

УТВЕРЖДАЮ

Директор федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Института радиотехники и электроники

им. В.А. Котельникова

Российской академии наук (ИРЭ РАН)

доктор физико-математических наук,

академик РАН



Никитов С.А.

2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук на диссертацию Масленникова Олега Владимировича «Коллективная динамика и функциональные свойства обучаемых нелинейных сетей активных элементов», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика

Диссертация О.В. Масленникова посвящена развитию радиофизического подхода к анализу и синтезу нелинейных сетей активных элементов, обучаемых для выполнения заданных функций. Работа охватывает широкий круг вопросов — от аналитического описания динамики одиночных нелинейных элементов до выявления закономерностей самоорганизации фазового пространства в полностью обучаемых рекуррентных нейронных сетях. Диссертация содержит четыре главы, последовательно раскрывающие заявленную проблематику.

Актуальность темы диссертационного исследования

Одной из характерных черт современной нелинейной динамики является смещение исследовательского фокуса: сложные динамические системы всё чаще не просто анализируются (с описанием их режимов, бифуркаций и устойчивости), а целенаправленно конструируются для выполнения предписанных функций. Классический математический аппарат, берущий начало в трудах школы Мандельштама–Андропова и развитый в последующих работах по теории хаоса и пространственно-временной самоорганизации, создавался преимущественно для решения прямой задачи — определения возможных режимов при известных уравнениях. Между тем, стремительный прогресс в области искусственных нейронных сетей и нейроморфных технологий актуализировал обратную задачу: поиск таких параметров многомерной нелинейной системы, при которых она воспроизводит заданное поведение. Алгоритмы машинного обучения решают её с впечатляющей эффективностью, однако физическая природа

динамических перестроек, происходящих в системе в ходе настройки весов, во многом остается нераскрытой.

Диссертационное исследование О.В. Масленникова направлено на решение этой фундаментальной проблемы. Центральный тезис работы состоит в том, что процесс обучения нелинейной сети может и должен рассматриваться как целенаправленное преобразование её фазового пространства: рождение и гибель аттракторов, реконфигурация областей притяжения, выстраивание маршрутов переходной динамики. Подобная постановка переводит обучение из категории сугубо алгоритмических процедур в разряд объектов физического исследования, описываемых на строгом языке бифуркаций, показателей Ляпунова и инвариантных множеств. Признание фундаментальной значимости физических основ нейросетевых моделей делает развиваемый в диссертации подход исключительно своевременным.

Проблематика работы находится на стыке сразу нескольких активно развивающихся направлений: вычислительной нейронауки (где обученные рекуррентные сети служат моделями мозговых контуров), теории нейроморфных вычислений (поиск физической базы для энергоэффективных сопроцессоров) и парадигмы объяснимого искусственного интеллекта (требующей перехода от констатации эмпирической работоспособности алгоритма к пониманию внутренних механизмов его функционирования). Во всех перечисленных областях востребован единый подход, связывающий свойства нелинейных элементов и топологию связей с наблюдаемым функциональным поведением. Построению такого концептуального аппарата на базе радиофизических подходов посвящена рецензируемая работа.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертация содержит девять положений, выносимых на защиту. Каждое из них подкреплено аналитическими выкладками, результатами численного моделирования или натурными экспериментами.

Положения 1 и 2, посвященные хаотическим бёрстовым колебаниям в дискретных быстро-медленных системах и управляемости переходного хаоса, опираются на строгие аналитические доказательства. Все теоретические результаты верифицированы прямыми численными расчетами.

Положение 3 о бассейновой устойчивости синхронизации бёрстов в сетях «малого мира» обосновано результатами масштабных численных экспериментов на ансамблях графов Уоттса–Строгаца.

Достоверность Положения 4 (о гиперсетевом описании адаптивных сетей) обеспечивается комплексным подходом, включающим теоретический анализ графа переходов между кластерными конфигурациями, численное моделирование и аппаратную верификацию на базе ПЛИС Xilinx Artix-7. Высокая степень совпадения экспериментальных осциллограмм с теоретическими предсказаниями как в автономном, так и в стимулируемом режимах свидетельствует о надежности предложенной модели.

Положения 5 и 6, раскрывающие спектральный и переходный механизмы в резервуарных сетях, обоснованы применением современного математического аппарата: спектрального анализа эффективных матриц связей, вычисления показателей Ляпунова, топологического анализа данных (персистентной гомологии). Выводы об инвариантности спектральных выбросов подтверждены статистически на множестве независимых реализаций.

