Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО"

(ННГУ)

УДК 517.9, 512.7

№ госрегистрации 122012100048-3

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ М. В. Иванченко

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2022 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ОБРАБОТКА БОЛЬШИХ МАССИВОВ ДАННЫХ В НЕЙРОНАУКЕ И КАРДИОЛОГИИ

Руководитель НИР,

Зав. НИЛ “Искусственного интеллекта

и обработки больших массивов данных”

Кафедры теории управления и динамики систем

Института информационных технологий,

математики и механики,

к. ф.-м.н. Л.А. Смирнов

 Нижний Новгород 2022

ИСПОЛНИТЕЛИ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Руководитель НИР,к.ф.-м.н. | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Л.А. Смирнов(введение, раздел 1,2, заключение) |
| Ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н. | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Г.В. Осипов(раздел 1) |
| Научный сотрудник, к.ф.-м.н. | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Т.А. Леванова(введение, раздел 1,2, заключение) |
| Научный сотрудник, к.ф.-м.н. | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | В.А. Костин(раздел 1,2) |
| Младший научный сотрудник | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Я.А. Середа(раздел 1) |
| Младший научный сотрудник | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Д.А. Карчков(раздел 1) |
| Научный сотрудник, к.м.н. | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | А.В. Никольский(раздел 1) |
| Младший научный сотрудник | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Е.П. Васильев(раздел 1) |
| Младший научный сотрудник | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Е.Е. Харьковская(раздел 1) |
| Младший научный сотрудник | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | В.О. Муняев(раздел 1) |
| Младший научный сотрудник | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Е.О. Смолина(раздел 1) |
| Научный сотрудник, PhD | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Д.А. Смирнова(раздел 2) |
| Лаборант-исследователь | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Н.В. Квачадзе(раздел 1) |
| Лаборант-исследователь | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Е.Р. Хворова(раздел 1) |
| Лаборант-исследователь | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | А.С. Хорькин(раздел 1) |
| Лаборант-исследователь | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Д.И. Болотов(раздел 1) |
| Лаборант-исследователь | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | И.Д. Никоноров(раздел 1) |
| Лаборант-исследователь | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Е.А. Смирнова (раздел 1) |
| Лаборант-исследователь | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | В.А. Москаленко(раздел 1) |
| Лаборант-исследователь | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Д.М. Родионов(раздел 1) |
| Лаборант-исследователь | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | А.В. Петухов(раздел 1) |
| Лаборант-исследователь | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(подпись) | Н.В. Громов(раздел 1) |

РЕФЕРАТ

Отчет 26 с., 1 кн., 1 рис., 0 табл., 8 источн.

КОЛЛЕКТИВНАЯ ДИНАМИКА, СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ, НЕРАВНОВЕСНЫЕ СРЕДЫ, КАРДИОЛОГИЯ, НЕЙРОНАУКА, АНАЛИЗ ЭКГ, НЕЙРОСЕТИ, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ.

Целью НИР является разработка новых методов машинного обучения и обработки больших массивов данных и их применение в задачах нейродинамики и кардиологии, в частности, в задаче анализа ЭКГ.

Методология проведения работ: используются методы математического моделирования, научной визуализации, машинного обучения и цифровой обработки сигналов, технологии баз данных и системного программирования.

Приоритет научно-технологического развития РФ - переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта; переход к персонализированной медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям здоровьесбережения, в том числе за счет рационального применения лекарственных препаратов (прежде всего антибактериальных).

Представленный отчет состоит из введения, двух частей, заключения и списка опубликованных работ.

В результате выполнения научно-исследовательских работ поставленные цели достигнуты полностью. Поставленные задачи выполнены в срок и в полном объеме. Все результаты соответствуют мировому уровню или превосходят его.

При решении поставленных задач получен ряд важных результатов, которые будут использованы при выполнении дальнейших запланированных работ по проекту.

ОГЛАВЛЕНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 7](#_Toc95844592)

[1. Основные результаты, полученные в 2021 году (1 год выполнения проекта) 11](#_Toc95844593)

[1.1. Анализ коллективной динамики в неравновесных сетях и средах со сложной топологией межэлементного взаимодействия, представляющих собой модели реальных объектов, исследуемых в физике, биологии, нейродинамике и др. 11](#_Toc95844594)

[1.2. Разработка на основе классических и современных методов машинного обучения оригинальных процедур, позволяющих восстанавливать фазовую траекторию в многомерном фазовом пространстве систем, описывающих неравновесные сети и среды связанных нелинейных элементов, а также создание алгоритмов управления динамикой в сетях и средах такого рода. 13](#_Toc95844595)

