

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

«___» _____ 2023 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 2023

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

Е.Е. Котихина
(раздел 1)

(подпись)

Младший научный
сотрудник

В.О. Муняев
(раздел 1)

(подпись)

Младший научный
сотрудник

Е.О. Смолина
(раздел 1)

(подпись)

Научный сотрудник,
к.ф.-м..н.

С.В. Стасенко
(раздел 1)

(подпись)

Лаборант-
исследователь

Ю.В. Гурьева
(раздел 2)

(подпись)

Лаборант-
исследователь

Р.О. Смирнов
(раздел 1)

(подпись)

Лаборант-
исследователь

А.Д. Рылов
(раздел 1)

(подпись)

Лаборант-
исследователь

А.В. Рыбкин
(раздел 1)

(подпись)

Лаборант-исследователь

(подпись)

В.А. Шишкова
(раздел 1)

Лаборант-исследователь

(подпись)

И.Д. Никоноров
(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., 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
1. Основные результаты, полученные в 2022 году (2 год выполнения проекта)	10
1.1. Изучение коллективной динамики и структурообразования в неравновесных средах	10
1.2. Методы машинного обучения и обработки больших массивов данных в кардиологии	10
1.3. Методы машинного обучения и обработки больших массивов данных в нейронауке	12
1.4. Исследования и разработки в области классических нейросетей, искусственного интеллекта с точки зрения различных приложений	14
1.5. Дополнительные задачи	14
2. Показатели проекта и представление результатов проекта	17
Информация о защищенных диссертациях на соискание степени кандидата наук и доктора наук	20
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	21
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	23

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. Изучение коллективной динамики и структурообразования в неравновесных средах
2. Методы машинного обучения и обработки больших массивов данных в кардиологии
3. Методы машинного обучения и обработки больших массивов данных в нейронауке
4. Исследования и разработки в области классических нейросетей, искусственного интеллекта с точки зрения различных приложений

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

1. Изучена коллективная динамика и структурообразования в одномерной колебательной среде со связью через диффузное линейное поле.
2. Выполнен сбор данных ЭКГ для машинного обучения в объеме 1200 12-канальных ЭКГ покоя и 700 1-канальных ЭКГ длительностью от 1 часа до 20 часов. Выполнена доврачебная разметка собранных данных автоматическими методами с использованием машинного обучения с последующей валидацией врачами функциональной диагностики.
3. Методом картирования биоэлектрической активности изолированного сердца крысы мультиэлектродными матрицами был показан аритмогенный эффект сочетанного воздействия механического и гипоксического воздействия на миокард.
4. Разработан механизм поиска указанных патологий на основе модифицированной архитектуры сверточной нейронной сети типа U-net. В ходе дальнейших исследований были проанализированы известные свёрточные нейронные сети (а именно DenseNet, ResNet, XceptionNet и классические глубокие CNN), показавшие отличные результаты в анализе изображений. Решение интегрировано в диагностическую систему “Кардиомаяк”, ориентированную на исследование патологических сигналов электрокардиограмм.
5. Предложен новый подход к анализу экспериментальных данных активности нейронов с использованием современных методов классификации данных.

6. Разработана новая, основанная на математической оптимизации, модель ансамблевого глубокого обучения для предсказания сложных паттернов активности в нейродинамике.
7. Разработан подход к задаче обучения без учителя, в рамках которого процесс распознавания агентом изображения представляет собой последовательность экспериментов.
8. Методы машинного и глубокого обучения были использованы для решения ряда физических проблем (в частности, фотоники). Показано, что сценарии развития модуляционной неустойчивости в нелинейных фотонных решетках определяются топологическими свойствами энергетических зон.
9. Рассмотрена задача о распространении оптических импульсов в средах с нелинейностью Керра. Эксперименты по обучению полносвязной нейронной сети с различными функциями оптимизации показали перспективность использования квази-ньютоновской функции оптимизации L-BGFS над функциями первого порядка в данной задаче.

Члены коллектива приняли активное участие в различных конкурсах и мероприятиях по тематике машинного обучения:

1. Член коллектива Васильев Евгений занял 1 место во всероссийском хакатоне «Северстали» и McKinsey по поиску и анализу данных «Что найдет Сервер?».
2. Член коллектива Васильев Евгений занял 1 место во всероссийском хакатоне «Цифровой прорыв. Сезон: искусственный интеллект» в решении кейса Федеральной таможенной службы «Создание интеллектуальной системы поддержки принятия решений, определяющей код товара единой Товарной номенклатуры ТН ВЭД ЕАЭС».
3. Участник научного коллектива Н.В. Громов судил и консультировал на всероссийском чемпионате “Атомскиллс 2022”, проводимым корпорацией “РосАтом”, в отрасли “Машинное обучение и большие данные”.

