



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и цифровому развитию
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»
доктор физико-математических наук, профессор
Александр Александрович Короновский

« 23 » 09 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского»

по диссертации **Богатенко Татьяны Романовны** «Колебательные процессы в малых ансамблях связанных моделей нейронов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика, выполненной на кафедре радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора СГУ от 14 декабря 2021 года № 190–Д, переутверждена приказом ректора СГУ от 25 марта 2025 года №42–Д.

Соискатель **Богатенко Татьяна Романовна** с отличием окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского» в 2021 году по направлению «Радиофизика» с присвоением квалификации «Магистр».

В 2021 году Татьяна Романовна была зачислена в очную аспирантуру ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского» по группе научных специальностей 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность Биофизика, а в 2025 году переведена в очную аспирантуру ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского» по направленности Радиофизика. С 2021 по 2025 год работала инженером учебной лаборатории радиофизики кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», а с 2025 года работает ассистентом кафедры радиофизики и нелинейной динамики.

Справка о сданных кандидатских экзаменах №31–2025 выдана 09.09.2025 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского».

Научный руководитель – **Стрелкова Галина Ивановна**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом ректора от 27 апреля 2023 года №90–Д, представила положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ.

На заседании присутствовали:

1. *Стрелкова Галина Ивановна*, доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент, заведующий кафедрой радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
2. *Астахов Владимир Владимирович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
3. *Вадивасова Татьяна Евгеньевна*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
4. *Караваев Анатолий Сергеевич*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
5. *Шабунин Алексей Владимирович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
6. *Москаленко Ольга Игоревна*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
7. *Рыскин Никита Михайлович*, доктор физико-математических наук (01.04.03 и 01.04.04), профессор, профессор кафедры электроники, колебаний и волн института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
8. *Петров Владимир Владимирович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
9. *Аникин Валерий Михайлович*, доктор физико-математических наук (01.04.03 и 05.13.18), профессор, профессор кафедры радиотехники и электродинамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
10. *Сергеев Константин Сергеевич*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
11. *Слепченков Михаил Михайлович*, кандидат физико-математических наук (05.27.01), доцент, доцент кафедры радиотехники и электродинамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
12. *Титов Алексей Владимирович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры электроники, колебаний и волн института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
13. *Адилова Асель Булатовна*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
14. *Семенов Владимир Викторович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), заведующий научно-образовательной лабораторией компьютерного моделирования в электронике института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
15. *Семенова Надежда Игоревна*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;

16. *Слепнев Андрей Вячеславович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
17. *Бух Андрей Владимирович*, кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
18. *Курбако Александр Васильевич*, кандидат физико-математических наук (1.5.2. и 1.3.4.), ассистент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;

Рецензенты диссертации:

Вадивасова Татьяна Евгеньевна, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»,

Москаленко Ольга Игоревна, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»,

Караваев Анатолий Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»,

представили положительные отзывы.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

Заключение

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

Актуальность работы. В диссертационной работе Богатенко Т. Р. решен круг актуальных задач, связанных с изучением влияния начальных условий и постоянного внешнего тока нейронов Ходжкина-Хаксли на механизмы формирования динамических режимов в малых ансамблях таких нейронов. Результаты работы дополняют имеющиеся на сегодняшний день представления в актуальной области исследований, связанной с изучением механизмов синхронизации и условий формирования сложных динамических режимов именно в малых ансамблях моделей нейронов. Таким образом, полученные результаты позволяют улучшить современное понимание динамики более крупных ансамблей моделей нейронов, которые являются предметом изучения многих научных групп во всём мире.