Положение 7 (качественное различие фиксированных резервуаров и полностью обучаемых сетей) надежно аргументировано результатами сравнительного анализа архитектур на единой задаче интеграции с использованием нелинейного снижения размерности (UMAP) и оценки внутренней размерности представлений по статистически значимой выборке инициализаций.

Положения 8 и 9, описывающие структуру фазового пространства в полностью обучаемых сетях в зависимости от парадигмы обучения, обоснованы многоуровневой методологией тестирования.

Общая архитектура диссертации логически последовательна. Выводы закономерно вытекают из полученных результатов, а сформулированные рекомендации носят конкретный количественный характер.

Научная новизна и достоверность положений, выводов и рекомендаций

Диссертация содержит обширный массив результатов, существенно расширяющих фундаментальные представления о формировании функциональных свойств нелинейных сетей.

На уровне индивидуальной динамики впервые описан механизм хаотических бёрстовых колебаний в дискретных быстро-медленных отображениях, где хаос реализуется на быстром временном масштабе вследствие граничного кризиса аттрактора. Для переходного хаоса с периодической модуляцией получено аналитическое приближение вероятности выживания, выявлены три режима затухания, доказана возможность двунаправленного управления временем жизни хаотической динамики. Построенная карта времён жизни с фрактальными границами представляет самостоятельную научную ценность.

На уровне коллективной динамики впервые показана оптимальность топологии «малого мира» для бассейновой устойчивости синхронизации хаотических бёрстовых осцилляторов. Линейное убывание устойчивости (в отличие от экспоненциального для осцилляторов Рёсслера) свидетельствует о повышенной робастности бёрстовых сетей. Обнаружена корреляция экстремумов бассейновой устойчивости со скачками числа спайков в пачке. В гетерогенных сетях идентифицированы механизмы самоорганизации доменных структур, включая аналитически доказанный пространственный хаос через конструкцию подковы Смейла.

В области резервуарных вычислений установлен спектральный механизм формирования автономных аттракторов при обучении FORCE, по существу, аналогичный переходу через порог генерации мод в многомодовом автогенераторе. Обнаружен переходный механизм вычислений — формирование детерминированных метастабильных маршрутов в фазовом пространстве с сохраняющимся хаосом. Сформулирован и верифицирован на трёх типах резервуаров принцип вычислительного соответствия. Разрешён парадокс спайкового резервуара через динамическое считывание в рамках теоремы Такенса. Реализован физический резервуар на цепочке генераторов ФитцХью–Нагумо с методологией томографии ядра, применённый к распознаванию акустических сигналов.

На уровне полностью обучаемых сетей показано, что тип решаемой задачи определяет тип самоорганизующейся аттракторной структуры. Впервые систематически установлено, что парадигмы обучения (с подкреплением и с учителем) при сопоставимой точности порождают качественно различные динамические стратегии. Выявлена причинно-следственная связь между бифуркационными переходами и скачками функциональной производительности.

Достоверность результатов обеспечивается применением строгих аналитических методов, масштабными численными экспериментами на статистически значимых ансамблях, экспериментальной верификацией на двух аппаратных платформах (ПЛИС и аналоговый электронный резервуар), а также согласованностью результатов для широкого класса моделей активных элементов.

Личный вклад соискателя в разработку поставленных задач

Определяющий личный вклад соискателя на всех этапах исследования не вызывает сомнений. О.В. Масленников является первым или единственным автором в большинстве ключевых публикаций. Автором лично осуществлены постановка задач, разработка математических моделей, проведение сложных аналитических доказательств и

организация вычислительных экспериментов. Им же разработана оригинальная методология многоуровневого анализа обучаемых рекуррентных сетей.

Степень завершенности исследования, научная и практическая значимость

Диссертация представляет собой завершенное исследование с четкой структурой. Предложенная в первой главе классификация моделей активных элементов формирует единый методологический базис для всей работы. Объем материалов (376 страниц, 95 иллюстраций) и глубина анализа полностью соответствуют заявленной фундаментальной проблематике.

Научная значимость обусловлена созданием теоретического фундамента, описывающего принципы самоорганизации и вычислений в распределенных нелинейных системах при их обучении. Выявленные закономерности (спектральный механизм, принцип вычислительного соответствия, зависимость фазового портрета от парадигмы обучения) открывают новое перспективное направление в радиофизике — теорию синтеза многомерных нелинейных динамических систем с заданным функциональным поведением.

