

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе

Лазовской Татьяны Валерьевны

«МЕТОДЫ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ПО РАЗНОРОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ И НЕЙРОМОРФНЫХ МОДЕЛЕЙ»

представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.3.1 — Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика.

Актуальность темы работы. Диссертация посвящена разработке методов моделирования, анализа и управления сложными системами на основе получаемых от них данных. При этом центральное место в работе занимают подходы на основе комбинирования моделей на основе дифференциальных уравнений и нейронных сетей. Выбранная тема работы, несомненно, обладает большой актуальностью. Это обусловлено необходимостью преодоления ограничений классических методов. Традиционные дифференциальные уравнения обеспечивают физическую интерпретируемость, но сталкиваются с вычислительной сложностью при описании многомасштабных или нелинейных процессов, тогда как нейронные сети эффективно аппроксимируют сложные зависимости, но требуют больших данных и страдают от недостатка прозрачности. Интеграция подходов позволяет сохранить физическую обоснованность, улучшив точность и скорость расчётов за счёт адаптивности машинного обучения, что критически востребовано в задачах прогнозирования климата, оптимизации материалов, биомеханики и других областях, где ключевыми являются баланс между объяснимостью и эффективностью. Вероятно, не будет большим преувеличением сказать, что сегодня это направление находится на переднем крае науки и даёт большой вклад как в фундаментальные знания, так и в прикладные разработки.

Практическая значимость. В целом, направление, связанное с моделированием сложных систем, очевидно, не ново и хорошо проработано. Классические и современные методы математической физики представляет достаточно проработанные подходы к созданию и анализу моделей на основе дифференциальных уравнений. Однако известно что имеется целый ряд сложностей с такого рода моделями, включая их точность, возможность адаптации к изменившимся условиям, необходимость значительных вычислительных ресурсов для решения уравнений. В диссертации развивается новый подход в котором традиционные модели на основе дифференциальных уравнений дополняются нейронными сетями, которые обучаются как на основе значений, вычисленных из модельных уравнений, так и на основе непосредственных измерений. Такой комбинированный подход имеет большие практическое значение и большие перспективы. Это открывает путь к созданию интеллект-

туальных систем, способных решать задачи, ранее недоступные из-за сложности данных и динамики процессов. Это имеет большое значение для цифровой экономики, здравоохранения, экологии и других областей, где решения должны быть быстрыми, точными и энергоэффективными.

Научная новизна. В диссертации получен ряд новых результатов. В частности, представлен новый тип нейроморфных моделей, которые в сочетании с традиционными нейронными сетями с прямым распространением образуют новый тип глубоких нейронных сетей с архитектурой, основанной на физических принципах. Также разработан метод их построения на основе преобразования обыкновенных дифференциальных уравнений для решения задач системного анализа. Сформулированы новые алгоритмы управления структурой нейронной сети в процессе обучения на основе предложенных эволюционных алгоритмов, использующих управляемую мутацию и отбор на основе приближения к фронту Парето. Обоснованы критерии выбора обычной или параметрической нейронной сети при моделировании и прогнозировании динамики объектов, изменяющейся по неизвестному закону. Выбор осуществляется на основе сравнительного анализа адаптивных свойств предложенных типов нейронных сетей. Разработан и апробирован метод создания приближённых нейроморфных решений дифференциальных уравнений в частных производных с использованием архитектуры, обусловленной физическими принципами, на примере уравнения теплопроводности и волнового уравнения.

Анализ структуры и содержания диссертации. Структура диссертационной работы соответствует требованиям НАК ИПМаш РАН, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы, занимающих в общей сложности 189 страниц. Список литературы диссертации содержит 171 наименование.

Во введении описана актуальность темы исследования, определена цель и задачи, показаны научная новизна, практическая и научная значимость работы.

В первой главе подчёркивается актуальность развития технологий для получения и обработки данных из окружающей среды и наблюдаемых объектов. Автор отмечает значимость киберфизических систем и концепции цифровых двойников, которые синхронизируются с моделируемыми объектами и отражают их динамические характеристики. Цифровые двойники позволяют проводить цифровые эксперименты, прогнозировать поведение объектов и реализовывать альтернативные сценарии без вмешательства в реальный прототип.