Личный вклад автора. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Автором разработаны оригинальные программные комплексы и программы на языках C, Matlab/Octave и Python, с помощью которых проводились все численные расчеты, обработка экспериментальных данных и построение графиков. Постановка задач, планирование проведения исследований, интерпретация и обсуждение результатов, написание научных статей осуществлялись совместно с научными руководителями и соавторами опубликованных работ.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных в рамках диссертации результатов обеспечивается применением классических методов численного моделирования сложных нелинейных процессов в сетях осцилляторов, а также обоснованных

методов спектрального, статистического и бифуркационного анализа сигналов, которые регулярно применяются в широком спектре радиофизических задач. Кроме того, в ходе работы были использованы программные комплексы, разработанные для конкретных целей и протестированные на большом классе радиофизических задач. Согласованность описанных выводов с полученными ранее результатами других авторов в данной научной сфере также подтверждает их достоверность.

Научная новизна результатов исследования. В данной диссертационной работе впервые подробным образом исследуется влияние постоянного внешнего тока нейрона Ходжкина-Хаксли, а также силы и топологии связи между ними на формирование динамических режимов и механизмы синхронизации в малых ансамблях данных систем. Также впервые исследуется возможность сети нейронов Ходжкина-Хаксли генерировать сигналы, имеющие те же спектральные свойства, что и сигналы, произведённые живой тканью. Кроме того, в рамках данной диссертации предлагается новый подход к анализу записей электрокортикограмм лабораторных животных, подвергающихся действию анестезии, и определению по полученным данным состояния анестезии. Описанный подход включает алгоритм обработки записей, анализ статистических свойств спектральных составляющих сигналов, а также способ неинвазивного определения состояния анестезии при помощи метода машинного обучения без учителя.

Работа фундаментальна, поскольку для описания динамики моделей нейронов и верной интерпретации результатов, полученных в численных экспериментах, необходимы не только математический аппарат и представления о физиологическом строении живых нейронов, но также методы нелинейной динамики, статистической физики и радиофизики, касающиеся свойств сигналов и колебательных процессов. Новизна основных результатов работы подтверждается публикацией в ряде научных статей в журналах с высоким импакт-фактором, входящих в международные и российские системы цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ.

В диссертационной работе впервые получены следующие научные результаты:

- Показано, что в ансамбле двух связанных моделей нейрона Ходжкина-Хаксли при большинстве значений параметров связи, токов постоянного внешнего воздействия и начальных условий нейроны могут синхронизироваться достаточно легко, находясь в возбудимом или автоколебательном режиме в зависимости от значений параметров. При этом при некоторых комбинациях параметров происходит подавление автоколебаний возбудимым режимом, а при других – обратная ситуация и возбудимый режим подавляет автоколебания.
- Установлено, что в рассмотренных ансамблях трёх и семи связанных моделей нейронов также может наблюдаться полная или частичная синхронизация. При этом нейроны могут демонстрировать режимы различной сложности: наблюдались возбудимый режим, режимы пачек спайков, режимы автоколебаний периода 1 и периода 2, а также квазипериодические и хаотические колебания.
- Выявлено, что в ансамбле двух связанных моделей нейронов внешнее периодическое воздействие индуцирует возникновение сложных динамических режимов, в то время как в рассмотренных ансамблях трёх и семи моделей нейронов сложные режимы могут реализовываться самостоятельно, без влияния внешнего сложного воздействия.
- Показано, что при помощи метода машинного обучения без учителя K-Means по спектральным данным экспериментальных сигналов ЭКоГ возможно определить степень анестезии, в которой находится испытуемое лабораторное животное. Также были выявлены закономерности динамики пяти ритмов мозга на различных стадиях эксперимента при введении различных доз анестетика.

- Установлено, что при помощи малых сетей связанных моделей нейронов Ходжкина-Хаксли возможно генерировать сигнал, спектральные характеристики которого качественно соотносятся с характеристиками экспериментальных данных ЭКоГ.

Научная и практическая значимость. Результаты диссертационного исследования колебательных процессов в малых ансамблях нейронов Ходжкина-Хаксли и влияния индивидуальных параметров нейронов, а также параметров сети на эффекты синхронизации и формирование сложных структур в сети вносят вклад в область радиофизики и нелинейной динамики. Полученные в ходе работы научные результаты носят главным образом фундаментальный характер, выявляя способы управления динамикой и эффектами синхронизации в ансамблях моделей нейронов.

