

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.340.03, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО"
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 17.12.2025 г. № 32.

О присуждении Маковкину Сергею Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Синхронизация колебаний в мультиплексных сетевых моделях нейрон-астроцитарных ансамблей» по специальности 1.3.4. – Радиофизика принята к защите 25 июня 2025 г., протокол № 19, диссертационным советом 24.2.340.03, созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, приказом Рособрнадзора № 105/нк от 11 апреля 2012 г.

Соискатель, Маковкин Сергей Юрьевич, 9 марта 1983 года рождения, в 2006 году окончил магистратуру радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по направлению «Радиофизика». В период с 2016 г. по 2020 г. Маковкин С.Ю. обучался в аспирантуре по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия». Диплом об окончании аспирантуры № 18/04-76 от 08.10.2020 г. выдан федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского». Выдана справка о сдаче кандидатских экзаменов.

В период подготовки диссертации Маковкин Сергей Юрьевич работал, и работает в настоящее время, в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» в должности старший преподаватель на кафедре прикладной математики Института информационных технологий, математики и механики.

Диссертация выполнена на кафедре прикладной математики Института информационных технологий, математики и механики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и

высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель доктор физико-математических наук Иванченко Михаил Васильевич, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики Института информационных технологий, математики и механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Официальные оппоненты:

1. Сысоева Марина Вячеславовна, гражданка Российской Федерации, доктор физико-математических наук по специальностям 1.3.4. - Радиофизика и 1.5.2. - Биофизика, доцент по специальности 1.3.4. - Радиофизика, профессор кафедры физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
2. Андреев Андрей Викторович, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.03 - Радиофизика, старший научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», г. Саратов, в своем **положительном** отзыве, утвержденном 12.11.2025 г., подписанном доктором физико-математических наук (01.04.03 - Радиофизика), профессором Короновским Алексеем Александровичем, заведующим кафедрой физики открытых систем института физики государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», указала, что диссертация Маковкина Сергея Юрьевича удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Маковкин Сергей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Соискатель имеет 16 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 4 работы, из них в рецензируемых научных изданиях, опубликовано 4 работы. В том числе 1 результат интеллектуальной деятельности: свидетельство о регистрации программ для ЭВМ. Основные результаты диссертации были представлены на международных и всероссийских конференциях.

Авторский вклад соискателя в опубликованные в соавторстве работы состоит как в постановке задач, так и в получении, обсуждении и интерпретации результатов, формулировании выводов и подготовке текстов публикаций. Результаты моделирования получены диссертантом лично посредством самостоятельно созданных программных комплексов.

Проверка текста диссертации не выявила неправомерных заимствований. Исследования являются оригинальными и представляются к защите впервые. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Makovkin S.** et al. Multiplexing topologies and time scales: The gains and losses of synchrony / **Makovkin, S.**, Kumar, A., Zaikin, A., Jalan, S., Ivanchenko, M. // *Physical Review E*. – 2017. – Т. 96. – №. 5. – С. 052214.

2. **Makovkin S.** et al. Synchronization in multiplex models of neuron–glial systems: Small-world topology and inhibitory coupling / **Makovkin, S.**, Lapyeva, T., Jalan, S., Ivanchenko, M. // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. – 2021. – Т. 31. – №. 11.

3. **Makovkin S. Y.** et al. Astrocyte-induced intermittent synchronization of neurons in a minimal network / **Makovkin, S. Y.**, Shkerin, I. V., Gordleeva, S. Y., Ivanchenko, M. V. // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2020. – Т. 138. – С. 109951.

4. **Makovkin S.** et al. Controlling synchronization of gamma oscillations by astrocytic modulation in a model hippocampal neural network / **Makovkin, S.**, Kozinov, E., Ivanchenko, M., Gordleeva, S. // *Scientific reports*. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 6970.

На диссертацию и автореферат поступило 4 отзыва от:

1. Голдобина Дениса Сергеевича, кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы, доцента кафедры теоретической физики ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».
2. Караваева Анатолия Сергеевича, доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, заведующего кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».
3. Клиньшова Владимира Викторовича, доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4. - радиофизика), доцента, ведущего научного сотрудника отдела нелинейной динамики Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова».

Грехова Российской академии наук».