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 форума молодых учёных государств-участников СНГ “Наука без границ”, прошедшего с 01.11.2022 по 04.11.2022, в рамках IV Санкт-Петербургского аритмологического форума ФГБУ “НМИЦ ССХ им. Алмазова” с 18.05.2022 по 21.05.2022, в рамках форума молодых кардиологов Российского кардиологического общества на базе

ФГБУ "НМИЦ ССХ им. Бакулева" г. Москва 14.05.2022, в рамках V Международного конгресса «Фундаментальная и клиническая электрофизиология. Актуальные вопросы аритмологии» с 7.04.2022 по 8.04.2022, в рамках I Международной научной конференции «Пинские чтения» с 15.09.2022 по 16.09.2022 год.

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 2022 году (2 год выполнения проекта)

1.1. Изучение коллективной динамики и структурообразования в неравновесных средах

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. Продemonстрировано, 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.

[1.1a] 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*, V. 24, P. 043042 (2022). (WoS, Scopus, РИНЦ, Q1).

[1.1b] Болотов М.И., Смирнов Л.А., Осипов Г.В. Динамика многокомпонентных сред нелокально связанных фазовых осцилляторов. // Программы для ЭВМ. (Номер регистрации (свидетельства): 2022610662. Дата регистрации: 13.01.2022.)

[1.1c] Муняев В.О. Синхронизация и хаос в ансамблях связанных ротаторов // Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук, специальность 1.3.4. - радиофизика (дата защиты 15.02.2023).

1.2. Методы машинного обучения и обработки больших массивов данных в кардиологии

1.2.1. Выполнен сбор данных ЭКГ для машинного обучения в объеме 1200 12-канальных ЭКГ покоя и 700 1-канальных ЭКГ длительностью от 1 часа до 20 часов. Выполнена доврачебная разметка собранных данных автоматическими методами с использованием машинного обучения с последующей валидацией врачами функциональной диагностики.

[2.1a] Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Осипов Г.В. "Телемедицинский кардиомониторинг: организационные, правовые и клинические аспекты сегодня." // IV

Санкт-Петербургский аритмологический форум ФГБУ "НМИЦ ССХ им. Алмазова" 18-21.05.2022.

[2.1b] Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Золотых Н.Ю., Осипов Г.В. "Возможности телемедицинского мониторинга сегодня" // IV Санкт-Петербургский аритмологический форум ФГБУ "НМИЦ ССХ им. Алмазова" 18-21.05.2022

[2.1c] Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Осипов Г.В. "Возможности телемедицинского кардиомониторинга" // Симпозиум "Цифровые технологии в кардиологии" Форум молодых кардиологов Российского кардиологического общества на базе ФГБУ "НМИЦ ССХ им. Бакулева" г. Москва 14.05.2022.

[2.1d] Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Золотых Н.Ю., Осипов Г.В. "Машинный анализ ЭКГ и кардиомониторинг- новые возможности скрининга пациентов" // Международный конгресс, посвященный А.Ф. Самойлову «Фундаментальная и клиническая электрофизиология. Актуальные вопросы аритмологии». 7-8 апреля 2022, г. Казань. К 155-летию А.Ф. Самойлова.

1.2.2. Методом картирования биоэлектрической активности изолированного сердца крысы мультиэлектродными матрицами был показан аритмогенный эффект сочетанного воздействия механического и гипоксического воздействия на миокард. Были изучены механизмы активности синусового узла и электрической проводимости миокарда в качестве предикторов жизнеугрожающих аритмий, проявляющиеся в изменениях значений частотных и пространственно-временных параметров работы сердца.

[2.2a] Харьковская Е.Е., Осипов Г.В., Мухина И.В. Изучение механизма развития фибрилляции сердца крысы методом мультиэлектродного картирования. // Ежегодная всероссийская научно-практическая конференция "Кардиология на марше 2022" и 62-я сессия ФГБУ "НМИЦ Кардиологии" Минздрава России. 7-9 июня 2022 г.

[2.2b] Харьковская Е.Е., Осипов Г.В., Мухина И.В. Влияние дигоксина на электрическую активность изолированного сердца крысы.// Российский кардиологический журнал. V Международный конгресс, посвященный А.Ф. Самойлову «Фундаментальная и клиническая электрофизиология. Актуальные вопросы аритмологии». 7-8 апреля 2022, г. Казань. К 155-летию А.Ф. Самойлова. 27(5S), дополнительный выпуск (апрель). С: 55.

