: +7 (495) 984-81-20, e-mail: a.danilov@inm.ras.ru

Адрес места работы: 119333 Москва, ул. Губкина, дом 8



(подпись)

24.09.2025

(дата)

Данилов Александр Анатольевич

Подпись Данилова Александра Анатольевича удостоверяю.
Ученый секретарь ИВМ РАН, д.ф.-м.н.



(подпись)

24.09.2025

(дата)

Шутяев Виктор Петрович

