

### **Отзыв официального оппонента**

на диссертационную работу Ушенина Константина Сергеевича  
«Персонализированные модели электрофизиологии сердца человека и их приложения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**Диссертация посвящена** построению персонализированных компьютерных моделей электрофизиологических процессов в желудочках сердца человека. Такие модели использовались для генерации искусственных наборов данных и разработки новых методов анализа сигналов, зарегистрированных на миокарде. Указанные исследования являются **актуальными**, поскольку для разработки новых методов обработки сигналов и машинного обучения необходимы данные для верификации и тестирования разрабатываемых алгоритмов. В работе Ушенина К.С. предложены реалистичные модели, основанные на методе конечных элементов, которые могут генерировать сигналы, близкие к сигналам записываемым с реального миокарда. При этом в сгенерированных данных отсутствует шум, который при записи сигналов с реального миокарда всегда присутствует и вызван техническими ограничениями метода регистрации сигналов.

**Тема диссертации соответствует направлению из стратегии научно-технологического развития Российской Федерации** (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»): Н3. Переход к персонализированной медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям здоровьесбережения, в том числе за счет рационального применения лекарственных препаратов (прежде всего антибактериальных). **Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации** (Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года №899): 4. Науки о жизни; **критическая технология**: 22. Технологии снижения потерь от социально значимых заболеваний.

**Основные результаты по теме диссертации** изложены в 20 печатных изданиях опубликованных в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 11 индексируются в Web of Science Core Collection, и 20 – в Scopus. **Диссертация состоит из** введения, 5 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 114 страниц, включая 24 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 108 наименований.

**Во введении** диссертации обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, ставятся цели и задачи работы, изложена ее научная и практическая значимость.

**Первая глава** диссертации является обзором 56 литературных источников. В обзоре приведена информация о современном состоянии проблемы математического моделирования миокарда, и о методах картирования миокарда. Также дана информация об основных терминах из предметной области исследования.

**Вторая глава** диссертации описывает математическую постановку, численные методы и комплекс программ для построения персонализированных моделей миокарда. В главе приведены основные математические формулировки для модели одиночных кардиомиоцитов и бидоменной модели миокарда, представлен вывод матрицы жесткости для метода конечных элементов. Рассмотрена архитектура разработанного комплекса программ. Глава содержит результаты верификации разработанного метода моделирования и комплекса программ относительно реальных данных электрокардиограмм пациентов.

**Третья глава** диссертации описывает результаты анализа чувствительности моделей к изменению семи наиболее значимых параметров. Ушениным К.С. предложен оригинальный метод визуализации чувствительности сложных многомасштабных моделей биологических систем. Также в главе представлены результаты анализа чувствительности моделей к вариации параметров.

**Четвертая глава** диссертации Ушенина К.С. описывает разработанный метод обработки биологических сигналов. При разработке метода, использовались данные от персонализированных моделей, которые описаны в предыдущих главах. Метод основан на оригинальной идее анализа распределения аналитических сигналов на фазовой плоскости. Предложенный подход показывает широту знаний Ушенина К.С. о разных областях прикладной математики и способность объединять эти знания для разработки новых прикладных алгоритмов.

**Пятая глава** диссертации описывает новый подход к картированию миокарда, основанный на обработке сигнала с помощью сверточных нейронных сетей. В работе использовалась архитектура нейронной сети U-Net. Набор данных для обучения был получен в простых одномерных моделях миокардиальной ткани. Обученные нейронные сети верифицированы на данных персонализированных реалистичных моделей миокарда желудочков сердца человека.

В **заключение** сформулированы основные выводы по результатам диссертации, а также приведены рекомендации и дальнейшие перспективы разработки темы.

**Теоретическая значимость работы** заключается в том что впервые были использованы синтетические данные результатов моделирования миокарда для обучения нейронных сетей. **Практическая значимость** работы заключается в разработанной технологии обработки биомедицинских сигналов, которая готова для начала клинических испытаний.

**Научная новизна** работы заключается в:

- Оригинальном методе анализа аналитических сигналов, с помощью построения двумерных гистограмм распределения этих сигналов на фазовой плоскости.
- Оригинальном методе оценки чувствительности сложных многомасштабных моделей биологических систем.
- Использовании моделей миокарда малой размерности при генерации обучающей выборки для глубокой нейронной сети.

По диссертационной работе **имеются следующие вопросы и замечания:**

1. В Главе 5 использовалась сеть с архитектурой U-Net при этом в явном виде задавалась дискретизация пространства с шагом 1 мс. Существующие архитектуры для обучения на операторы, такие как DeepONet не требуют фиксированной дискретизации пространства. Для них также существует строгое доказательство поточечной сходимости, которого нет для сверточных нейронных сетей типа U-Net. По какой причине они не были использованы?
2. В главе 4 и главе 5 предложены технологии для обработки сигналов зарегистрированных с поверхности миокарда, которые выдают сходные результаты визуализации. Сравнивались ли эти два подхода между собой?
3. В диссертации не представлена информация о размере генерируемых данных, реальном времени расчета персонализированных моделей миокарда, и скорости обработки данных алгоритмами представленными в главах 4 и 5. Рецензент просит привести эти характеристики. Возможно ли практическое использование разработанных подходов в реальном времени?

Считаю, что защищаемая работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, соответствует требованиям п. 9 Положения Уральского федерального университета о присуждении ученых степеней, соответствует паспорту специальности 1.2.2. Ушенин Константин Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; отрасль наук – физико-математические.

Официальный оппонент:

**Кучумов Алексей Геннадьевич,**


доктор физико-математических наук по специальности — 01.02.08 «Биомеханика», профессор кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Пермский национальный исследовательский политехнический университет"

614990, Пермский край, город Пермь, Комсомольский проспект, д. 29

email: [kuchumov@inbox.ru](mailto:kuchumov@inbox.ru)

телефон: [89028086327](tel:89028086327)

Дата: «11» сентября 2023



/ Кучумов А.Г.



Получено

ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь  
Ученого совета ПНИПУ

В.И. Макаренко

«11» 09 2023