1.2.3. Исследованы алгоритмы диагностики синусового ритма и мерцательной аритмии. Среди большого спектра состояний сердечно-сосудистой системы человека, основное внимание было сконцентрировано на детектировании в сигнале большой длительности участков, классифицируемых специалистами как комплексы с превалированием синусового ритма и фибрилляции предсердий (мерцательной аритмии). Разработан механизм поиска указанных патологий на основе модифицированной архитектуры сверточной нейронной сети типа U-net. Модифицированная U-Net архитектура в задаче определения синусового ритма и фибрилляции оказалась предпочтительнее по точности

определения фибрилляции в сравнении с архитектурой CNN-LSTM, а также точность, полнота и F1-score по классу синусового ритма в сравнении с архитектурой глубокой CNN. Стоит отметить, что рассматриваемая в рамках исследования нейронная сеть, после необходимых доработок, будет интегрирована в существующий диагностический комплекс «Кардио-Маяк», разработанный на базе ННГУ им. Лобачевского.

В ходе дальнейших исследований были проанализированы известные свёрточные нейронные сети (а именно DenseNet, ResNet, XceptionNet и классические глубокие CNN), показавшие отличные результаты в анализе изображений. В частности, данные сети были адаптированы под анализ сигналов ЭКГ для проверки эффективности в задаче определения типа ритма (синусовый, фибрилляция). В рамках исследования возможностей различных архитектур нейронных сетей по детектированию фибрилляции в сигнале ЭКГ было установлено, что наиболее подходящей архитектурой для решения задачи выступает DenseNet. Решение интегрировано в диагностическую систему «Кардиомаяк», ориентированную на исследование патологических сигналов электрокардиограмм. Выбор архитектуры обусловлен лучшим соотношением метрик качества и числу обучаемых параметров. Матрица рассогласований имеет долю 4.23% суммарной ошибки. Значения чувствительности и специфичности превышают 95% и 97% соответственно.

[2.3a] Родионов, Д. М., Карчков, Д. А., Москаленко, В. А., Никольский, А. В., Осипов, Г. В., Золотых, Н. Ю. Диагностика синусового ритма и мерцательной аритмии средствами искусственного интеллекта. // Проблемы информатики, V. 1 (54), Pp. 77-88 (2022). [2.3b] Rodionov, D., Karchkov, D., Moskalenko, V., Nikolsky, A., Osipov, G., Zolotykh, N. // Possibility of Using Various Architectures of Convolutional Neural Networks in the Problem of Determining the Type of Rhythm. In International Conference on Neuroinformatics (pp. 362-370). Springer, Cham. (2023).

1.3. Методы машинного обучения и обработки больших массивов данных в нейронауке

1.3.1. Предложен новый подход к анализу экспериментальных данных активности нейронов с использованием современных методов классификации данных. Выявлено, что представление данных в виде средней активности спайковых последовательностей несет информацию о типе нейрональных клеток и позволяет эффективно классифицировать исходные данные. Были получены и успешно протестированы модели классификации последовательностей потенциалов действия нейронов, выделенных из лобной коры крыс и представленных в открытом доступе, для задачи классификации типов нейронов на возбуждающие и тормозные. Предложенные модели анализа временных рядов продемонстрировали хорошее качество классификации. Предложенный подход позволяет использовать модельные данные не только для этого типа данных, но и для других

подобного характера. В дальнейшем планируется сравнить предобработку данных в виде средней активности с предобработкой в виде межспайковых интервалов, а также изучить такое представление данных на устойчивость к шумовому сигналу.

[3.1] Rylov A., Levanova T., Stasenکو S. Classification of Neuron Type Based on Average Activity // International Conference on Neuroinformatics. Springer, Cham. C. 207-213. (2023).

1.3.2. 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, Громовмодель 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 Лъенара, 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.

[3.2a] Gromov N, Gubina E, Levanova T. Loss functions in the prediction of extreme events and chaotic dynamics using machine learning approach. // In 2022 Fourth International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN). Pp. 46-50. IEEE. (2022).

[3.2b] Леванова Т.А., Громов Н.В. «Прогнозирование экстремальных событий и хаотической динамики с использованием подхода машинного обучения» // Программы для ЭВМ. (Номер регистрации (свидетельства): 2022682860. Дата регистрации: 28.11.2022.).

1.4. Исследования и разработки в области классических нейросетей, искусственного интеллекта с точки зрения различных приложений

Разработан подход к задаче обучения без учителя, в рамках которого процесс распознавания агентом изображения представляет собой последовательность экспериментов. Обучение сводится к целенаправленному поиску и сохранению информации о том, какой эксперимент информационно выгодно совершать при какой предыстории экспериментов и их сенсорных результатов. Метод был протестирован на изображениях простой структуры (рукописные символы алфавитов мира). Было показано, что в ходе обучения вырастает структура распознающей последовательности экспериментов, которая интерпретируемо сопоставляется с рукописным символом, который изучался агентом. Разработана формула, сопоставляющая последовательности экспериментов и их результатам проверки число (энергию), которое тем больше, чем более нетривиальные предсказания исполнились в серии экспериментов, поставленных агентом в данной сессии распознавания. В ходе тестирования было показано, что основные положения метода работоспособны, а выделяемые в ходе обучения агента события на изображениях зачастую имеют понятную человеку семантику.