4. Цыбиной Юлии Александровны, кандидата физико-математических наук по специальностям 1.5.2 - биофизика и 1.2.2 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), ведущего научного сотрудника центра нейроморфных вычислений автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет НЕЙМАРК».

Все отзывы **положительные**. В отзывах отмечается актуальность темы исследования, новизна полученных результатов и их значимость для науки и практики.

В отзывах на диссертацию и автореферат содержатся следующие замечания.

Замечания из отзыва ведущей организации.

1. В диссертационной работе явным образом превалируют результаты численного моделирования. Понятно, что использование аналитических подходов в данном случае затруднено сложностью самих объектов исследования. Тем не менее, при изучении явлений, возникающих в сетях нелинейных элементов со сложной топологией межэлементных связей, известно достаточно большое количество удачных примеров использования аналитических подходов, позволяющих описать наблюдаемые явления с теоретической точки зрения с помощью математического аппарата. В настоящей диссертационной работе явно чувствуется дефицит теоретического описания и было бы неплохо, если бы соискатель более смело подошел к вопросу объяснения наблюдаемых явлений с позиций аналитического описания.

2. Усреднение результатов по случайным распределениям начальных частот и случайных топологиям связности высокочастотного слоя осцилляторов (стр. 20 диссертационной работы), безусловно имеет право на использование, однако, при определенных условиях, может приводить к искаженному пониманию происходящих процессов. Было бы уместным обосновать применение данного подхода в рассматриваемом случае.

3. При описании полученных результатов изучения времени релаксации в высокочастотном слое (вторая глава диссертационной работы) соискатель ограничивается качественным описанием того, как ведет себя это самое время релаксации, но не дает ни качественных, ни, тем более количественных объяснений тому, почему это так происходит.

4. В диссертационной работе есть недочеты, связанные с оформлением. Наиболее бросающимся в глаза и, в какой то мере, раздражающим недочетом являются неудачные разрывы страниц (сопровождающиеся пустым местом на страницах), связанные с вставкой рисунков одного за другим, каждый на своей странице (см. например, стр. 68-72 диссертационной работы). Такое может происходить, например, в пакете LaTeX при неудачном локальном соотношении текста и иллюстраций, но, все-таки, эта техническая проблема решается достаточно просто.

Замечания из отзыва официального оппонента Сысоевой М.В.

1. Колебания в диапазоне 20 Гц обычно относят к бета-ритму. Почему в 4й главе диссертации такие колебания называются гамма-ритмами?
2. В 4й главе в тексте написано «Гц», а на рисунках подписано «с-1». Чем оправдано сведение частоты к с-1, а не к Гц?
3. На 85й странице написано «исследована когерентность сети», хотя слово «когерентность» нигде до этого не использовалось.
4. В тексте не пояснено, в чем заключается модификация Мэйнена для модели Ходжкина-Хаксли.
5. Почему сеть тормозных нейронов моделирует гиппокамп? В гиппокампе соотношение тормозных нейронов к возбуждающим 1:9, гораздо меньше, чем в коре.

Замечания из отзыва официального оппонента Андреева А.В.

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 межслойного взаимодействия, когда группа низкочастотных элементов (астроцитов) взаимодействует 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 видеть 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 2. 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 расчёта 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 положения не ясно, что из себя представляет минимальная модель, хотя дальше в соответствующей главе описание присутствует.

Замечание из отзыва на автореферат Голдобина Д.С.

Несущественное замечание вызывает большой объем автореферата - 27 стр. Представляется, что результаты достаточно значимы и могли быть сформулированы в более лаконичном виде без ущерба для обоснования их значимости и передачи сути.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается значительным опытом выполнения ими научно-исследовательских работ по тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований установлено следующее:

В мультиплексных двухслойных сетях фазовых осцилляторов с различными временными масштабами и топологиями связей (случайный граф в высокочастотном слое и регулярная решетка в низкочастотном) переход к глобальной фазовой синхронизации может происходить через промежуточную стадию частичной десинхронизации в слое, где синхронизация изначально присутствовала. При этом сама синхронизация может возникать за счет усиления межслойных (мультиплексных) связей, даже когда в изолированных слоях она отсутствует.

