

«УТВЕРЖДАЮ»



Ректор АНО ВО
«Университет Иннополис»
д.ф.-м.н., проф.

А.Г. Тормасов

« 02 » _____ 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис» (АНО ВО «Университет Иннополис») по диссертации Андреева Андрея Викторовича «Нелинейно-динамические модели процессов взаимодействия в ансамблях нелинейных осцилляторов в присутствии внешнего сигнала (связанные ридберговские атомы, нейронные сети)» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика»

Тема диссертации утверждена приказом ректора Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис» от 06.03.2019 № ОД/НИД-01/2019/03/06.

Соискатель Андреев Андрей Викторович окончил магистратуру факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский университет имени Н.Г. Чернышевского» по направлению 03.04.01 «Прикладные математика и физика» в 2017 г.

Андреев А.В. работал в ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» в должности инженера лаборатории кафедры «Геоэкология и инженерная геология» с сентября 2015 г. по сентябрь 2018 г., в должности младшего научного сотрудника НОЦ «Нелинейная динамика сложных систем» с марта 2017 г. по январь 2018 г., в должности младшего научного сотрудника НОЦ «Системы искусственного интеллекта и нейротехнологии» и ассистента на кафедре «Автоматизация, управление, мехатроника» с января 2018 г. по январь 2019 г.

С января 2019 г. по настоящее время Андреев А.В. работает в должности младшего научного сотрудника Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис».

Диссертация «Нелинейно-динамические модели процессов взаимодействия в ансамблях нелинейных осцилляторов в присутствии внешнего сигнала (связанные ридберговские атомы, нейронные сети)» выполнена Андреевым Андреем Викторовичем в Центре технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Храмов Александр Евгеньевич, руководитель Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис», утвержденный приказом ректора АНО ВО «Университет Иннополис» от 06.03.2019 г. №ОД/НИД-01/2019/03/06, представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на заседании Научно-технического совета Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис». На заседании присутствовали:

1. *Климчик Александр Сергеевич*, PhD, руководитель Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

2. *Казанцев Виктор Борисович*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

3. *Куркин Семен Андреевич*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

4. *Малолетов Александр Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор Лаборатории автономных транспортных систем Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

5. *Храмов Александр Евгеньевич*, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

6. *Гафуров Салимжан Азатович*, кандидат технических наук, руководитель Лаборатории автономных транспортных систем Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

7. *Гордлеева Сусанна Юрьевна*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

8. *Грубов Вадим Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

9. *Максименко Владимир Александрович*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

10. *Савин Сергей Игоревич*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории мехатроники, управления и прототипирования Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

11. *Фролов Никита Сергеевич*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

12. *Хорев Владимир Сергеевич*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис»;

13. *Хусаинов Рамиль Расимович*, кандидат технических наук, научный сотрудник Лаборатории мехатроники, управления и прототипирования Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис».

Рецензенты диссертации:

1. *Казанцев Виктор Борисович*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис», предоставил положительный отзыв о диссертации;

2. *Куркин Семен Андреевич*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис», предоставил положительный отзыв о диссертации.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение

Заключение

Диссертация Андреева Андрея Викторовича посвящена выявлению физических закономерностей влияния внешнего сигнала на коллективную колебательную динамику в цепочках, решетках и сетях нелинейных осцилляторов различной природы на примере квазиклассических моделей ридберговских атомов и нейроподобных колебательных элементов.

Соответствие специальности. Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.03 «Радиофизика» (физико-математические науки), удовлетворяя пп. 2, 4 паспорта данной специальности.

Научная новизна результатов диссертации Андреева А.В. заключается в следующем.

- В цепочке связанных ридберговских атомов впервые обнаружено возникновение хаоса и гиперхаоса в зависимости от параметров внешнего коге-

рентного излучения. Исследована зависимость числа положительных показателей Ляпунова от числа элементов ансамбля ридберговских атомов, а также процессы перехода к хаосу и гиперхаосу, обнаружен линейный рост числа положительных показателей Ляпунова с увеличением числа осцилляторов в ансамбле.