Во второй главе рассматриваются возможности использования нейронных сетей для персонализированных подходов в профилактике осложнений после эндоваскулярных вмешательств. Подчёркивается сложность системы гемостаза, которая имеет иерархическую структуру с множеством компонен-

тов. Анализируются результаты теста генерации тромбина (ТГТ), позволяющего оценить действия всех компонентов системы гемостаза. Проблема осложняется тем, что обычные статистические методы не обнаружили подразумеваемой экспертами связи. Применяется универсальный нейросетевой подход для построения моделей системы гемостаза, учитывающий нелинейную иерархическую природу системы и позволяющий строить индивидуальные модели для каждого клинического случая.

Третья глава посвящена сравнению нейросетевых методов и их модификаций на основе классических подходов для моделирования сложных динамических систем. Представлены принципы построения новых искусственных нейроморфных моделей на основе физики, которые могут быть адаптированы и уточнены с использованием данных измерений и других дополнительных данных. Такой подход имеет существенно более широкую область применения, а с точки зрения современной классификации новой парадигмы моделирования, его можно отнести к сетевым архитектурам, основанным на физике.

В четвертой главе предлагается новый класс нейросетевых моделей с архитектурой, основанной на физике (РВА-PINNs). В предложенном подходе решается проблема первичной инициализации нейронной сети как с точки зрения архитектуры, так и выбора начальных весов.

Пятая глава посвящена разработке новых эволюционных алгоритмов обучения и построения физически-информированных нейронных сетей. Эти алгоритмы направлены на решение некорректно поставленных задач путём построения совокупности решений, близкой к фронту Парето.

В шестой главе впервые проводится сравнительный анализ адаптивных свойств физически-информированных нейросетевых непараметрических (PINN) и параметрических (PPINN) моделей. Оба типа моделей используют физические законы в виде дифференциальных уравнений для обучения. Первые строятся с фиксированными значениями параметров системы, входящих в слагаемые функции потерь, характеризующие точность удовлетворения дифференциальному уравнению и краевым условиям, вторые являются расширением PINN, в котором параметры системы включаются в нейросетевую модель качестве входных переменных. Это позволяет моделировать системы с изменяющимися параметрами в реальном времени и сокращает время вычислений.

В седьмой главе рассматривается построение моделей, основанных на аналитической модификации классических аналитических методов для объектов, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных.

В заключении приведены теоретические и практические результаты, полученные соискателем в процессе выполнения научного исследования.

Диссертационная работа хорошо структурирована. Полученные в ходе исследования результаты изложены грамотным научным языком. Автореферат диссертации адекватно отражает её содержание и даёт полное представление о полученных результатах.

Достоверность и степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. В диссертации представлены методы унификации процедур построения нейросетевых моделей сложных систем. Автор использует как классические, так и современные, хорошо обоснованные подходы к построению и анализу моделей. Численные результаты верифицируются посредством сопоставления с соответствующими аналитическими формулами. Выводы, сделанные в работе, логически вытекают из выполненных исследований. Автор подробно анализирует полученные результаты, что делает их обоснованными и надёжными. В целом, научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной мере обоснованы и достоверны.

Апробация научных результатов и публикации. Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 16 статьях в научных журналах из перечня ВАК, в 14 статьях в зарубежных научных изданиях с индексацией в Scopus и Web Of Science, в 48 сборниках всероссийских и в сборниках международных конференций (итого 78 публикаций).

Замечания и вопросы.

1. Актуальность темы работы не вызывает никакого сомнения, что отражено в настоящем отзыве. Однако в самой диссертации актуальность обсуждается в недостаточной мере.

2. В диссертации недостаточно чётко выделено, в каких научных статьях опубликованы те или иные результаты работы. Хорошая практика, когда в начале каждой главы в виде отдельного абзаца даётся перечень ссылок на статьи автора диссертации, содержащие материал главы. К сожалению, в диссертации во введениях к главам такие перечни отсутствуют. На стр. 73 во введении к главе 4 вместо ссылок на статьи автора написано троеточие: «Результаты были опубликованы в ... и представлены на конференциях». На стр. 98 во введении к главе 5 вместо точной ссылки на работу написано следующее: «Представленный подход и результаты его применения были опубликованы в журнале Computation (Q2)». Читая другие главы, также трудно понять, в каких статьях опубликованы эти материалы.

