

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Захарова Дениса Геннадьевича

на диссертацию Богатенко Татьяны Романовны «Колебательные процессы в малых ансамблях связанных моделей нейронов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Диссертационная работа Богатенко Татьяны Романовны посвящена одному из наиболее интересных и важных направлений современной радиофизики – исследованию колебательных процессов в биологических системах физическими методами. Такие работы являются, несомненно, актуальными, поскольку позволяют углублять понимание принципов функционирования нервной системы живых организмов, представленной в виде сложной сети взаимосвязанных элементов, и открывают широкие перспективы как для развития фундаментальных представлений радиофизики о поведении связанных осцилляторов, так и для построения систем диагностики и лечения. Следует отметить, что подавляющее большинство работ в этой области использует либо сильно упрощённые парциальные модели нейронов (например, модели ФитцХью–Нагумо, нейроны Ижикевича), либо рассматривает крупные ансамбли из десятков и сотен элементов. В то же время среди нервной ткани выделяются функциональные сетевые образования небольшого размера, играющие важную роль в регулятивных контурах организма, а малые ансамбли связанных нелинейных осцилляторов представляют самостоятельный фундаментальный интерес для радиофизики в целом. Углубление понимания влияния индивидуальных параметров отдельных нейронов, начальных условий, внешних воздействий, а также топологии и силы связи на формирование колебательных режимов малых нейронных ансамблей важно как для фундаментальной науки, так и для приложений, в том числе для задач генерации синтетических биомедицинских сигналов. В диссертации предложено несколько новых подходов, основанных на радиофизических методах исследования нелинейных колебательных систем, с помощью которых диссертант установил ряд новых закономерностей формирования сложной динамики в малых ансамблях связанных моделей нейронов Ходжкина–Хаксли. Считаю, что поставленные в работе задачи являются **актуальными и значимыми**, а сама работа соответствует специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

В работе диссертант уделил значительное внимание не только получению фундаментальных результатов, но и исследованию возможности применения малых нейронных ансамблей для генерации сигналов, спектрально близких к реальной электроэнцефалограмме, а также развитию методов анализа спектральных характеристик биомедицинских сигналов, что подчеркивает **практическую значимость** работы.

Особо отмечу следующие результаты, полученные в рамках диссертационного исследования и отличающиеся высокой степенью **научной новизны**:

- Показано, что в системе двух связанных нейронов Ходжкина–Хаксли имеет место бистабильность: в зависимости от начальных условий и силы связи нейроны могут демонстрировать синхронные колебания в одном из двух режимов – возбудимом или автоколебательном. Впервые описано явление синхронизации нейронов Ходжкина–Хаксли в возбудимом режиме, при этом граница областей этих режимов на плоскости параметров аппроксимируется гиперболическим законом.
- Установлено, что внешнее периодическое воздействие на один из нейронов в паре индуцирует сложные квазипериодические и хаотические режимы колебаний и их последующую взаимную синхронизацию. Показано, что в ансамблях из трёх и семи связанных нейронов Ходжкина–Хаксли такие сложные режимы реализуются самостоятельно, только за счет характеристик самих ансамблей (индивидуальных параметров нейронов, топологии и силы связи), без внешнего сложного воздействия, а нейрон-хаб играет ключевую роль в формировании сложной динамики нейронов второго слоя.
- Впервые исследована возможность сети нейронов Ходжкина–Хаксли малого размера генерировать сигналы, обладающие спектральными свойствами, характерными для реальных экспериментальных данных. Предложен новый неинвазивный подход к определению стадии анестезии лабораторных животных по спектральным данным электроэнцефалограммы на основе метода машинного обучения без учителя K-Means и выявлены закономерности динамики пяти ритмов мозга на различных стадиях эксперимента.