[1.3. Разработка оптимальной парадигмы ансамблевого глубокого обучения для масштабируемого прогнозирования различных динамических паттернов (как нормальных, так и аномальных), наблюдающихся в периферической нервной системе, мозге, а также в сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ). 15](#_Toc95844596)

[1.4. Разработка и реализация новых алгоритмов обучения интеллектуальных агентов, позволяющих получить глубокие сети с высокой интерпретируемостью для человека. 16](#_Toc95844597)

[1.5. Адаптация и испытания новых разработанных алгоритмов глубокого обучения на различных задачах и наборах данных, в том числе в задаче анализа ЭКГ 17](#_Toc95844598)

[2. Показатели проекта и представление результатов проекта 19](#_Toc95844599)

[Доклады на ведущих международных научных (научно-практических) конференциях в Российской Федерации и за рубежом 21](#_Toc95844600)

[Информация о защищенных диссертациях на соискание степени кандидата наук и доктора наук 21](#_Toc95844601)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 22](#_Toc95844602)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 25](#_Toc95844603)

# ВВЕДЕНИЕ

В настоящем отчете описаны результаты, полученные в рамках работ по первому этапу проекта «Искусственный интеллект и обработка больших массивов данных в нейронауке и кардиологии».

Основные направления проведенных исследований:

1. Анализ коллективной динамики в неравновесных сетях и средах со сложной топологией межэлементного взаимодействия, представляющих собой модели реальных объектов, исследуемых в физике, биологии, нейродинамике и др. Реализация высокопроизводительных программных комплексов для моделирования динамики неравновесных сред с применением вычислений общего назначения на графических картах. Установление возможностей реализации сложных синхронных пространственно-временных структур в зависимости от управляющих параметров, исследование их устойчивости. Интерпретация полученных результатов с точки зрения динамики реальных объектов.
2. Разработка на основе классических и современных методов машинного обучения оригинальных процедур, позволяющих восстанавливать фазовую траекторию в многомерном фазовом пространстве систем, описывающих неравновесные сети и среды связанных нелинейных элементов, а также создание алгоритмов управления динамикой в сетях и средах такого рода.
3. Разработка оптимальной парадигмы ансамблевого глубокого обучения для масштабируемого прогнозирования различных динамических паттернов (как нормальных, так и аномальных), наблюдающихся в периферической нервной системе, мозге, а также в ССЗ. Применение разработанной парадигмы для прогнозирования и анализа хаотической биоэлектрической активности, в частности, экстремальных событий, в задачах кардиологии и нейродинамики.
4. Разработка и реализация новых алгоритмов обучения интеллектуальных агентов, позволяющих получить глубокие сети с высокой интерпретируемостью для человека.
5. Адаптация и испытания новых разработанных алгоритмов глубокого обучения на различных задачах и наборах данных, в том числе в задаче анализа ЭКГ.

В ходе первого этапа проекта были выполнены следующие научно-исследовательские работы:

Реализован программный комплекс, позволяющий проводить прямое численное моделирование динамики неравновесных сред (в частности, систем нелокально связанных фазовых осцилляторов) со сложной топологией с применением вычислений общего назначения на графических картах. Создана база данных, содержащая фазовые траектории рассматриваемых сред в широком диапазоне значений управляющих параметров и начальных условий.

С применением разработанного комплекса получены следующие научные результаты:

1. Рассмотрен ансамбль идентичных фазовых осцилляторов, связанных через общее диффузионное поле. С помощью редукции Отта–Антонсена построены динамические уравнения для комплексных локального параметра порядка и среднего поля. Определены области существования и устойчивости для полностью синхронных, частично синхронных и асинхронных пространственно-однородных состояний. Продемонстрирована процедура поиска неоднородных состояний как периодических траекторий вспомогательной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Описан сценарий возникновения неоднородных химерных структур из однородных синхронных решений.
2. Рассмотрена одномерная колебательная среда со связью через диффузное линейное поле. В пределе быстрой диффузии эта система сводится к классической модели Курамото-Баттогтоха. Показано, что для конечной диффузии реализуются устойчивые химерные солитоны, представляющие собой локализованные синхронные области в бесконечной асинхронной среде. Солитоны устойчивы также при конечной плотности осцилляторов, но в этом случае они движутся с почти постоянной скоростью. Этот дрейф, вызванный конечной плотностью, исчезает в континуальном пределе. Показано, что скорость солитонов обратно пропорциональна плотности частиц. Продемонстрировано, что длинноволновая неустойчивость однородного асинхронного состояния может привести к солитонной турбулентности, которая проявляется как случайная последовательность слияний и рождений солитонов. Когда неустойчивость асинхронного состояния усиливается, турбулентность перерастает в пространственно-временную перемежаемость.
3. Разработана и описана методика применения нейронных сетей для анализа сигнала электрокардиограммы. В сигнале ЭКГ большой длительности проведено детектирование комплексов, классифицируемых специалистами как сигнал с превалированием синусового ритма и фибрилляции предсердий (мерцательной аритмии).
4. Рассмотрена задача о распространении оптических импульсов в средах с нелинейностью Керра. В качестве математической модели, описывающей процессы распространения оптического импульса выбрано обобщенное параболическое уравнение, которое в безразмерных переменных имеет вид одномерного модифицированного нелинейного уравнения Шредингера (НУШ). Были проведены эксперименты по обучению полносвязной нейронной сети с различными функциями оптимизации. Проведенные эксперименты показали перспективность использования квази-ньютоновской функции оптимизации L-BGFS над функциями первого порядка в данной задаче.
5. Разработана новая, основанная на математической оптимизации, модель ансамблевого глубокого обучения для предсказания сложных паттернов активности в нейродинамике. На примере системы связанных элементов ФитцХью-Нагумо, Хиндмарш-Роуз и системы Льенара изучено, как конкретные свойства временного ряда (такие как глобальный и локальный показатели Ляпунова) влияют на длительность и точность прогноза.
6. Проведен сбор экспериментальных данных, позволяющих сделать обоснованные предположения о принципах построения таких искусственных нейросетей, которые не требовали бы предварительного задания морфологии соединений, а вместо этого позволяли бы добавление (специализированных) нейроноподобных элементов в сеть по ходу ее обучения. Выполнен анализ биологических параллелей.

Члены коллектива Г.В. Осипов, А.В. Никольский и Д.А. Карчков провели консультацию и обсуждение возможностей сотрудничества с СМУ, г. Самара, Россия.

Участник научного коллектива Е.П. Васильев стал призером Всероссийского финала конкурса «Цифровой прорыв-2021» в составе сборной команды Ezee (2 место). Е.П. Васильев выполнял в команде роль старшего специалиста по анализу данных и отвечал за работу с большими данными и применение методов глубокого обучения в рамках решаемой задачи. «Цифровой прорыв» – всероссийский конкурс для IT-специалистов, дизайнеров и управленцев в сфере цифровой экономики. Конкурс реализуется при поддержке президентской платформы АНО «Россия – страна возможностей».

Разработанный с использованием результатов исследований, выполненных непосредственно в рамках НИЛ, программно-аппаратный комплекс мониторинга сердечной активности был представлен участниками научного коллектива Д.А. Карчковым и А.В. Никольским в рамках VIII Ежегодной национальной выставке «Вузпромэкспо-2021», прошедшей с 8 по 10 декабря в Сочи на базе Парка науки и искусства «Сириус» в рамках Конгресса молодых учёных.

В результате выполнения научно-исследовательских работ поставленные цели достигнуты полностью. Поставленные задачи выполнены в срок и в полном объеме. Все результаты соответствуют мировому уровню или превосходят его.

# **1. Основные результаты, полученные в 2021 году (1 год выполнения проекта)**

## **1.1. Анализ коллективной динамики в неравновесных сетях и средах со сложной топологией межэлементного взаимодействия, представляющих собой модели реальных объектов, исследуемых в физике, биологии, нейродинамике и др.**

Реализован программный комплекс, позволяющий проводить прямое численное моделирование динамики неравновесных сред (в частности, систем нелокально связанных фазовых осцилляторов) со сложной топологией с применением вычислений общего назначения на графических картах. Создана база данных, содержащая фазовые траектории рассматриваемых сред нелокально связанных фазовых осцилляторов в широком диапазоне значений управляющих параметров и начальных условий.

С применением разработанного комплекса получены следующие научные результаты:

Изучена динамика ансамбля идентичных фазовых осцилляторов. Связь в системе реализуется посредством «посредника» – диффузионного поля, которое создается осцилляторами и воздействует на них. Основное внимание было уделено исследованию свойств пространственно-однородных с точки зрения локального параметра порядка режимов и их влияния на формирование химерных неоднородных состояний. С помощью процедуры редукции Отта-Антонсена были получены динамические уравнения относительно мезоскопических полей системы. На основе их анализа установлено, что в системе могут реализовываться полностью синхронный, асинхронный и частично синхронный режимы. Определены области параметров, где могут сосуществовать три полностью синхронных режима с разной частотой вращения. Синхронный режим может быть устойчивым, устойчивым на некотором интервале длин в случае длинноволновой неустойчивости, и неустойчивым в силу коротковолновой неустойчивости или неустойчивости линейной моды. Асинхронный режим аналогично теряет устойчивость одновременно для всех возможных длин среды из-за коротковолновой неустойчивости или из-за неустойчивости нулевой гармоники. Установлена область существования частично синхронного режима, который, однако, всегда неустойчив. Область существования частично синхронного режима как правило совпадает с областью, где имеет место бистабильность полностью синхронного и асинхронного режимов. Далее в работе представлен оригинальный метод поиска пространственно-неоднородных режимов, в частности к ним относятся химеры – режимы, в которых полностью синхронные по фазе кластеры сосуществуют с доменами частично синхронных элементов. Показано, что таким состояниям соответствуют периодические траектории вспомогательной системы дифференциальных уравнений 3-го порядка. Описан сценарий возникновения устойчивых химерных режимов из пространственно-однородных состояний.