[4.1] Середа Я.А., Никоноров И.Д., Преображенская Ю.Д. Модель обучения агента, основанная на заполнении когнитивной карты // XXIV Международная научно-техническая конференция "НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2022" : сборник научных трудов. – Москва : МФТИ, 2022. с. 279-287

1.5 Дополнительные задачи

В рамках выполнения проекта были также решены следующие дополнительные задачи, в рамках которых методы машинного и глубокого обучения используются для решения ряда физических проблем (в частности, фотоники).

1.5.1. Показано, что сценарии развития модуляционной неустойчивости в нелинейных фотонных решетках определяются топологическими свойствами энергетических зон. Анализ модуляционной неустойчивости позволил установить топологию зонной структуры (тривиальна она или нетривиальна). С помощью методов машинного обучения определены параметры решёток, для которых теоретически описанные алгоритмы извлечения топологического инварианта работают наиболее эффективно.

Проведена классификация топологических фаз фотонных решеток с радиационными потерями с помощью методов машинного обучения, в частности - создана нейронная сеть, определяющая топологические свойства по измерению интенсивности на выходе массива

волноводов с вытекающими каналами после эволюции пространственно локализованного начального распределения, выявлены свойства нейронной сети, а именно установлена ее устойчивости при учете шумов, беспорядка и дальнего действия.

Показано, что каналируемый доменной стенкой импульс в топологической решётке на основе димеризованного графена является нелинейной простой волной с укучающимся по мере распространения задним фронтом. С помощью методов машинного обучения определены параметры системы, при которых учет пространственной дисперсии приводит к формированию квазисолитонных структур. Выполненное численное моделирование реалистичной фотонной решётки показало хорошее согласие с развитой теорией.

Исследованы связанные состояния, локализованные около топологического дефекта в наноструктурированной метаповерхности симметрии C_6 , параметры которой были оптимизированы с помощью методов машинного обучения. Структура спектрально изолированного связанного состояния, интенсивность поля в котором спадает с увеличением расстояния от центра сочленения, получена в полномасштабном численном моделировании метаповерхности, и аналитически проанализирована с помощью метода сильной связи и континуальных уравнений Дирака.

[5.1a] Smolina E.O., Smirnov L.A., Smirnova D.A. Edge states and modulation instability in nonlinear photonic topological lattices // Saint Petersburg OPEN 2022, 24-27 мая, 2022.

[5.1b] E. Smolina, L. Smirnov, D. Smirnova, A. Khorkin, and N. Kulikov. Probing band topology of photonic topological insulators // AIRI Summer School and Conference at Sirius University, 18-26 июля 2022.

[5.1c] Смолина Е.О., Смирнов Л.А., Вычисление топологического инварианта фотонных систем// Международный форум молодых ученых государств-участников СНГ «Наука без границ», Нижний Новгород 1-4 ноября 2022.

[5.1d] Е. О. Смолина, А. С. Хорькин, Д. А. Смирнова, Н. С. Куликов, Л. А. Смирнов, определение топологического фаз фотонных решёток// Школа Нелинейные волны - 2022, Нижний Новгород 7-13 ноября 2022, Тезисы докладов, с. 252-253.

[5.1e] Е. О. Смолина, Л. А. Смирнов, Д. А. Смирнова. Краевые волны и модуляционная неустойчивость в нелинейных фотонных топологических решётках. // Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская фотоника-2022», Красноярск 19-24 сентября 2022, Тезисы докладов (том 2), с.77-78.

[5.1f] Е. О. Смолина, Д. А. Смирнова. Моды топологических дефектов в кекуле-структурированных метаповерхностях. // Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская фотоника-2022», Красноярск 19-24 сентября 2022, Тезисы докладов (том 2), с.90-91.

1.5.2. 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. Эксперименты по обучению полносвязной нейронной сети с различными функциями оптимизации показали перспективность использования квази-ньютоновской функции оптимизации L-BGFS над функциями первого порядка в данной задаче.

Были рассмотрены два способа учета изменения (невязки) сохраняющейся величины в функции потерь нейронной сети. Для одномерной задачи метод плоскостей непрерывности был более эффективен чем интегрирование методом Монте-Карло, который обычно дает преимущество в более высокоразмерных задачах. Введение пяти эквидистантных плоскостей непрерывности уменьшило ошибку оригинального метода примерно на 20%. Было также показано, что сходимость и точность модифицированной версии PINN чувствительны к расположению плоскостей непрерывности – одна удачно выбранная плоскость может уменьшить относительную ошибку нейросетевого решения на 60%.