Результаты диссертационного исследования Татьяны Романовны опубликованы в 8 научных статьях в журналах, входящих в список рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертационного исследования и индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и РИНЦ, а также в 3 статьях в сборниках трудов конференций. Они неоднократно представлялись на всероссийских и международных научных конференциях и хорошо известны научному сообществу. Кроме того, в ходе выполнения диссертации опубликовано 3 тезиса и получено 3 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация Татьяны Романовны включает введение, три содержательные главы, заключение и список литературы. Объем диссертации составляет 111 страниц, включая 44 иллюстрации и список литературы из 138 наименований.

Во введении описаны цель диссертационной работы, ее актуальность, научная новизна, практическая значимость, достоверность полученных результатов, характеризуется личный вклад диссертанта.

Первая глава посвящена исследованию колебательных режимов в системе двух связанных нейронов Ходжкина–Хаксли. Подробно рассмотрено влияние начальных условий, индивидуальных параметров нейронов, силы электрической связи и внешнего воздействия, в том числе переменного тока, на возникновение эффектов синхронизации. Показано, что нейроны могут синхронизироваться в возбудимом и автоколебательном режимах, демонстрируя явление бистабильности, при этом границы областей этих режимов на плоскости параметров аппроксимируются гиперболическими зависимостями. Установлено, что внешнее периодическое воздействие способно индуцировать в паре квазипериодические и хаотические режимы колебаний и их последующую взаимную синхронизацию.

Во второй главе исследована роль топологии и силы связи в формировании колебательных режимов малых ансамблей из трёх и семи связанных нейронов Ходжкина–Хаксли. Рассмотрены кольцо и цепочка из трёх нейронов, а также ансамбль из двух цепочек, связанных через промежуточный нейрон-хаб. Показано, что в отличие от пары нейронов, где сложные режимы требуют внешнего периодического воздействия, в ансамблях из трёх и семи элементов сложные квазипериодические и хаотические колебания реализуются самостоятельно, исключительно за счет характеристик самих ансамблей. Установлена определяющая роль нейрона-хаба в формировании сложной динамики нейронов второго слоя.

Третья глава посвящена анализу спектральных характеристик сигналов электроэнцефалограммы и возможности их генерации малыми нейронными ансамблями. Предложен новый неинвазивный подход к определению стадии анестезии лабораторных крыс, основанный на спектральном анализе и применении метода машинного обучения без учителя K-Means, выявлены закономерности динамики пяти мозговых ритмов на разных стадиях эксперимента. Показано, что малые сети модельных нейронов Ходжкина–Хаксли способны генерировать сигнал, спектральные характеристики которого качественно соотносятся с характеристиками экспериментальных сигналов ЭЭГ.

В заключении представлены результаты и выводы.

Диссертация хорошо структурирована и написана понятным языком. Основные положения, выносимые на защиту, хорошо сформулированы. Работа представляет собой законченный научный труд в области радиопизики. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Обоснованность и достоверность результатов исследования подтверждены применением апробированных методов численного интегрирования и спектрально-статистического анализа, сопоставлением с экспериментальными данными, отсутствием внутренних противоречий и отсутствием несоответствий с известными результатами.

Тем не менее, к диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. В работе (во всех трех главах) для описания нейронной активности используется модель Ходжкина–Хаксли. Однако ее параметры выбраны так ($x_K = +12$ мВ, $x_{Na} = -115$ мВ, $x_I = -10.63$ мВ), что модель демонстрирует генерацию инвертированных («отрицательных») спайков, при которых состояние покоя находится в области положительных значений разности потенциалов на нейронной мембране, а потенциал действия краткосрочно гиперполяризует мембрану. Кроме того, нейроны связаны электрическими связями. Не совсем понятно, чем вызван выбор такой модели нейрона и связей. Отдельно замечу, что такая трансформация не меняет результатов численного счета, поскольку нейроны связаны электрически, и большей части используемых характеристик (будет меняться только фазовый спектр).
2. В первых главах в качестве критерия синхронизации выбран коэффициент Пирсона (гл. 1, разд. 1.3). Для спайковых сигналов этот коэффициент выглядит чувствительным к форме и амплитуде

потенциалов действия. Кроме того, неясно при каких его значениях следует различать полностью и частично синхронные режимы.

