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 разработке и анализу численных методов и математического моделирования для исследования вихревых волн электрического потенциала в миокарде, возникающих при аритмиях. В работе рассматриваются методы на основе глубоких нейронных сетей для визуализации данных явлений и их теоретическое изучение с использованием методов математического моделирования. Актуальность темы обоснована тем, что сердечные аритмии остаются одной из наиболее опасных патологий во всём мире. Основным механизмом аритмий является развитие неоднородности электрической проводимости миокарда. В пределах такой неоднородности могут формироваться спиральные волны (вихри) электрического потенциала кардиомиоцитов, которые навязывают патологический ритм сокращения сердца и препятствуют осуществлению его основной функции — циркуляции крови. Одной из ключевых особенностей работы является разработка и исследование неконтролируемой нейронной сети на основе многослойного персептрона (MLP) для восстановления полей смещения по видеозаписям открытого сердца. Предложенная модель показала многообещающие результаты относительно современных аналогов и может иметь широкий диапазон применения в науке и технике. В частности, относительно видеокадров открытого неизолированного сердца она продемонстрировала наилучшие результаты и была выбрана для визуализации механических следов спиральных волн, формирующихся в миокарде вследствие электромеханического сопряжения. Кроме того, в работе впервые проведено исследование динамики спиральных волн с использованием современных математических моделей. Одним из важных параметров спиральных волн является частота их вращения, которая определяет интенсивность и тяжесть протекания аритмий. Было выявлено на детализированных моделях миокарда с анатомической правдоподобностью и анизотропией характер влияния размеров структурно-функциональных нарушений, вокруг которых закручивается спиральная волна, на данный параметр. Таким образом диссертационная работа Мангилевой Д.В. рассматривает соврменные компьютерные подходы для изучения аритмогенных процессов и может способстовать развитию новых терапевтических и диагностических методов.

На основании вышеизложенного диссертация Мангилевой Д.В. отражает современные научные и практические тенденции, обладая значимой актуальностью.

Краткое содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Введение подчеркивает значимость темы исследования, формулирует цели и задачи, указывает на научную новизну и ценность работы в теоретическом и практическом плане.

В первой главе излагаются базовые теоретические сведения и обзор существующих результатов по теме диссертации. Особенно акцентируется задача обработки видеозаписей движущегося неизолированного сердца и обоснование способов её решения. Рассматривается работа многослойного перцептрона, обсуждаются вопросы частотного сдвига и методы их устранения. Даётся обзор основ математического моделирования в медико-биологических исследованиях, включая моделирование динамики возбуждения в миокарде и перспективы применения таких моделей.

Во второй главе описаны шаги создания новой неконтролируемой нейронной сети на базе MLP — DisplacementMLP+. В начале главы анализируется перспектива использования MLP для определения поля смещений между двумя последовательными 2D изображениями. Излагаются выбор ключевых параметров модели и процедура её оценки по специально разработанному протоколу. Приведена доработанная версия нейронной сети с обновлённой схемой обучения. В заключительной части главы приведены результаты тестирования новой модели и сравнение её с другими нейросетевыми подходами на наборе синтетических изображений.

В третьей главе представлен разработанный алгоритм для анализа видеозаписей открытого бьющегося неизолированного сердца лабораторной свиньи, а также приведены результаты анализа на основании него.

В четвертой главе приведены результаты численных экспериментов на математических моделях электрической активности миокарда. Изучена зависимость периода вращения спиральных волн от размеров электрически непроницаемого препятствия и его пограничной зоны.

В заключении подведены итоги исследования и даны рекомендации, а также перспективы дальнейших работ по теме.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем.

В области математического моделирования:

- Создана новая неконтролируемая нейронная сеть DisplacementMLP+ для расчета полей смещения по паре последовательных кадров, превосходящая современные аналоги на изображениях неизолированного сердца.
- При помощи математического моделирования впервые выделены четыре режима вращения спиральной волны в миокарде вокруг электрически невозбудимого препятствия. Показано, что характер зависимости периода вращения спиральных волн от размеров постинфарктного рубца и окружающей него полупроводящей зоны меняется в зависимости от диапазонов значений.

В области численных методов:

- Разработан специальный протокол для исследования и разработки новой нейронной сети и сопоставления её с другими численными методами.
- Разработан алгоритм обработки видеоматериалов поверхности открытого неизолированного сердца лабораторной свиньи для извлечения полей смещения миокарда. По результатам анализа этого алгоритма удалось различить механическую активность миокарда в норме и при аритмии.
- Впервые применён критерий вихревого растяжения для обнаружения аномальной механической активности миокарда в условиях аритмий.