[1.1a] Болотов, Д.И., Болотов, М.И., Смирнов, Л.А., Осипов, Г.В., Пиковский, А.С. Режимы синхронизации в ансамбле фазовых осцилляторов, связанных через диффузионное поле // Известия вузов. Радиофизика. (2022). (принято в печать) (индексируется WoS, Scopus, РИНЦ, Q2)

Рассмотрена одномерная колебательная среда со связью через диффузное линейное поле. В пределе быстрой диффузии эта система сводится к классической модели Курамото-Баттогтоха. Показано, что для конечной диффузии реализуются устойчивые химерные солитоны, представляющие собой локализованные синхронные области в бесконечной асинхронной среде. Солитоны устойчивы также при конечной плотности осцилляторов, но в этом случае они движутся с почти постоянной скоростью. Этот дрейф, вызванный конечной плотностью, исчезает в континуальном пределе. Показано, что скорость солитонов обратно пропорциональна плотности частиц. Продемонстрировано, что длинноволновая неустойчивость однородного асинхронного состояния может привести к солитонной турбулентности, которая проявляется как случайная последовательность слияний и рождений солитонов. Когда неустойчивость асинхронного состояния усиливается, турбулентность перерастает в пространственно-временную перемежаемость.

[1.1b] Smirnov, M.I. Bolotov, D.I. Bolotov, G.V. Osipov, A. Pikovsky. Finite-density-induced motility and turbulence of chimera solitons // arXiv:2111.13177 [nlin.PS]

[1.1c] Smirnov, M.I. Bolotov, D.I. Bolotov, G.V. Osipov, A. Pikovsky. Finite-density-induced motility and turbulence of chimera solitons // New Journal of Physics. (2022). (отправлено) (индексируется WoS, Scopus, РИНЦ, Q1).

## **1.2. Разработка на основе классических и современных методов машинного обучения оригинальных процедур, позволяющих восстанавливать фазовую траекторию в многомерном фазовом пространстве систем, описывающих неравновесные сети и среды связанных нелинейных элементов, а также создание алгоритмов управления динамикой в сетях и средах такого рода.**

В данной работе для апробации поиска направлений модернизации основных концепций использования искусственных нейронных сетей при построении решений уравнений в частных производных рассмотрена задача о самовоздействии волновых пучков и пакетов в нелинейных и неоднородных средах. Математическое описание подобных волновых процессов обычно проводят в рамках параболического приближения, которое неоднократно подтверждало свою эффективность в различных областях классической физики, в частности, в физике плазмы, гидродинамике и нелинейной оптике, а также при изучении распространения радиоволн в ионосфере и анализе передачи электромагнитного излучения по системам, состоящим из открытых резонаторов или волноводов. Стоит особо отметить, что выбор и актуальность обсуждаемой проблемы обусловлены дополнительно еще одним обстоятельством. Несмотря на принципиальное различие в самой природе явлений, если принять во внимание коллективные эффекты, то в квантовой механике и теории конденсированных сред нередко приходят к аналогичным по своей структуре уравнениям. Наиболее наглядно это можно продемонстрировать в случае вырожденных квантовых газов (бозе-частиц) в приближении среднего поля для описания возбуждения эволюции и взаимодействия нелинейных когерентных локализованных образований (светлых и темных солитонов, одиночных квантовых вихрей, вихревых пар и вихревых колец) в бозе-эйнштейновском конденсате среднего поля удается ввести комплексную волновую функцию, играющую роль параметра порядка и удовлетворяющую уравнению Гросса-Питаевского, которое в безразмерных единицах идентично нелинейному уравнению Шредингера (НУШ) при наличии в нем нелинейного потенциала, связанного с внешними неоднородностями.

Ниже представлен ряд результатов по использованию полносвязных искусственных нейронных сетей для предсказаний наиболее вероятного сценария распространения оптических волн сквозь нелинейный кристалл: произведено сравнение построенного прогноза с данными, получаемым путем прямого численного моделирования с помощью принятых стандартных схем расчета.