[5.2a] 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 1, 5-16 (2022) (РИНЦ).

[5.2b] Gurieva J.V., Vasiliev E.P., Smirnov L.A. improvements of accuracy and convergence speed of ai-based solution for the korteweg - de vries equation // Сборник трудов Молодежной школы «Математика и ИТ - вместе в цифровое будущее», Нижний Новгород 25–29 апреля 2022, с. 5-10 (РИНЦ)

[5.2c] Gurieva J.V., Vasiliev E.P., Smirnov L.A. Application of conservation laws to the learning of physics-informed neural networks // Procedia Computer Science, V. 212, Pp. 464-473 (2022) (Scopus).

[5.2d] Ю.В. Гурьева, Е.П. Васильев, Л.А. Смирнов. Применение законов сохранения в нейросетевом решении одномерного нелинейного уравнения Шрёдингера // 22-я международная конференция и молодежная школа “Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии”, Нижний Новгород 14-15 ноября 2022, (секционный доклад).

2. Показатели проекта и представление результатов проекта

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

1. L.A. 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, V. 24, P. 043042 (2022). (WoS, Scopus, РИНЦ, Q1).
2. Gurieva J.V., Vasiliev E.P., Smirnov L.A. Application of conservation laws to the learning of physics-informed neural networks // Procedia Computer Science, V. 212, Pp. 464-473 (2022) (WoS, Scopus).

Прочие публикации в научных журналах, входящих в ядро РИНЦ

1. L.A. 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, V. 24, P. 043042 (2022). (WoS, Scopus, РИНЦ, Q1).
2. Родионов, Д. М., Карчков, Д. А., Москаленко, В. А., Никольский, А. В., Осипов, Г. В., Золотых, Н. Ю. Диагностика синусового ритма и мерцательной аритмии средствами искусственного интеллекта. // Проблемы информатики, V. 1 (54), Pp. 77-88 (2022) (РИНЦ).
3. 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 1, 5-16 (2022) (РИНЦ).
4. Середа Я.А., Никоноров И.Д., Преображенская Ю.Д. Модель обучения агента, основанная на заполнении когнитивной карты // XXIV Международная научно-техническая конференция "НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2022" : сборник научных трудов. – Москва : МФТИ, 2022. с. 279-287 (РИНЦ)
5. Gurieva J.V., Vasiliev E.P., Smirnov L.A. improvements of accuracy and convergence speed of ai-based solution for the korteweg - de vries equation // Сборник трудов Молодежной школы «Математика и ИТ - вместе в цифровое будущее», Нижний Новгород 25–29 апреля 2022, с. 5-10 (РИНЦ)

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

1. Stasenko S., Kovalchuk A., Eremin E., Zarechnova N., Tsirkova M., Permyakov S., Parin S., Poleyaya S. Using machine learning algorithms to determine the post-COVID state of a person by his rhythmogram. arXiv:2212.13878 [eess.SP] (2022)

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

1. Rodionov, D., Karchkov, D., Moskalenko, V., Nikolsky, A., Osipov, G., Zolotikh, N. // Possibility of Using Various Architectures of Convolutional Neural Networks in the Problem of Determining the Type of Rhythm. In International Conference on Neuroinformatics (pp. 362-370). Springer, Cham. (2023). (WoS, Scopus).
2. Rylov A., Levanova T., Stasenko S. Classification of Neuron Type Based on Average Activity // International Conference on Neuroinformatics. Springer, Cham. C. 207-213. (2023). (WoS, Scopus).
3. Gromov N, Gubina E, Levanova T. Loss functions in the prediction of extreme events and chaotic dynamics using machine learning approach. // In 2022 Fourth International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN). Pp. 46-50. IEEE. (2022). (WoS, Scopus).

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

1. Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Осипов Г.В. "Телемедицинский кардиомониторинг: организационные, правовые и клинические аспекты сегодня." // IV Санкт-Петербургский аритмологический форум ФГБУ "НМИЦ ССХ им. Алмазова" 18-21.05.2022.
2. Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Золотых Н.Ю., Осипов Г.В. "Возможности телемедицинского мониторинга сегодня" // IV Санкт-Петербургский аритмологический форум ФГБУ "НМИЦ ССХ им. Алмазова" 18-21.05.2022
3. Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Осипов Г.В. "Возможности телемедицинского кардиомониторинга" // Симпозиум "Цифровые технологии в кардиологии" Форум молодых кардиологов Российского кардиологического общества на базе ФГБУ "НМИЦ ССХ им. Бакулева" г. Москва 14.05.2022.
4. Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Золотых Н.Ю., Осипов Г.В. "Машинный анализ ЭКГ и кардиомониторинг- новые возможности скрининга пациентов" // Международный конгресс, посвященный А.Ф. Самойлову «Фундаментальная и клиническая электрофизиология. Актуальные вопросы аритмологии». 7-8 апреля 2022, г. Казань. К 155-летию А.Ф. Самойлова.
5. Харьковская Е.Е., Осипов Г.В., Мухина И.В. Изучение механизма развития фибрилляции сердца крысы методом мультиэлектродного картирования. // Ежегодная всероссийская научно-практическая конференция "Кардиология на марше 2022" и 62-я сессия ФГБУ "НМИЦ Кардиологии" Минздрава России. 7-9 июня 2022 г.