В системах с топологией связей типа «малый мир» мультистабильность режимов синхронизации исчезает при увеличении доли случайных переключений связей до уровня порядка 0.1. Показано, что увеличение доли тормозных элементов в высокочастотном слое приводит к существенному снижению степени фазовой синхронизации. Выявлено резкое увеличение времени переходных процессов (релаксации) на границах областей синхронизации и десинхронизации.

Астроцитарная модуляция синаптической передачи в минимальной модели нейрон-астроцитарного ансамбля приводит к возникновению режима перемежающейся синхронизации нейронов на временных масштабах, соответствующих длительности кальциевых импульсов в астроцитах. Установлено, что вызванная астроцитами модуляция расширяет полосу синхронизации между нейронами.

Астроцитарное ослабление возбуждающих синаптических входов приводит к значительному повышению степени синхронизации сети, в то время как индуцированное астроцитами усиление возбуждающих связей ее снижает. Показано, что модуляция тормозных связей в сети оказывает менее выраженное влияние на синхронизацию.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в расширении современных представлений о коллективной динамике сложных колебательных сетей, в первую очередь, в части процессов синхронизации. Установлено, что в двуслойной сети с мультиплексными связями глобальная фазовая синхронизация может устанавливаться исключительно за счёт усиления межслойного взаимодействия, даже при её отсутствии в изолированных подсетях. При этом обнаружен ранее не описанный сценарий перехода к синхронному состоянию через промежуточную стадию частичной десинхронизации в изначально синхронизованном слое. Важным теоретическим результатом является также выявление критической роли топологии связей: показано, что в системах с регулярной или слабо случайной структурой существует мультистабильность синхронных режимов, которая исчезает с ростом доли случайных связей. В контексте нейродинамики впервые продемонстрировано, что медленная астроцитарная регуляция способна порождать качественно новый режим — перемежающуюся синхронизацию нейронов на характерных временах кальциевой динамики глиальных клеток. Кроме того, теоретически обосновано, что такое астроцитарное влияние расширяет область параметров, соответствующих устойчивой синхронизации в нейронной сети, что указывает на новый возможный механизм управления сетевой колебательной активностью в биологических системах.

Значение полученных соискателем результатов для практики состоит в совершенствовании понимания механизмов временного кодирования и обработки информации в биологических нейросетях на основе управления сетевыми ритмами в мозге через медленную астроцитарную модуляцию. Кроме того, результаты могут быть использованы в разработке принципиально нового класса радиофизических систем — нейроморфных вычислителей с мультиплексной архитектурой и многомасштабной временной динамикой, которые в настоящее время рассматриваются как перспективная платформа для энергоэффективной адаптивной обработки данных.

Оценка достоверности полученных результатов исследования выявила, что изложенные в диссертационной работе результаты получены с использованием устоявшихся математических моделей и численных методов, условия применимости которых были подтверждены, согласуются с известными теоретическими положениями нелинейной динамики и теории синхронизации, не противоречат ранее опубликованным результатам, а также соответствуют экспериментальным данным о модулирующей роли астроцитов в нейронной активности.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственной постановке задач, проведении исследований, разработке и реализации вычислительных моделей, анализе и интерпретации

полученных результатов, а также в подготовке публикаций и докладов по теме диссертации. Соискатель является основным автором всех ключевых публикаций, представленных в работе.

В ходе защиты диссертации членом диссертационного совета Дорохиным М.В. было высказано следующее критическое замечание:

Насколько правомочно делать такие общие выводы: «На границах синхронизации и десинхронизации колебаний происходит резкое увеличение продолжительности переходных процессов.»? Это очень общая формулировка.

Соискатель Маковкин С.Ю. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и замечание и привел собственную аргументацию:

Данная формулировка лежит в рамках общетеоретического понимания динамических процессов вблизи бифуркационных границ. Обнаружено, что на границах синхронизации и десинхронизации в мультиплексных моделях фазовых осцилляторов всегда происходит затягивание переходных процессов.

На заседании 17.12.2025 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития радиофизики, присудить Маковкину С.Ю. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек из них 7 докторов наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени — 16, против присуждения ученой степени — 1, недействительных бюллетеней — 1.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета



 Гурбатов Сергей Николаевич

 Клюев Алексей Викторович

17.12.2025