- Продемонстрирована возможность управления гиперхаосом с помощью внешнего параметрического воздействия в цепочке и решетке связанных ридберговских атомов.
- Обнаружен эффект когерентного резонанса при обработке сетью внешнего стимульного воздействия как для связанных нейроподобных элементов Рулькова с дискретным временем, так и для сети биологически релевантных моделей нейронов Ходжкина-Хаксли. Эффект заключается в том, что динамика сети становится наиболее когерентной при определенном значении внешнего стимула.
- Впервые было показано, что при визуальном восприятии человеком изображений с меняющейся контрастностью наблюдается эффект когерентного резонанса в кортикальной сети головного мозга, сопровождающийся увеличением размера нейронного ансамбля, вовлеченного в обработку внешнего визуального стимула.
- Обнаружено возникновение химероподобного состояния в сетях бистабильных нейронов Ходжкина-Хаксли с разными типами топологии связи: “малый мир”, свободно масштабируемая и случайная. Химероподобное состояние характеризуется тем, что в зависимости от величины внешнего воздействия и силы связи между нейронами одна часть элементов сети оказывается в стационарном состоянии, в то время как вторая демонстрирует колебательную динамику.
- Продемонстрирована возможность управления размером химероподобного состояния в сетях бистабильных нейронов Ходжкина-Хаксли с помощью подачи короткого импульса внешнего тока, исследована устойчивость узлов к изменению их динамики в зависимости от степени узла при различных топологиях сети.

Практическая значимость обусловлена возможностью использования полученных в ходе исследования системы ридберговских атомов результатов по обнаружению хаоса и показанным возможностям его управления с помощью внешнего воздействия для управления сложными режимами в атомах. Результаты, полученные при обнаружении химероподобного состояния, могут использоваться при создании классификаторов на базе биологических нейронных сетей.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. В замкнутой цепочке связанных полуклассических моделей ридберговских атомов при числе атомов $N \geq 5$ возникает гиперхаотическая динамика, характеризующаяся двумя или более положительными

показателями Ляпунова, при этом с увеличением числа атомов число положительных показателей Ляпунова линейно увеличивается.

2. Параметрическое воздействие в виде модуляции нормированной частоты Раби на замкнутую цепочку связанных ридберговских атомов, находящейся в режиме гиперхаоса, позволяет полностью подавить гиперхаотическую динамику и перейти к периодическим колебаниям в цепочке.

3. В сети связанных нейронов Ходжкина-Хаксли наблюдается когерентный резонанс, характеризующийся достижением максимальной когерентности динамики сети в диапазонах значений амплитуды внешнего воздействия (8.95,9.60) мкА/см² и площади мембраны (100.0,158.5) мкм², характеризующей величину шума, что также подтверждается экспериментальными исследованиями, в процессе которых установлено, что существует оптимальное значение контрастности визуального стимула, при котором кортикальная сеть головного мозга демонстрирует наиболее когерентную динамику.

4. В системе бистабильных нейронов Ходжкина-Хаксли с возбуждающими связями при значениях амплитуды внешнего тока выше 6.26 мкА/см² возникает химероподобное состояние, которое можно вызывать коротким внешним импульсным воздействием на сеть при правильном подборе его амплитуды, длительности и времени подачи, при котором фазовая траектория части нейронов уходит с периодической орбиты и оказывается в бассейне притяжения устойчивой неподвижной точки.

Личный вклад. Все включенные в диссертацию результаты по вынесенной в название тематике получены лично автором. Им произведен выбор методик решения радиофизических задач, разработаны используемые программы численного моделирования, реализованы методы решения исследуемых систем, численные методы. Постановка задач, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем и другими соавторами совместно опубликованных работ.