6. Харьковская Е.Е., Осипов Г.В., Мухина И.В. Влияние дигоксина на электрическую активность изолированного сердца крысы.// Российский кардиологический журнал. V Международный конгресс, посвященный А.Ф. Самойлову «Фундаментальная и клиническая электрофизиология. Актуальные вопросы аритмологии». 7-8 апреля 2022, г. Казань. К 155-летию А.Ф. Самойлова. 27(5S), дополнительный выпуск (апрель). С: 55.
7. Rodionov, D., Karchkov, D., Moskalenko, V., Nikolsky, A., Osipov, G., Zolotykh, N. // Possibility of Using Various Architectures of Convolutional Neural Networks in the Problem of Determining the Type of Rhythm. // Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2022», Москва, 17-21 октября 2022 (секционный доклад).
8. Rylov A., Levanova T., Stasenko S. Classification of Neuron Type Based on Average Activity // Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2022», Москва, 17-21 октября 2022 (секционный доклад).
9. Gromov N, Gubina E, Levanova T. Loss functions in the prediction of extreme events and chaotic dynamics using machine learning approach. // Fourth International Conference "Neurotechnologies and Neurointerfaces" (CNN'2022), Kaliningrad, Russia, 14–16 September 2022 (секционный доклад).
10. Середа Я.А., Никоноров И.Д., Преображенская Ю.Д. Модель обучения агента, основанная на заполнении когнитивной карты // Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2022», Москва, 17-21 октября 2022 (секционный доклад).
11. Smolina E.O., Smirnov L.A., Smirnova D.A. Edge states and modulation instability in nonlinear photonic topological lattices // Saint Petersburg OPEN 2022, 24-27 мая, 2022.
12. E. Smolina, L. Smirnov, D. Smirnova, A. Khorkin, and N. Kulikov. Probing band topology of photonic topological insulators // AIRI Summer School and Conference at Sirius University, 18-26 июля 2022.
13. Смолина Е.О., Смирнов Л.А., Вычисление топологического инварианта фотонных систем// Международный форум молодых ученых государств-участников СНГ «Наука без границ», Нижний Новгород 1-4 ноября 2022.
14. Е. О. Смолина, А. С. Хорькин, Д. А. Смирнова, Н. С. Куликов, Л. А. Смирнов, определение топологического фаз фотонных решёток// Школа Нелинейные волны - 2022, Нижний Новгород 7-13 ноября 2022, Тезисы докладов, с. 252-253.
15. Е. О. Смолина, Л. А. Смирнов, Д. А. Смирнова. Краевые волны и модуляционная неустойчивость в нелинейных фотонных топологических решётках. // Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская фотоника-2022», Красноярск 19-24 сентября 2022, Тезисы докладов (том 2), с.77-78.
16. Е. О. Смолина, Д. А. Смирнова. Моды топологических дефектов в кекуле-структурированных метаповерхностях. // Всероссийская научная конференция с

международным участием «Енисейская фотоника-2022» , Красноярск 19-24 сентября 2022, Тезисы докладов (том 2), с.90-91.

17. Gurieva J.V., Vasiliev E.P., Smirnov L.A. improvements of accuracy and convergence speed of ai-based solution for the korteweg - de vries equation // Сборник трудов Молодежной школы «Математика и ИТ - вместе в цифровое будущее», Нижний Новгород 25–29 апреля 2022, с. 5-10 (РИНЦ)
18. Gurieva J.V., Vasiliev E.P., Smirnov L.A. Application of conservation laws to the learning of physics-informed neural networks // YSC2022 (11th International Young Scientists Conference in Computational Science), Санкт-Петербург 12-17 сентября 2022, (принято в печать, Scopus).
19. Ю.В. Гурьева, Е.П. Васильев, Л.А. Смирнов. Применение законов сохранения в нейросетевом решении одномерного нелинейного уравнения Шрёдингера // 22-я международная конференция и молодежная школа “Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии”, Нижний Новгород 14-15 ноября 2022, (секционный доклад).

