

Отзыв официального оппонента на диссертацию
Маковкина Сергея Юрьевича «**Синхронизация колебаний в
мультиплексных сетевых моделях нейрон-астроцитарных ансамблей**»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.4 — Радиофизика

Диссертация Маковкина С. Ю. посвящена исследованию синхронизации в мультиплексных многослойных сетях, имитирующих нейрон-астроцитарные системы. Особое внимание уделено моделям, воспроизводящим колебания на различных временных масштабах и биологические свойства реальных систем, а также сопутствующим процессам десинхронизации и мультистабильности.

Актуальность тематики диссертации

В рамках диссертационного исследования проведен анализ явлений синхронизации в следующих модельных системах: В мультиплексной двухслойной сети фазовых осцилляторов, характеризующейся разнородными временными масштабами (высоко- и низкочастотный слои) и различными топологиями связей внутри слоёв и между слоями.

В мультиплексной сети с топологией «малый мир», проведено исследование влияния на синхронизацию изменения доли случайно переключенных связей в высокочастотном слое при сохранении регулярной топологии в низкочастотном слое.

В работе исследовано регуляторное воздействие астроцитарной подсистемы на процессы синхронизации:

На уровне минимального ансамбля на биологически реалистичных моделях (нейроны Ходжкина-Хаксли-Мэйнена и астроциты Уллаха-Юнга) проанализировано влияние астроцитарной регуляции на синаптическую передачу и синхронизацию пары нейронов.

На уровне сетевой организации изучена роль астроцитарной регуляции в реалистичной математической модели нейрон-астроцитарной сети гиппокампа.

Актуальность избранной темы, лежащей в области современных исследований нейродинамики, не вызывает сомнений и подтверждается значительным объемом публикаций в рецензируемой научной литературе.

Научная новизна, степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций:

Диссертационное исследование посвящено анализу явлений синхронизации в нелинейных динамических моделях нейрон-астроцитарных сетей, включая модели, специфичные для гиппокампа мозга млекопитающих.

В работе применен многоуровневый подход к моделированию: от качественных мультиплексных сетевых структур на основе уравнений Курамото до биологически верифицированных мультиплексных моделей, адекватно воспроизводящих взаимодействия в нейрон-астроцитарных ансамблях.

Все полученные результаты обладают научной новизной и вносят вклад в развитие данной области знаний. Фундаментальная новизна работы заключается в установлении ранее неизвестных закономерностей синхронизационной динамики в двухслойных сетях фазовых осцилляторов, а также в разработке и анализе ряда усовершенствованных математических моделей нейрон-астроцитарных сетей, что расширяет современные теоретические представления в этой области.

Результаты исследований прошли апробацию в ведущих рецензируемых научных изданиях, что подтверждается серией публикаций в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах по физике, индексируемых в международных (Web of Science, Scopus) и российских (РИНЦ) базах данных и входящих в квартили Q1 и Q2.

В диссертационной работе получены следующие научные результаты:

(i) Впервые обнаружено, что переход к синхронизации в мультиплексных сетях происходит через десинхронизацию в подсетях. Достижение фазовой синхронизации может возникать в той части подсети, в которой синхронизация изначально отсутствует.

(ii) Впервые обнаружен эффект исчезновения мультистабильности при увеличении доли случайных связей, и эффект уменьшения области синхронизации при увеличении числа «тормозных» осцилляторов в высокочастотном слое.

(iii) Впервые показано, что астроцитарная модуляция синаптической передачи приводит к возникновению режима перемежающейся синхронизации нейронов на характерных временах Ca^{2+} импульсов.

(iv) Впервые изучено влияние астроцитарной регуляции синаптической передачи в сети тормозных нейронов на возникновение синхронизации на частоте 21 Гц, соответствующей гамма-ритму.

Обоснованность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Параллельное численное решение мультиплексной модели нейрон-глиальных систем Уллаха-Юнга и Ходжкина-Хаксли методом Рунге-Кутты на вычислительных системах с общей памятью». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619260, заявл. 22.07.2020, получ. 13.08.2020.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций

Основные научные положения и результаты работы были представлены научному сообществу в форме докладов на ряде всероссийских и международных конференций, где прошли профессиональное обсуждение.