В работе рассматривается возможность применения технологий глубинного обучения для численного решения задачи о распространении оптических импульсов в средах с нелинейностью Керра. В качестве математической модели, описывающей процессы эволюции огибающей электромагнитного излучения выбрано обобщенное параболическое уравнение, которое в безразмерных переменных имеет вид одномерного модифицированного нелинейного уравнения Шредингера. Была предложена постановка указанной проблемы, позволяющая задействовать для расчетов методы искусственного интеллекта, и реализован один из возможных вариантов данного подхода с применением полносвязной нейронной сети для решения физических задач. При этом был проведен анализ различных алгоритмов подбора параметров, ответственных за передачу информации от слоя к слою такой сети в ходе ее обучения. Выполненные исследования показали, что наиболее перспективными с точки зрения скорости вычислений и адекватности предсказаний являются квази-ньютоновские функции оптимизации, которые в стандартных библиотеках имеют аббревиатуру L-BGFS.

В настоящее время статья готовится к отправке в печать. Планируется также представление результатов работы на международной конференции категории А: International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2022).

[1.2a] Е.П. Васильев, Д.И. Болотов, М.И. Болотов, Л.А. Смирнов. Нейросетевой подход к решению задачи самовоздействия волновых полей в нелинейных средах // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 60-65. (РИНЦ)

[1.2b] Е.П. Васильев, Д.И. Болотов, М.И. Болотов, Л.А. Смирнов. Нейросетевой подход к решению задачи самовоздействия волновых полей в нелинейных средах // Проблемы информатики. (2022). (отправлено) (РИНЦ)

## **1.3. Разработка оптимальной парадигмы ансамблевого глубокого обучения для масштабируемого прогнозирования различных динамических паттернов (как нормальных, так и аномальных), наблюдающихся в периферической нервной системе, мозге, а также в сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ).**

Экстремальные события (ЭС) – редкие, повторяющиеся и сильные отклонения от регулярного поведения, наблюдающиеся в различных биологических и инженерных системах и сильно влияющие на их динамику. ЭС часто происходят спонтанно, без видимых предпосылок. Они редки в том смысле, что частота, с которой они происходят, значительно меньше, чем типичная частота системы, и они экстремальны в том смысле, что их амплитуды в несколько раз превышают стандартное отклонение наблюдаемой величины от среднего.

Разработана новая, основанная на математической оптимизации, модель ансамблевого глубокого обучения для предсказания сложных паттернов активности в нейродинамике. Для этого реализован ансамбль, состоящий из трех глубоких нейросетей: (i) нейронная сеть с прямой связью (FNN), (ii) резервуарные вычисления (RC) и (iii) сеть долгосрочной-краткосрочной памяти (LSTM). Две из указанных сетей (RC и LSTM) являются вариантами рекуррентных нейронных сетей, которые хорошо работают с последовательностями и временными рядами. Полученный таким образом метод ансамблевого прогнозирования будет иметь лучшую точность, чем его компоненты, но в то же время не должен быть слишком сложным для понимания и объяснения. В-третьих, весовые коэффициенты, с которыми ответы каждой нейросети в отдельности учитываются в составе общего ответа ансамбля, дополнительно оптимизируются, что также помогает улучшить точность предсказания. Работоспособность подхода продемонстрирована на искусственных данных, содержащих хаотическую динамику и ЭС, сгенерированных с использованием трех известных динамических систем: системы Льенара, системы двух связанных элементов ФитцХью-Нагумо и системы двух пачечных нейронов Хиндмарш-Роуз со взаимными химическими связями. На примере указанных моделей определено, как конкретные свойства временного ряда (такие как глобальный и локальный показатели Ляпунова) влияют на длительность и точность прогноза.

В настоящее время по результатам работы готовится статья для международной конференции категории А: International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2022).

[1.3] Н.В. Громов, Т.А. Леванова. "Предсказание экстремальных событий и хаотической динамики методами машинного обучения". Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 102-104. (РИНЦ)

## **1.4. Разработка и реализация новых алгоритмов обучения интеллектуальных агентов, позволяющих получить глубокие сети с высокой интерпретируемостью для человека.**

Современные сети глубокого обучения обычно требуют задания морфологии вычислительного графа перед обучением, что приводит к ряду проблем. Во-первых, глубокие сети, сконструированные таким образом, не являются универсальными: для каждого типа данных вручную необходимо разрабатывать собственную архитектуру. Во-вторых, необходимость избежать недообучения приводит к тому, что для конкретной задачи архитектура сети оказывается избыточна, что демонстрируют эксперименты по сжатию сетей. Избыточное количество настраиваемых параметров приводит к понижению интерпретируемости для человека репрезентации данных в этой сети. Таким образом, сеть становится похожа на «черный ящик», что затрудняет применение таких технологий в медицине и других отраслях, где цена ошибки высока. Попытки разработать алгоритмы обучения, основанные на росте сети, предпринимались ранее, однако в данный момент задача не решена достаточно эффективно.