Прикладная значимость диссертационной работы состоит в возможности применения полученных результатов при проектировании нейронных сетей в машинном обучении. При этом использование модели нейрона Ходжкина-Хаксли позволяет проводить прямые аналогии между параметрами модели и аспектами живых систем, которые моделируются данными искусственными системами, поскольку при работе с ней исследователь имеет дело с реальными физическими величинами. По этой причине полученные результаты также могут быть востребованы при анализе систем живых нейронов в биологии и нейронауках. Предложенный метод анализа сигналов ЭКоГ может найти практическое применение в биомедицинских целях при определении состояния анестезии пациента в научных экспериментах или в медицинских процедурах.

В ходе выполнения диссертационной работы было создано 5 комплексов программ на языках программирования C и Matlab/Octave. Данные программы были использованы в учебном процессе при постановке курсовых и выпускных квалификационных работ бакалавров по направлению "Радиофизика" в Институте физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского». Результаты диссертации получены в рамках выполнения гранта программы «Мозг» научного фонда Идея (проект № АСП-09-2021/Г), а также при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-12-00103) и в рамках Мегагранта Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2019-1885).

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертационной работе, неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях и школах: Международная конференция «Saratov Fall Meeting 2023», Саратов, Россия, 25–29 сентября, 2023; Всероссийская конференция «BioMedSeminar», Саратов, Россия, 16–17 ноября, 2023; Всероссийская конференция «Математическая весна», Нижний Новгород, Россия, 25–28 марта, 2024; Всероссийская конференция «Актуальные проблемы механики», Великий Новгород, Россия, 19–21 июня, 2024; Международная конференция «PhysCon» Стамбул, Турция, 9–12 сентября, 2024; Всероссийская конференция «Нелинейные волны 2024», Бор, Россия, 5–11 ноября, 2024; Всероссийская конференция «Нелинейные дни для молодых в Саратове», Саратов, Россия, 26–30 мая, 2025.

Полнота изложения материалов диссертации в работах. Результаты диссертационного исследования отражены в публикациях автора в полной мере. По теме диссертационной работы опубликовано 7 статей в центральных реферируемых научных журналах, входящих в системы цитирования Web of Science, Scopus и РИНЦ:

1. **T. R. Bogatenko**, K. S. Sergeev, G. I. Strelkova. The role of coupling and external current in two coupled Hodgkin–Huxley neurons. *Chaos* 35 (2) — 023149 — 2025.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи, проведении исследования, создании программного обеспечения и визуализации, а также написании и редактировании текста.

2. **T. R. Bogatenko**, K. S. Sergeev, A. S. Slepnev, J. Kurths, N. I. Semenova. Symbiosis of an artificial neural network and models of biological neurons: Training and testing. *Chaos* 33 (7) — 073122 — 073122 — 2023.

Личный вклад автора состоит в проведении исследования, написании и редактировании текста.

3. **T. R. Bogatenko**, A. V. Bukh, G. I. Strelkova. Peculiarities of Synchronization in a Two-Layer Network of Chaotic Maps with Inhomogeneous Interlayer Coupling. *Nelineinaya Dinamika* 17 (1) — 103-117 — 2021.

Личный вклад автора состоит в проведении исследования, а также написании и редактировании текста.

4. **T. R. Bogatenko**, V. V. Semenov. Coherence resonance in an excitable potential well. *Physics Letters A* 382 (37) — 2645-2649 — 2018.

Личный вклад автора состоит в проведении исследования, создании визуализации, а также написании текста.

в том числе 3 статьи в журнале, рекомендованном ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

5. **T. R. Bogatenko**, K. S. Sergeev, G. I. Strelkova. Application of machine learning and statistics to anaesthesia detection from EEG data. *Izvestiya of Saratov University. Physics* 24 (3) — 209-215 — 2024.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи, проведении исследования, создании программного обеспечения и визуализации, а также написании и редактировании текста.