По теме диссертации опубликовано 16 публикаций, в числе которых: 4 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus; 12 тезисов

докладов в материалах научных конференций; 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Содержание автореферата адекватно и полно отражает содержание диссертационной работы.

Достоверность полученных научных результатов и выводов подтверждается их соответствием известным экспериментальным данным, представленным в работах ведущих нейробиологов.

Выводы диссертационного исследования находятся в согласии с современными научными парадигмами, что подтверждается анализом отечественных и зарубежных литературных источников.

Результаты, изложенные в работе, обладают существенной теоретической и практической ценностью. Разработанные автором математические модели представляют собой эффективный инструмент для интерпретации данных экспериментальных исследований в области нейрофизиологии.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Научная значимость работы заключается в получении фундаментальных результатов, вносящих вклад в развитие теории синхронизации сложных систем и нелинейной динамики. Полученные данные расширяют теоретические представления о динамике мультиплексных сетей и открывают перспективы для их применения в нейронауке, в частности, при исследовании механизмов нейронной коммуникации, обработки информации и координации движений в живых системах.

Практическая ценность результатов состоит в их потенциале для применения в области исследований мозга. Результаты работы способствуют объяснению фундаментальных механизмов обработки и передачи информации в нейронных ансамблях, раскрывая роль эффектов синхронизации в нейрон-астроцитарных системах. Полученные выводы могут быть использованы для уточнения патофизиологических основ ряда неврологических заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона и эпилепсия.

Материалы диссертационного исследования представляют ценность для образовательного процесса и могут быть включены в учебные курсы по нелинейной динамике, а также в специальные курсы для студентов и аспирантов высших учебных заведений.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, дано содержательное описание современного состояния проблемы, сформулирована цель работы и поставленные задачи, указана суть научной новизны и практическая значимость полученных результатов, представлены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе исследована модель двух связанных слоев активных фазовых элементов с различной топологией, где один слой описывает взаимодействия между астроцитарными клетками, моделируемыми

низкочастотными осцилляторами, а другой слой представляет взаимодействия нейронных клеток, описываемых высокочастотными осцилляторами. В высокочастотном слое упорядоченные элементы связаны регулярной решеткой (каждый осциллятор соединен с четырьмя ближайшими соседями: сверху, снизу, справа и слева), при этом каждый элемент низкочастотного слоя вместе со своими четырьмя соседями связан с соответствующим элементом высокочастотного слоя. Низкочастотный слой, имеющий идентичные высокочастотному слою размеры, характеризуется случайным распределением связей по методу Эрдёша-Реньи, где каждый осциллятор в среднем соединен с четырьмя случайно выбранными элементами посредством дальних связей, что позволило исследовать эффекты синхронизации в системе с разнородными топологиями.

Во второй главе проведено исследование синхронизации в системе фазовых осцилляторов с модифицированной топологией связей, где высокочастотный слой имеет конфигурацию типа «малый мир», а низкочастотный слой имеет регулярную топологию с типом связей «восемь к восьми». В рамках исследования изучены режимы мультистабильных решений, количественно оценена величина параметра доли случайных связей, при которой наблюдается исчезновение мультистабильных решений, а также определены параметры воздействия на размер области десинхронизации. Размер системы и начальное распределение частот сохранены в соответствии с моделью, представленной в первой главе. В сравнительном аспекте исследовано влияние регулярной топологии, топологии «малый мир» и случайной конфигурации связей в высокочастотном слое на глобальную синхронизацию системы.

В третьей главе проведено исследование влияния смешанных связей на синхронизацию в минимальной мультиплексной колебательной сети, моделирующей малый ансамбль нейрон-астроцитарной биологической системы с взаимодействием между низкочастотным (астроцитарным) и высокочастотным (нейронным) колебательными слоями; в работе исследованы два обобщения данной модели, где продемонстрирована роль двух типов связей в нейронном слое – возбуждающих и тормозных синаптических межнейронных соединений, в то время как астроцитарный слой характеризуется исключительно локальными связями, обусловленными диффузионной природой глиальных взаимодействий, что позволило наблюдать разнообразные режимы синхронизации при одновременном наличии тормозных и возбуждающих связей между нейронами. В отличие от предыдущих глав, в данной модели использованы более реалистичные математические описания биологических осцилляторов: один слой представляет ансамбль глиальных клеток (астроцитов), смоделированных как низкочастотные локально связанные генераторы на основе модели Уллаха-Юнга, а другой слой описывает нейронные клетки как высокочастотные осцилляторы с дальнедействующими случайными взаимодействиями в рамках формализма Ходжкина-Хаксли с модификацией Мэйнена для мозга млекопитающих; обе сети имеют идентичный размер 2×2 осциллятора, образуя качественную, но биологически

обоснованную модель коры головного мозга, адекватно отражающую разномасштабную временную природу колебаний и мультиплексную топологию нейрон-глиальных взаимодействий.