В рамках работ первого года выполнения проекта проведен сбор экспериментальных данных, позволяющих сделать обоснованные предположения о принципах построения таких искусственных нейросетей, которые не требовали бы предварительного задания морфологии соединений, а вместо этого позволяли бы добавление (специализированных) нейроноподобных элементов в сеть по ходу ее обучения. Выполнен анализ биологических параллелей. Предложенный алгоритм по структуре довольно сложен, однако, в силу концепции, он избегает ряда важных проблем, свойственных современным системам искусственного интеллекта. А именно, в каждый момент времени обучается не вся сеть, а лишь небольшая часть, та, которая ближе всего по специализации. Это биологически правдоподобно – подсети мозга вырабатывают специализацию, и обучается на текущем входном сигнале не весь мозг. Кроме того, сеть данного типа «знает, когда она не знает» (если при прохождении по ребрам предсказательных отношений получаются редкие события, то обнаружена новизна).

В настоящее время по результатам работы готовится статья для международной конференции категории А: International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2022).

[1.4a] Я.А. Середа, Е.А. Смирнова, И.Д. Никоноров. К вопросу о растущих глубоких нейросетях // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 312-317. (РИНЦ)

## **1.5. Адаптация и испытания новых разработанных алгоритмов глубокого обучения на различных задачах и наборах данных, в том числе в задаче анализа ЭКГ**

Разработана и описана методика применения нейронных сетей для анализа электрокардиограммы. Важным моментом в анализе сигнала ЭКГ является детектирование и локализация синусового ритма и фибрилляции предсердий. Наличие синусового ритма у исследуемого пациента говорит о корректной последовательности кардиологических циклов и отсутствии патологических возбуждений в сердечной мышце. Отсутствие синусового ритма на ЭКГ свидетельствует о возможном наличие таких патологий, как аритмия, тахикардия, брадикардия, ригидный синусовый ритм. Фибрилляция предсердий характеризуется хаотическим возникновением электрических импульсов в предсердиях, а бесконтрольное протекание этого заболевания чаще всего приводит к развитию хронической сердечной недостаточности и острому нарушению мозгового кровообращения. Разработанная нами система поддержки принятия решений для врачей кардиологического профиля нацелена на предоставления полной, персонализированной информации по исследованию пациента, что позволит не упустить из вида даже редко встречаемые патологии. Один из модулей разработанной системы, описанный в рамках данного исследования, специализируется на детектировании синусового ритма и мерцательной аритмии. Благодаря правильно подобранной архитектуре нейронной сети и внушительному размеру сбалансированной обучающей выборки, обученная модель имеет высокую точность при классификации сигнала электрокардиограммы с синусовым ритмом и фибрилляцией предсердий. Девяносто один процент верных предсказаний позволяет использовать данную модель на практике, для анализа холтеровских мониторов, длительность сигнала которых превышает одни сутки. Для использования модели в анализе коротких сигналов ЭКГ (10 секунд – 10 минут) необходимо расширить обучающую выборку. На сегодняшний день модель подготавливается к интеграции в общую систему диагностики для обработки длительных сигналов ЭКГ с последующей локализацией ритмов. Интеграция производится под контролем медицинских специалистов, участвующих в проекте.

В настоящее время по результатам работы готовится статья для международной конференции категории А: International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2022).

[1.5] Д.М. Родионов, Д.А. Карчков, В.А. Москаленко, А.В. Никольский, Г.В. Осипов, Н.Ю. Золотых. Диагностика синусового ритма и мерцательной аритмии средствами искусственного интеллекта // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 288-292. (РИНЦ)

# **2. Показатели проекта и представление результатов проекта**

**Публикации (типа article и review) в научных журналах, индексируемых в международных базах научного цитирования**

1. Д.И. Болотов, М.И. Болотов, Л.А. Смирнов, Г.В. Осипов, А.С. Пиковский. Режимы синхронизации в ансамбле фазовых осцилляторов, связанных через диффузионное поле // Известия вузов. Радиофизика (2022). (принято в печать) (индексируется WoS, Scopus, РИНЦ, Q2)
2. Smirnov, M.I. Bolotov, D.I. Bolotov, G.V. Osipov, A. Pikovsky. Finite-density-induced motility and turbulence of chimera solitons // New Journal of Physics (2022). (отправлено) (индексируется WoS, Scopus, РИНЦ, Q1)