Число поданных заявок на получение патента или регистрацию результата интеллектуальной деятельности (РИД)

1. Болотов М.И., Смирнов Л.А., Осипов Г.В. Динамика многокомпонентных сред нелокально связанных фазовых осцилляторов. // Программы для ЭВМ. (Номер регистрации (свидетельства): 2022610662. Дата регистрации: 13.01.2022.)
2. Леванова Т.А., Громов Н.В. «Прогнозирование экстремальных событий и хаотической динамики с использованием подхода машинного обучения» // Программы для ЭВМ. (Номер регистрации (свидетельства): 2022682860. Дата регистрации: 28.11.2022.)

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

В рамках второго этапа работ планируется защита двух диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук:

1. Муняев В.О. Синхронизация и хаос в ансамблях связанных ротаторов // Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук, специальность 1.3.4. - радиофизика (дата защиты 15.02.2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения первого этапа проекта получены следующие результаты.

1. Изучена коллективная динамика и структурообразования в одномерной колебательной среде со связью через диффузное линейное поле.
2. Выполнен сбор данных ЭКГ для машинного обучения в объеме 1200 12-канальных ЭКГ покоя и 700 1-канальных ЭКГ длительностью от 1 часа до 20 часов. Выполнена доврачебная разметка собранных данных автоматическими методами с использованием машинного обучения с последующей валидацией врачами функциональной диагностики.
3. Методом картирования биоэлектрической активности изолированного сердца крысы мультиэлектродными матрицами был показан аритмогенный эффект сочетанного воздействия механического и гипоксического воздействия на миокард.
4. Разработан механизм поиска указанных патологий на основе модифицированной архитектуры сверточной нейронной сети типа U-net. В ходе дальнейших исследований были проанализированы известные свёрточные нейронные сети (а именно DenseNet, ResNet, XceptionNet и классические глубокие CNN), показавшие отличные результаты в анализе изображений. Решение интегрировано в диагностическую систему “Кардиомаяк”, ориентированную на исследование патологических сигналов электрокардиограмм.
5. Предложен новый подход к анализу экспериментальных данных активности нейронов с использованием современных методов классификации данных.
6. Разработана новая, основанная на математической оптимизации, модель ансамблевого глубокого обучения для предсказания сложных паттернов активности в нейродинамике.
7. Разработан подход к задаче обучения без учителя, в рамках которого процесс распознавания агентом изображения представляет собой последовательность экспериментов.
8. Методы машинного и глубокого обучения были использованы для решения ряда физических проблем (в частности, фотоники). Показано, что сценарии развития модуляционной неустойчивости в нелинейных фотонных решетках определяются топологическими свойствами энергетических зон.
9. Рассмотрена задача о распространении оптических импульсов в средах с нелинейностью Керра. Эксперименты по обучению полносвязной нейронной сети с различными функциями оптимизации показали перспективность использования квази-ньютоновской функции оптимизации L-BGFS над функциями первого порядка в данной задаче.

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. 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, V. 24, P. 043042 (2022). (WoS, Scopus, РИНЦ, Q1).
2. Болотов М.И., Смирнов Л.А., Осипов Г.В. Динамика многокомпонентных сред нелокально связанных фазовых осцилляторов. // Программы для ЭВМ. (Номер регистрации (свидетельства): 2022610662. Дата регистрации: 13.01.2022.)
3. Муняев В.О. Синхронизация и хаос в ансамблях связанных ротаторов // Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук, специальность 1.3.4. - радиофизика (дата защиты 15.02.2023).
4. Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Осипов Г.В. "Телемедицинский кардиомониторинг: организационные, правовые и клинические аспекты сегодня." // IV Санкт-Петербургский аритмологический форум ФГБУ "НМИЦ ССХ им. Алмазова" 18-21.05.2022.
5. Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Золотых Н.Ю., Осипов Г.В. "Возможности телемедицинского мониторинга сегодня" // IV Санкт-Петербургский аритмологический форум ФГБУ "НМИЦ ССХ им. Алмазова" 18-21.05.2022
6. Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Осипов Г.В. "Возможности телемедицинского кардиомониторинга" // Симпозиум "Цифровые технологии в кардиологии" Форум молодых кардиологов Российского кардиологического общества на базе ФГБУ "НМИЦ ССХ им. Бакулева" г. Москва 14.05.2022.
7. Никольский А.В., Москаленко В.А., Карчков Д.А., Золотых Н.Ю., Осипов Г.В. "Машинный анализ ЭКГ и кардиомониторинг- новые возможности скрининга пациентов" // Международный конгресс, посвященный А.Ф. Самойлову «Фундаментальная и клиническая электрофизиология. Актуальные вопросы аритмологии». 7-8 апреля 2022, г. Казань. К 155-летию А.Ф. Самойлова.
8. Харьковская Е.Е., Осипов Г.В., Мухина И.В. Изучение механизма развития фибрилляции сердца крысы методом мультиэлектродного картирования. // Ежегодная всероссийская научно-практическая конференция "Кардиология на марше 2022" и 62-я сессия ФГБУ "НМИЦ Кардиологии" Минздрава России. 7-9 июня 2022 г.
9. Харьковская Е.Е., Осипов Г.В., Мухина И.В. Влияние дигоксина на электрическую активность изолированного сердца крысы.// Российский кардиологический журнал. V Международный конгресс, посвященный А.Ф. Самойлову «Фундаментальная и клиническая электрофизиология. Актуальные вопросы аритмологии». 7-8 апреля 2022, г. Казань. К 155-летию А.Ф. Самойлова. 27(5S), дополнительный выпуск (апрель). С: 55.
10. Родионов, Д. М., Карчков, Д. А., Москаленко, В. А., Никольский, А. В., Осипов, Г. В., Золотых, Н. Ю. Диагностика синусового ритма и мерцательной аритмии