Достоверность полученных результатов обеспечивается адекватностью применённых моделей, корректностью исходных и упрощающих допущений, использованием уравнений, методов и подходов, которые строго обоснованы в научной литературе, апробированы и хорошо себя зарекомендовали при проведении научных исследований. Достоверность результатов подтверждается их соответствием современным физическим представлениям, верификацией при разнообразном тестировании, непротиворечивостью достоверным известным результатам, сопоставлением различных подходов. Ряд численных результатов, полученных в настоящей работе, согласуется с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные результаты диссертации использовались при выполнении ряда НИР (в рамках грантов РФФИ 15-32-20299, 18-32-20129, РФФИ 17-72-30003, Минобрнауки 3.861.2017/4.6), а также докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XVI, XVII Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот «Современные проблемы электроники СВЧ и ТГц диапазонов» (Саратов, 2015, 2018); XV, XVI, XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова (Москва, 2015, 2017, 2019); X, XIII, XIV Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2015, 2018, 2019); Международный российско-индийский семинар «Сложные динамические системы и синхронизация в нейронауке» (Саратов, 2015); II Всероссийский семинар памяти профессора Ю.П. Волкова «Современные проблемы биофизики, генетики, электроники и приборостроения» (Саратов, 2015); XVII Научная школа «Нелинейные волны – 2016» (Нижний Новгород, 2016); 11-я международная школа «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2016); XV, XVI Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени профессора А.П. Сухорукова (Москва, 2016, 2018); The 25th Nonlinear Dynamics of Electronic Systems conference (NDES 2017, Zernez, Switzerland, 2017); Saratov Fall Meeting 2017, 2018, 2019 (Saratov, 2017, 2018, 2019); 2017, 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2017, Cancun, Mexico, 2017; NOLTA2019, Kuala Lumpur, Malaysia, 2019); V Всероссийская конференция «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2017» (Нижний Новгород, 2017); II, III Международная школа молодых ученых «Динамика сложных сетей и их применение в интеллектуальной робототехнике» (DCNAIR 2018, Саратов, 2018; DCNAIR 2019, Иннополис, 2019); The Brain Conferences «Computational Neuroscience of Prediction» (Rungstedgaard, Denmark, 2018); The 9th International Scientific Conference on Physics and Control (PhysCon2019, Innopolis, Russia, 2019); Seminar «Quantization of Dissipative Chaos: Ideas and Means» (Bad Honnef, Germany, 2019).

Научные публикации. Основное содержание и результаты диссертации отражены в 39 публикациях автора, из них 12 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, 20 тезисов в трудах всероссийских и международных конференций, из них 3, индексируемых в системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Список основных работ автора, отражающих существо диссертационной работы, приведен в конце автореферата. Материалы диссертации полностью представлены в опубликованных работах.

Публикации в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus

- 1) Pisarchik A.N., Maksimenko V.A., Andreev A.V., Frolov N.S., Makarov V.V., Zhuravlev M.O., Runnova A.E., Hramov A.E. Coherent resonance in the distributed cortical network during sensory information processing // Scientific Reports. 2019. Vol. 9, No. 1. P. 1-9.
- 2) Andreev A.V., Frolov N.S., Pisarchik A.N., Hramov A.E. Chimera state in complex networks of bistable Hodgkin-Huxley neurons // Physical Review E. 2019. Vol. 100, No. 2, P. 022224.
- 3) Andreev A. Hyperchaos and its control in two-level quantum oscillators lattice // Cybernetics and Physics. 2019. Vol. 8, No. 3, P. 93-97.
- 4) Andreev A. Synchronization in coupled neural network with inhibitory coupling // Cybernetics and Physics. 2019. Vol. 8, No. 4, P. 199-204.
- 5) Andreev A.V., Pisarchik A.N. Mathematical simulation of coherent resonance phenomenon in a network of Hodgkin-Huxley biological neurons // Proc. SPIE. 2019. Vol. 11067, P. 1106708.
- 6) Andreev A.V., Pitsik E.N., Makarov V.V., Pisarchik A.N., Hramov A.E. Dynamics of map-based neuronal network with modified spike-timing-dependent plasticity // The European Physical Journal Special Topics. 2018. Vol. 227, No. 10-11, P. 1029-1038.
- 7) Andreev A.V., Makarov V.V., Runnova A.E., Pisarchik A.N., Hramov A.E. Coherence resonance in stimulated neuronal network // Chaos, Solitons & Fractals. 2018. Vol. 106. P. 80-85.
- 8) Andreev A., Makarov V., Runnova A., Hramov A. Coherent resonance in neuron ensemble with electrical couplings // Cybernetics and Physics. 2017. Vol. 6, No. 3, P. 135-138.
- 9) Andreev A. V., Runnova A.E., Pisarchik A.N. Numerical simulation of coherent resonance in a model network of Rulkov neurons // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10717. P. 107172E.
- 10) Makarov V.V., Kirsanov D., Goremyko M., Andreev A., Hramov A.E. Nonlinear dynamics of the complex multi-scale network // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10717. P. 1071729.
- 11) Andreev A.V., Runnova A.E., Pisarchik A.N., Hramov A.E. Nonlinear dynamics and coherent resonance in a network of coupled neural-like oscillators // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10493. P. 1049317.
- 12) Андреев А.В., Москаленко О.И., Короновский А.А., Храмов А.Е. Хаос и его подавление в системе двух связанных ридберговских атомов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. №.12. С. 1638-1638.