**Прочие публикации в научных журналах, входящих в ядро РИНЦ**

1. Д.М. Родионов, Д.А. Карчков, В.А. Москаленко, А.В. Никольский, Г.В. Осипов, Н.Ю. Золотых. Диагностика синусового ритма и мерцательной аритмии средствами искусственного интеллекта // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 288-292.
2. Е.П. Васильев, Д.И. Болотов, М.И. Болотов, Л.А. Смирнов. Нейросетевой подход к решению задачи самовоздействия волновых полей в нелинейных средах. Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии // Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 60-65.
3. Н.В. Громов, Т.А. Леванова. Предсказание экстремальных событий и хаотической динамики методами машинного обучения // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 102-104.
4. Я.А. Середа, Е.А. Смирнова, И.Д. Никоноров. К вопросу о растущих глубоких нейросетях // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 312-317.

**Прочие публикации (препринты и другие) в общепризнанных международных репозиториях по отраслям науки**

1. L.A. Smirnov, M.I. Bolotov, D.I. Bolotov, G.V. Osipov, A. Pikovsky. Finite-density-induced motility and turbulence of chimera solitons // arXiv:2111.13177 [nlin.PS]

**Рецензируемые доклады в основной программе конференции по тематической области Computer Science А и А\* по рейтингу CORE, опубликованные в сборниках конференций или зарубежных журналов**

1. Участник научного коллектива Е.П. Васильев стал призером Всероссийского финала конкурса «Цифровой прорыв-2021» в составе сборной команды Ezee (2 место). Е.П. Васильев выполнял в команде роль старшего специалиста по анализу данных и отвечал за работу с большими данными и применение методов глубокого обучения в рамках решаемой задачи. «Цифровой прорыв» – всероссийский конкурс для IT-специалистов, дизайнеров и управленцев в сфере цифровой экономики. Конкурс реализуется при поддержке президентской платформы АНО «Россия – страна возможностей».
2. Разработанный с использованием результатов, полученных непосредственно в рамках проектов НИЛ, программно-аппаратный комплекс мониторинга сердечной активности представлен участниками научного коллектива Д.А. Карчковым и А.В. Никольским в рамках VIII Ежегодной национальной выставке «Вузпромэкспо-2021», проходившей с 8 по 10 декабря в Сочи на базе Парка науки и искусства «Сириус» в рамках Конгресса молодых учёных.

## **Доклады на ведущих международных научных (научно-практических) конференциях в Российской Федерации и за рубежом**

1. Д.М. Родионов, Д.А. Карчков, В.А. Москаленко, А.В. Никольский, Г.В. Осипов, Н.Ю. Золотых. Диагностика синусового ритма и мерцательной аритмии средствами искусственного интеллекта // XXI Международная конференция «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии», Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.
2. Е.П. Васильев, Д.И. Болотов, М.И. Болотов, Л.А. Смирнов. Нейросетевой подход к решению задачи самовоздействия волновых полей в нелинейных средах // XXI Международная конференция «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии», Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.
3. Н.В. Громов, Т.А. Леванова. Предсказание экстремальных событий и хаотической динамики методами машинного обучения // XXI Международная конференция «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии», Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.
4. Я.А. Середа, Е.А. Смирнова, И.Д. Никоноров. К вопросу о растущих глубоких нейросетях // XXI Международная конференция «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии», Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.

## **Информация о защищенных диссертациях на соискание степени кандидата наук и доктора наук**

В рамках первого этапа работ представлена диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук:

1. В.О. Муняев. Синхронизация и хаос в ансамблях связанных ротаторов // Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук, специальность 1.3.4. - радиофизика (представление на кафедре ТУиДС ИИТММ, 24.12.2021).

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения первого этапа проекта получены следующие результаты.

1. Реализован программный комплекс, позволяющий проводить прямое численное моделирование динамики неравновесных сред (в частности, систем нелокально связанных фазовых осцилляторов) со сложной топологией с применением вычислений общего назначения на графических картах. Создана база данных, содержащая фазовые траектории рассматриваемых сред нелокально связанных фазовых осцилляторов в широком диапазоне значений управляющих параметров и начальных условий.