средствами искусственного интеллекта. // Проблемы информатики, V. 1 (54), Pp. 77-88 (2022).

11. Rodionov, D., Karchkov, D., Moskalenko, V., Nikolsky, A., Osipov, G., Zolotykh, N. // Possibility of Using Various Architectures of Convolutional Neural Networks in the Problem of Determining the Type of Rhythm. In International Conference on Neuroinformatics (pp. 362-370). Springer, Cham. (2023).
12. Rylov A., Levanova T., Stasenko S. Classification of Neuron Type Based on Average Activity // International Conference on Neuroinformatics. Springer, Cham. C. 207-213. (2023).
13. Gromov N, Gubina E, Levanova T. Loss functions in the prediction of extreme events and chaotic dynamics using machine learning approach. // In 2022 Fourth International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN). Pp. 46-50. IEEE. (2022).
14. Леванова Т.А., Громов Н.В. «Прогнозирование экстремальных событий и хаотической динамики с использованием подхода машинного обучения» // Программы для ЭВМ. (Номер регистрации (свидетельства): 2022682860. Дата регистрации: 28.11.2022.)
15. Середа Я.А., Никоноров И.Д., Преображенская Ю.Д. Модель обучения агента, основанная на заполнении когнитивной карты // XXIV Международная научно-техническая конференция "НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2022" : сборник научных трудов. – Москва : МФТИ, 2022. с. 279-287 (РИНЦ)
16. Smolina E.O., Smirnov L.A., Smirnova D.A. Edge states and modulation instability in nonlinear photonic topological lattices // Saint Petersburg OPEN 2022, 24-27 мая, 2022.
17. E. Smolina, L. Smirnov, D. Smirnova, A. Khorkin, and N. Kulikov. Probing band topology of photonic topological insulators // AIRI Summer School and Conference at Sirius University, 18-26 июля 2022.
18. Смолина Е.О., Смирнов Л.А., Вычисление топологического инварианта фотонных систем// Международный форум молодых ученых государств-участников СНГ «Наука без границ», Нижний Новгород 1-4 ноября 2022.
19. Е. О. Смолина, А. С. Хорькин, Д. А. Смирнова, Н. С. Куликов, Л. А. Смирнов, определение топологического фаз фотонных решёток// Школа Нелинейные волны - 2022, Нижний Новгород 7-13 ноября 2022, Тезисы докладов, с. 252-253.
20. Е. О. Смолина, Л. А. Смирнов, Д. А. Смирнова. Краевые волны и модуляционная неустойчивость в нелинейных фотонных топологических решётках. // Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская фотоника-2022», Красноярск 19-24 сентября 2022, Тезисы докладов (том 2), с.77-78.
21. Е. О. Смолина, Д. А. Смирнова. Моды топологических дефектов в кекуле-структурированных метаповерхностях. // Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская фотоника-2022» , Красноярск 19-24 сентября 2022, Тезисы докладов (том 2), с.90-91.

22. 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 1, 5-16 (2022) (РИНЦ).
23. Gurieva J.V., Vasiliev E.P., Smirnov L.A. improvements of accuracy and convergence speed of ai-based solution for the korteweg - de vries equation // Сборник трудов Молодежной школы «Математика и ИТ - вместе в цифровое будущее», Нижний Новгород 25–29 апреля 2022, с. 5-10 (РИНЦ)
24. Gurieva J.V., Vasiliev E.P., Smirnov L.A. Application of conservation laws to the learning of physics-informed neural networks // Procedia Computer Science, V. 212, Pp. 464-473 (2022) (Scopus).
25. Ю.В. Гурьева, Е.П. Васильев, Л.А. Смирнов. Применение законов сохранения в нейросетевом решении одномерного нелинейного уравнения Шрёдингера // 22-я международная конференция и молодежная школа “Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии”, Нижний Новгород 14-15 ноября 2022, (секционный доклад).