Публикации в сборниках трудов конференций, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus

- 13) Pisarchik A., Andreev A., Ivanov A. Modeling of a brain neuronal network under visual stimulation // 2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). 2019. P. 136-138.

- 14) Balanov A., Andreev A. Chaos and hyperchaos in a chain of coupled Rydberg atoms // 2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). 2019. P. 24-27.
- 15) Andreev A., Makarov V., Nikita F., Runnova A., Pisarchik A. Mathematical Simulation and Investigation of the Phenomenon of Coherent Resonance in the Brain // 2018 2nd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). 2018. P. 9-11.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

- 16) Андреев А.В., Храмов А.Е. Программа для ЭВМ моделирования химерного состояния в сети связанных нейронов Ходжкина-Хаксли. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660993, 2019.
- 17) Андреев А.В., Храмов А.Е. Программа для ЭВМ моделирования классификатора на основе формирования химерного состояния в сети связанных нейронов Ходжкина-Хаксли. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660992, 2019.
- 18) Андреев А.В., Храмов А.Е., Журавлев М.О., Бадарин А.А. Программа для ЭВМ моделирования двуслойной сети нейроподобных элементов Рутькова, связанных между собой химическими связями случайной амплитуды. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663132, 2018.
- 19) Андреев А.В., Храмов А.Е. Программа для ЭВМ расчета характеристик динамики нейронного ансамбля с синоптическими связями. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619514, 2017.
- 20) Андреев А.В., Храмов А.Е. Программа для ЭВМ моделирования динамики нейронного ансамбля с химическими связями. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619812, 2017.
- 21) Андреев А.В., Храмов А.Е. Расчет бифуркационных диаграмм связанных Ридберговских атомов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610872, 2016.
- 22) Андреев А.В., Храмов А.Е. Расчет показателей Ляпунова для связанных Ридберговских атомов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662856, 2015.

Общая оценка диссертации. Диссертация Андреева Андрея Викторовича «Нелинейно-динамические модели процессов взаимодействия в ансамблях нелинейных осцилляторов в присутствии внешнего сигнала (связанные ридберговские атомы, нейронные сети)» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика» представляет собой самостоятельное, целостное исследование, направленное на решение актуальной радиофизической научной задачи, заключающейся в изучении влияния внешнего сигнала на коллективную колебатель-

ную динамику в цепочках, решетках и сетях нелинейных осцилляторов различной природы, а именно квазиклассических моделей ридберговских атомов и нейрноподобных колебательных элементов. Диссертационная работа выполнена на высоком уровне с применением современных методов теоретического и экспериментального исследования. Положения и основные результаты диссертационной работы полностью отражены в опубликованных статьях и материалах научных конференций. Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации 24.09.2013 № 842.

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Заключение принято на заседании Научно-технического совета Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники АНО ВО «Университет Иннополис».

Присутствовало на заседании 4 доктора и 8 кандидатов физико-математических и технических наук, всего 12 человек.

Результаты голосования: «за» – 12 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет. (протокол № 1 от «27» февраля 2020 г.)

Руководитель Центра технологий
компонентов робототехники и
мехатроники АНО ВО
«Университет Иннополис», PhD



Климчик Александр
Сергеевич

420500, г. Иннополис,
ул. Университетская, 1
8(843)203-92-53
a.klimchik@innopolis.ru

Подпись
Климчика Александра Сергеевича
заверяю:
Ученый секретарь Ученого Совета
АНО ВО «Университет Иннополис»



С.В. Масягин