С применением разработанного комплекса получены следующие научные результаты:

1. Рассмотрен ансамбль идентичных фазовых осцилляторов, связанных через общее диффузионное поле. С помощью редукции Отта–Антонсена построены динамические уравнения для комплексных локального параметра порядка и среднего поля. Определены области существования и устойчивости для полностью синхронных, частично синхронных и асинхронных пространственно-однородных состояний. Продемонстрирована процедура поиска неоднородных состояний как периодических траекторий вспомогательной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Описан сценарий возникновения неоднородных химерных структур из однородных синхронных решений.
2. Рассмотрена одномерная колебательная среда со связью через диффузное линейное поле. В пределе быстрой диффузии эта система сводится к классической модели Курамото-Баттогтоха. Показано, что для конечной диффузии реализуются устойчивые химерные солитоны, представляющие собой локализованные синхронные области в бесконечной асинхронной среде. Солитоны устойчивы также при конечной плотности осцилляторов, но в этом случае они движутся с почти постоянной скоростью. Этот дрейф, вызванный конечной плотностью, исчезает в континуальном пределе. Показано, что скорость солитонов обратно пропорциональна плотности частиц. Продемонстрировано, что длинноволновая неустойчивость однородного асинхронного состояния может привести к солитонной турбулентности, которая проявляется как случайная последовательность слияний и рождений солитонов. Когда неустойчивость асинхронного состояния усиливается, турбулентность перерастает в пространственно-временную перемежаемость.
3. Разработана и описана методика применения нейронных сетей для анализа сигнала электрокардиограммы. В сигнале ЭКГ большой длительности проведено детектирование комплексов, классифицируемых специалистами как сигнал с превалированием синусового ритма и фибрилляции предсердий (мерцательной аритмии).
4. Рассмотрена задача о распространении оптических импульсов в средах с нелинейностью Керра. В качестве математической модели, описывающей процессы распространения оптического импульса выбрано обобщенное параболическое уравнение, которое в безразмерных переменных имеет вид одномерного модифицированного НУШ. Были проведены эксперименты по обучению полносвязной нейронной сети с различными функциями оптимизации. Проведенные эксперименты показали перспективность использования квази-ньютоновской функции оптимизации L-BGFS над функциями первого порядка в данной задаче.
5. Разработана новая, основанная на математической оптимизации, модель ансамблевого глубокого обучения для предсказания сложных паттернов активности в нейродинамике. На примере системы связанных элементов ФитцХью-Нагумо, Хиндмарш-Роуз и системы Льенара изучено, как конкретные свойства временного ряда (такие как глобальный и локальный показатели Ляпунова) влияют на длительность и точность прогноза.
6. Проведен сбор экспериментальных данных, позволяющих сделать обоснованные предположения о принципах построения таких искусственных нейросетей, которые не требовали бы предварительного задания морфологии соединений, а вместо этого позволяли бы добавление (специализированных) нейроноподобных элементов в сеть по ходу ее обучения. Выполнен анализ биологических параллелей.

Результаты, полученные на данном этапе НИР, будут в дальнейшем использованы для выполнения запланированных теоретических и экспериментальных исследований по НИР. В результате выполнения поисковых и научно-исследовательских работ первого этапа, поставленные цели полностью достигнуты. Все результаты соответствуют мировому уровню.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Болотов, Д.И., Болотов, М.И., Смирнов, Л.А., Осипов, Г.В., Пиковский, А.С. Режимы синхронизации в ансамбле фазовых осцилляторов, связанных через диффузионное поле // Известия вузов. Радиофизика. (2022). (принято в печать).
2. Smirnov, M.I. Bolotov, D.I. Bolotov, G.V. Osipov, A. Pikovsky. Finite-density-induced motility and turbulence of chimera solitons. // arXiv:2111.13177 [nlin.PS]
3. Smirnov, M.I. Bolotov, D.I. Bolotov, G.V. Osipov, A. Pikovsky. Finite-density-induced motility and turbulence of chimera solitons // New Journal of Physics. (2022). (отправлено).
4. Е.П. Васильев, Д.И. Болотов, М.И. Болотов, Л.А. Смирнов. Нейросетевой подход к решению задачи самовоздействия волновых полей в нелинейных средах // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 60-65. (РИНЦ)
5. Е.П. Васильев, Д.И. Болотов, М.И. Болотов, Л.А. Смирнов. Нейросетевой подход к решению задачи самовоздействия волновых полей в нелинейных средах // Проблемы информатики. (2022). (отправлено) (РИНЦ)
6. Н.В. Громов, Т.А. Леванова. Предсказание экстремальных событий и хаотической динамики методами машинного обучения // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 102-104. (РИНЦ)
7. Я.А. Середа, Е.А. Смирнова, И.Д. Никоноров. К вопросу о растущих глубоких нейросетях // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 312-317. (РИНЦ)
8. Д.М. Родионов, Д.А. Карчков, В.А. Москаленко, А.В. Никольский, Г.В. Осипов, Н.Ю. Золотых. Диагностика синусового ритма и мерцательной аритмии средствами искусственного интеллекта // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции (Н. Новгород, 22–26 ноября 2021 г.) / Под ред. проф. Д.В. Баландина. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. Стр. 288-292. (РИНЦ)