В области создания комплексов программ:

- Создан комплекс программ для нового протокола, предназначенного для разработки и тестирования DisplacementMLP+.

- Реализован программный комплекс для реализации данной модели.
- Разработан программный комплекс для обработки видеоматериалов открытого неизолированного сердца свиньи.

Обоснованность научных результатов подтверждается публикациями автора. По теме диссертации автор опубликовала 7 работ в рецензируемых научных журналах, включённых в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Теоретическая значимость настоящего исследования состоит в создании нейронной сети на базе многослойного перцептрона для определения смещений пикселей по двум последовательным кадрам видеопотока. Разработанная модель демонстрирует преимущества над современными аналогами на изображениях с плавно изменяющимися значениями пикселей в пространстве. Новая архитектура DisplacementMLP+ достигает более высокой точности восстановления смещений по сравнению с единственным известным на данный момент аналогом — неконтролируемой нейросетью DICNet-corr (Y. Wang и др. 2024) на изображениях неизолированного сердца. С помощью математического моделирования электрофизиологической активности миокарда в условиях структурно-функциональных повреждений обнаружена зависимость периода вращения спиральной волны от величины непроводящего рубца и ширины окружающей его серой зоны, обладающей полупроводниковыми свойствами. Эти выводы являются значимыми для прогнозирования тяжести протекания аритмий в результате постинфарктных изменений сердечной ткани. **Практическая значимость** данного исследования состоит в том, что впервые был предложен алгоритм и программный комплекс для анализа видеозаписей сокращения неизолированного миокарда внутри живого организма. Предложенный метод позволяет оценивать динамику деформаций миокарда во время сокращения и вычислять необходимые механические характеристики как для нормального сердца, так и в условиях аритмий. В работе также представлена модель неконтролируемой нейронной сети, способная распознавать механический след от волны электрического потенциала сердечной ткани. Разработанные методики обработки экспериментальных видеозаписей могут способствовать исследованиям и развитию новых методов диагностики и лечения аритмий.

Апробация работы. Все результаты, изложенные в диссертации, были представлены на 9 международных и всероссийских конференциях по соответствующей тематике. Результаты, вынесенные на защиту, опубликованы в 7 рецензируемых журналах, из которых 3 статьи опубликованы в журналах первого и второго квартиля.

Достоверность проведенных исследований подтверждаются тестированием предлагаемых подходов на синтетических данных с заданным верным ответом, а также их согласованностью с электрофизиологической теорией.

Замечания по диссертационной работе

1) При тестировании новой модели DisplasementMLP+ были выбраны изображения из открытых наборов данных. Как обосновывается выбор содержания изображений?
2) Проводилось ли сравнение временных затрат различных методов глубокого обучения на других видеокартах помимо Tesla A100?
3) В выражениях (2.2), (2.3) и (2.4) не указаны параметры минимизации.

4) В таблице 4 (пункт 2.4) при статистическом анализе используется дополнительный критерий эффекта для выявления степени различий между результатами, полученными с помощью разных моделей нейронных сетей. Однако в таблице 7 (пункт 3.2.2) для сравнения значений критерия вихревого растяжения для нормы и фибрилляции критерий эффекта не применяется. С чем это связано?
5) В пункте 3.2 приводится описание алгоритма обработки видеозаписей открытого неизолированного сердца. Для устранения артефактов движения применяется метод быстрой нормализованной кросс-корреляции, с помощью которого на каждом кадре определяется точка в одном и том же месте, и относительно нее ищется необходимая область. Однако данный метод не учитывает особенности рассогласованного движения сердца, что может приводить к незначительным изменениям области интереса. Как предотвращается данный артефакт?
6) В главе 4 не приводится детальное обоснование уменьшения числа вычислительных экспериментов в трёхмерной модели по сравнению с двумерной.

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, в которой содержатся новые актуальные результаты исследований в области анализа данных и математического моделирования, применяемые для изучения аритмогенных процессов.

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 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: Тел.: +79028086327, e-mail kychymov@inbox.ru
Адрес места работы: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Кучумов Алексей Геннадьевич

[redacted]

(подпись) 22 августа 2025 (дата)

[redacted]

Подпись Кучумова А.Г.

[redacted]

ЗАВЕРЯЮ
Ученый секретарь
Ученого совета ПНИПУ
В.И. Макаревич
«22» 08 2025 г.