Практическая значимость связана с разработкой количественных критериев проектирования резервуарных вычислительных систем и выбора физического субстрата. Экспериментальный стенд на базе генераторов ФитцХью–Нагумо представляет собой прототип аналогового нейроморфного вычислителя. Разработанный математический инструментарий спектральной и топологической диагностики сетей представляет собой готовое решение для задач в области объяснимого ИИ (XAI) и анализа биологических нейросетей.

При знакомстве с диссертацией возникли следующие замечания и вопросы.

1. В Первой главе проводится описание одиннадцати элементов активных элементов, которые в дальнейшем используются в диссертации. Чем обусловлено необходимость использования такого количества моделей? Это сложилось исторически? Необходимостью сопоставления получаемых результатов с выводами других авторов? Или имеются фундаментальные причины не позволяющие ограничиться меньшим числом базовых моделей?

2. Автор позиционирует направленность своей работы, как исследование, направленное на преодоление разрыва между чисто исследованием радиофизическими методами динамики нейроподобных сетей и вопросами их обучения. Эта задача имеет прямое отношение к проблеме объясняемого ИИ (Explainable Artificial Intelligence). В постановочной части задачи он прямо говорит об этом (см., например, автореферат стр. 4 и 7). Однако в дальнейшем этот важный для ИИ вопрос не получает прямого развития.

Возможно, стоило бы в финальной части работы поместить раздел, прямо поясняющий значение и возможности результатов, полученных в диссертации для проблемы объясняемого ИИ.

3. Мозг представляет собой аналоговую систему, в той или иной степени взаимодействующую с внешней средой. Модели ИИ, также как модели нейроподобных сетей в основном используют цифровые платформы. В Главе 3 диссертации автор использует и цифровую и аналоговую платформы. Фиксируются ли какие-то качественные различия между компьютерными и аналоговыми моделями?

4. Какие математические модели, предложенные и исследуемые в работе, предпочтительны при построении систем с объяснимым ИИ?

5. В Заключение подробно зафиксированы основные конкретные результаты, полученные в работе. Однако, на мой взгляд, там был бы полезно привести обобщающие выводы, касающиеся достижения целей, поставленных в вводной части диссертации.

Следует отметить, что все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общего высокого уровня диссертационной работы и представленных в ней результатов.

Рекомендации по использованию полученных результатов

Результаты диссертационного исследования целесообразно использовать в научно-исследовательской работе и образовательном процессе следующих организаций:

- Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН;
- Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (при разработке мемристивных и осцилляторных нейроморфных процессоров);
- НИИ прикладного искусственного интеллекта и цифровых решений РЭУ им. Г.В. Плеханова (в области объяснимого ИИ);
- Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского и НИУ «Высшая школа экономики» (в преподавании дисциплин по нелинейной динамике, радиофизике и нейроинформатике).

Заключение о степени соответствия диссертации требованиям Положения ВАК

Материалы диссертации хорошо согласованы между собой, представляют цельную, законченную работу, соответствующую паспорту специальности 1.3.4 – радиофизика, удовлетворяющую всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. Актуальность темы диссертации заключается в развиваемом радиофизическом подходе к теории обучаемых нелинейных сетей. Все сформулированные научные положения, выводы и рекомендации обоснованы представленными результатами как в тексте самой диссертации, так и в публикациях, и

материалах конференций. Результаты работы чётко сформулированы, являются достоверными, новыми, оригинальными и значимыми. Число публикаций автора по теме диссертации многократно превышает требования ВАК. Вклад соискателя является определяющим в разработке поставленных в работе задач. Автореферат соответствует диссертационной работе и в полной мере отражает её содержание.

Диссертация Масленникова Олега Владимировича «Коллективная динамика и функциональные свойства обучаемых нелинейных сетей активных элементов» представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых квалифицируется как крупное научное достижение в области радиофизики, а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Доклад по материалам диссертации Масленникова О.В. заслушан на научном семинаре отдела №34 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН «28» апреля 2026 г. (протокол № 3/26). Отзыв составлен в соответствии с «Положением о присуждении учёных степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842).

Отзыв составил

Дмитриев Александр Сергеевич,

д. ф.м.н., главный научный сотрудник, лаб. 341 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Тел. +7 (495) 629-72-78,

E-mail: chaos@cplire.ru

«12» мая 2026 г.



Дмитриев А.С.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук (ИРЭ РАН),
125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 7
Тел.: +7 (495) -629-33-87
Факс: +7 (495) -629-36-36
E-mail: ire@cplire.ru