В четвёртой главе проведено исследование процессов синхронизации в модели нейрон-астроцитарной сети гиппокампа млекопитающих, состоящей из трёх топологически организованных колец: 200 тормозных нейронов, 200 возбуждающих нейронов и 200 астроцитов, где основное внимание уделено анализу влияния двух ключевых параметров астроцитарной регуляции — знака (возбуждающего или тормозного характера) и величины модуляционного воздействия — на динамику синхронизации в системе.

В заключении приводятся основные результаты диссертационного исследования, свидетельствующие о том, что поставленная цель и задачи достигнуты.

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

1. При описании топологий связей в виде решетки в главах 1 и 2 говорится, что каждый элемент из низкочастотного слоя связан, соответственно, с 4 или 8 соседями, окружающими его. Но при выбранных граничных условиях такое описание не соответствует элементам, которые находятся на краях или в углу решетке.

2. Чем с биологической точки зрения обоснован выбор топологии меджслоного взаимодействия, когда группа низкочастотных элементов (астроцитов) воздействует на каждый высокочастотный элемент (нейрон)?

3. В главах 1 и 2 одна и та же система дифференциальных уравнений интегрируется с разными шагами по времени (0.05 и 0.01 соответственно). Хотелось бы увидеть пояснение, от чего в данном случае зависит выбор.

4. На странице 49 диссертации встречается термин «синхронизация фазового порядка». Имеется ли ввиду в данном случае фазовая синхронизация, или подразумевается что-то другое?

5. Имеется некоторая путаница в определении почти и полностью случайной топологии связей в главе 3. Так, в ряде мест полностью случайной топологией ошибочно называется сгенерированная при параметре случайности $p = 0.5$, в то время как в других местах верно указывается, что в данном случае топология является полностью случайной.

6. Формула (4.8) для расчета среднего значения корреляции является не совсем корректной, т.к. в знаменателе под квадратным корнем должны стоять квадраты величин.

7. В выводах к главе 2 параметр порядка Курамото ρ единственный раз за всю диссертацию начинает называться средним полем. Такая аналогия действительно есть, но лучше придерживаться единой терминологии в работе.

8. В положении 5 говорится про минимальную модель нейрон-астроцитарной сети, при этом из самого положения не ясно, что из себя представляет минимальная модель, хотя дальше в соответствующей главе описание присутствует.

Отмеченные недостатки относятся лишь к оформлению и не снижают научной ценности, актуальности и новизны исследования, а сама работа производит крайне благоприятное впечатление.

Заключение

Диссертация представляет результаты комплексного научного исследования, направленного на решение актуальных проблем современной радиофизики в области нейронауки. Достигнутые в работе результаты являются новыми, хорошо обоснованными и представляют интерес с теоретической и практической точек зрения.

С учетом вышесказанного, считаю, что представленная диссертационная работа полностью удовлетворяет всем требованиям пп. 9-11 13-14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Маковкин Сергей Юрьевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. — «Радиофизика».

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», кандидат физико-математических наук (01.04.03 – Радиофизика) Андреев Андрей Викторович, почтовый адрес: 236041, Россия, Калининград, ул. Александра Невского, д. 14, e-mail: andreevandreil1993@gamil.com, тел: +7 (4012) 59-55-95

Андреев Андрей Викторович
«29» сентября 2025 года

Я, Андреев Андрей Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Андреева А.В. заверяю: Ученый секретарь Ученого совета ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», к.ф.-м.н., доцент,



Шпилевой Андрей Алексеевич

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»
E-mail организации: post@kantiana.ru

Почтовый адрес организации: 236041, Россия, Калининград, ул. Александра Невского, д. 14
Телефон организации: +7 (4012) 59-55-95