6. E. V. Rybalova, **T. R. Bogatenko**, A. V. Bukh, T. E. Vadivasova. The role of coupling, noise and harmonic impact in oscillatory activity of an excitable FitzHugh–Nagumo oscillator network. *Izvestiya of Saratov University. Physics* 23 (4) — 294-306 — 2023.

Личный вклад автора состоит в проведении исследования, а также написании и редактировании текста.

7. **T. R. Bogatenko**, A. V. Bukh, V. S. Anishchenko, G. I. Strelkova. Synchronization Effects in a Two-Layer Network of Nonlocally Coupled Chaotic Maps with Dissipative and Inertial Intercoupling. *Izvestiya of Saratov University. Physics* 20 (1) — 42-54 — 2020.

Личный вклад автора состоит в проведении исследования, а также написании и редактировании текста.

Также опубликовано 3 статьи в сборниках материалов научных конференций, входящих в систему цитирования РИНЦ:

1. **Т. Р. Богатенко**, К. С. Сергеев, А. В. Слепнев, Г. И. Стрелкова, Н. И. Семенова. Особенности внедрения, обучения и функционирования искусственной нейронной сети, состоящей из моделей биологических нейронов. *Нелинейные дни в Саратове для молодых - 2023: материалы XXX Всероссийской научной конференции* 17 — 85-86 — 2023.

2. **Т. Р. Богатенко**, А. В. Бух, Г. И. Стрелкова. Sparse coupling impact on the synchronization degree in networks of logistic maps. Материалы научной конференции молодых ученых "Представляем научные достижения миру. Естественные науки" 12 — 42-51 — 2022.
3. **Т. Р. Богатенко**, А. В. Бух, Г. И. Стрелкова. Особенности синхронизации в двухслойной сети нелокально связанных логистических отображений в условиях разреженной межслойной связи. Материалы конференции "Нелинейные дни в Саратове для молодых" 29 — 16-17 — 2021.

Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. **Богатенко Т. Р.**, Сергеев К. С., Стрелкова Г. И., Программный комплекс для исследования динамики двух связанных моделей нейрона Ходжкина-Хаксли // № 2025667699. — 2025.
2. **Богатенко Т. Р.**, Сергеев К. С., Стрелкова Г. И., Программа для спектрального анализа данных ЭКоГ и распознавания по ним степени анестезии // № 2025667701. — 2025.

Ценность научных работ соискателя учёной степени состоит в решении ряда задач, связанных с фундаментальными принципами взаимодействия нейронов Ходжкина-Хаксли в малых ансамблях и механизмами синхронизации и возникновения сложных колебательных режимов в них.

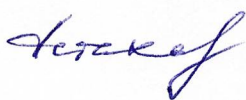
Содержание диссертационной работы полностью соответствует паспорту специальности «1.3.4. – Радиофизика».

Итоговое заключение. Диссертация «Колебательные процессы в малых ансамблях связанных моделей нейронов» Богатенко Татьяны Романовны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – «Радиофизика» как удовлетворяющая критериям, установленным пп. 9-11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., № 842) для кандидатских диссертаций.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского». Присутствовало на заседании 9 докторов наук и 9 кандидатов наук по профилю диссертации (физико-математические науки).

Результаты открытого голосования: «за» – 18 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет (протокол заседания кафедры радиофизики и нелинейной динамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» № 2 от 18 сентября 2025 г.).

Председательствующий
 профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики,
 доктор физико-математических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»



Астахов Владимир Владимирович



Адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83,
 Институт физики, кафедра радиофизики и нелинейной динамики
 Тел.: +7 (8452) 21-07-33
 E-mail: astakhovvv@icloud.com

Подпись *В.В. Астахов* * Достоверно
 Ученый секретарь
 Ученого совета СГУ *В.Г. Семенова*
 «13» сентября 2025 г.