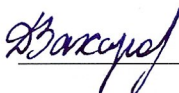
3. Не совсем понятен акцент на синхронизации в возбудимом режиме. Фактически мы имеем дело с синхронизацией переходного режима. В чем физическая важность такого режима синхронизации.
4. В первой главе (разд. 1.4) указано, что внешнее периодическое воздействие вызывает квазипериодические и хаотические режимы. Тем не менее, это утверждение не обосновывается количественными критериями хаотичности/квазипериодичности (например, значением старшего показателя Ляпунова). Хотелось бы понять, как проводилось разделение этих режимов.
5. Во второй главе используется термин «частичная синхронизация». Однако, в отличие от «полной» синхронизации, этот термин не имеет отдельного определения и, в частности, не указано, какие именно элементы/группы образуют синхронный кластер, а какие выпадают, и как это оценивается количественно.
6. В третьей главе, посвященной спектральному анализу ЭЭГ и классификации методом K-Means, произошла терминологическая путаница. Во-первых, перепутаны частотные диапазоны тета- и дельта-ритмов. Во-вторых, говорить о гамма-волнах представляется неправильно, поскольку гамма-колебания обычно очень разрежены и нерегулярны. В-третьих, мне не до конца не понятно, каким именно методом снималась электрическая активность мозга у крыс ((ЭКоГ/субдуральные электроды vs скальповая ЭЭГ vs LFP)). Это важно для понимания, имеет ли смысл исследовать гамма-диапазон активности, потому что он может быть связан преимущественно с мышечно/двигательными артефактами.
7. Хотелось бы попросить обосновать выбор метода K-means для классификации стадий (без анестезии, анестезия, летальная анестезия). Конкретная стадия приписывается кластерам задним числом — по совпадению границ кластера с протокольным временем введения анестетика (ошибка $E < 5\%$). Фактически, речь идет о проверке совпадения границы кластера с событием, а не об определении физиологической стадии. В неудачных случаях ($E > 5\%$) границы сдвинуты из-за индивидуальной задержки реакции. Для более надежной верификации метода следовало бы добавить валидацию на независимых записях разных животных и контроль чувствительности к длительности окна и количества кластеров.
8. Работа содержит некоторое количество опечаток. Например, «...составления уравнения согласно правилам **Кирхгофа** для участка цепи» (стр. 19, раздел 1.2).

Отмечу, что все приведенные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общую высокую оценку проделанной соискателем ученой степени работы.

С учетом всего вышесказанного, диссертационная работа Богатенко Татьяны Романовны удовлетворяет всем требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник центра нейрoэкономики и когнитивных исследований института когнитивных нейронаук ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», кандидат физико-математических наук (1.3.4. – «Радиофизика»)

 Захаров Денис Геннадьевич

«10» 09 2026 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Адрес: 101000, г. Москва, Кривоколенный переулок, 3

Подпись заверяю

МАЛИСТ ПО
КАДРОВЫМ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВУ
ОТДЕЛА ПО УПРАВЛЕНИЮ АДМИНИСТРИРОВАНИЮ
УНИВЕРСИТЕТА
ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРСОНАЛА
С.И. ПЕТРОВА Т.Н. 10.09.2026



Телефон: +7 (495) 772-95-90

E-mail: dgzakharov@hse.ru

Я, Захаров Денис Геннадьевич, даю согласие на обработку моих персональных данных (Приказ Минобрнауки России от 01.07.2015 №662) и на включение моих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук Богатенко Татьяны Романовны.

Подпись ведущего научного сотрудника центра нейрoэкономики и когнитивных исследований института когнитивных нейронаук ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», кандидата физико-математических наук (1.3.4. – «Радиофизика») удостоверяю.