3. В диссертации не упоминаются и, можно предположить, не используются современные средства для создания нейронных сетей, такие как TensorFlow или PyTorch. Применение инструментов, подобных этим, позволяет существенно уменьшить объём программирования при создании нейронной сети, позволяет воспользоваться автоматическим вычислением градиентов и даёт возможность автоматически задействовать при обучении вычислительные мощности как центрального процессора, так и видеокарты. Поэтому

сегодня исследование и создание нейронных сетей, в том числе с архитектурой, основанной на физике, без подобных инструментов нельзя считать оптимальным подходом.

4. Одна из специфических проблем, возникающих при построении моделей на основе данных, — это переобучение. В том числе она имеет место при создании нейронных сетей. К сожалению, проблеме переобучения и мерам, предпринимаемым для его предотвращения, в диссертации практически не уделяется внимание. В частности, есть основания ожидать, что рассматриваемая в главе 2 нейронная сеть подвержена переобучению в силу того, что обучающий набор данных достаточно мал. Однако в диссертации не обсуждается, как при обучении этой модели контролировалось переобучение и какие меры предпринимались, чтобы его предотвратить. В других главах также нет систематического анализа переобучения рассматриваемых нейросетевых моделей. Упоминается только, что при моделировании уравнений регенерация случайных точек на оси X позволяет его избежать. Однако никаких подтверждений этого не приводится.

5. В главе 2 при постановке задачи без пояснения используются медицинские термины. Например, неясно, что такое «тромбин», что такое «кривая тромбограммы», что такое «пик тромбина» (стр. 43). Все термины, неспецифические для научной специальности работы и родственных ей областей, должны сопровождаться подробными пояснениями.

6. В начале раздела 2.4 сказано, что «Результаты анализа подтвердили предположение, что количественные показатели ТГТ (ЕТР, РЕАК), отражающие интенсивность его формирования, влияют на симптомы возобновления ИБС независимо от версии рецидива». И далее: «Ранее высказанная гипотеза о роли протеина С в развитии осложнений после ЧКВ ... также подтвердилась». Общеизвестно, что главный недостаток нейронных сетей — невозможность объяснить, как был получен тот или иной результат. В настоящее время сформировалось целое направление исследований, называемое интерпретируемым машинным обучением, которое предназначено для того, чтобы математически обоснованно получать такие объяснения. Фактически, результаты, обсуждаемые в разделе 2.4, затрагивают именно эту область — здесь даётся ответ на вопрос, как те или иные входные данные влияют на предсказания сети. Однако результаты приведены без пояснений. Из текста не ясно, как они получены, какие конкретно методы интерпретируемого машинного обучения использовались. Также отсутствуют ссылки на работы, посвящённые методам интерпретируемого машинного обучения.

7. Предлагаемая в главе 3 аналитическая модификация численного метода состоит в том, что после рекуррентных подстановок самой в себя формулы численной схемы на разных шагах получается явная формула для вычисления искомой функции при произвольном значении аргумента x . Обычно задают шаг дискретизации и с этим шагом проходят фиксированный диапазон значений аргумента, а в диссертации фиксируется число шагов и одна из гра-

ниц диапазона считается переменной. Как известно, величина шага определяет точность метода. В предлагаемом методе шаг исчезающе мал вблизи точки x_0 , от которой строится формула, и растёт по мере удаления от неё. Следовательно, и точность аппроксимации получаемой формулы будет убывать по мере удаления от стартовой точки x_0 . Такое свойство нельзя считать достоинством метода. В силу этого не понятно, почему именно он применяется для получения приближенных аналитических формул. Кажется, что, представляя решение в виде разложения по конечному числу ортогональных базисных функций, всегда можно получить приближенную аналитическую формулу, в которой ошибка аппроксимации распределена более или менее равномерно по рассматриваемому диапазону.

8. Эволюционный процесс, обсуждаемый в главе 5, фактически представляет собой генетический алгоритм, адаптированный к решаемой задаче. Однако в диссертации этот термин практически не употребляется, общая идея генетических алгоритмов не обсуждается и нет обзора литературы по генетическим алгоритмам. Единственное упоминание — испорченная ссылка на стр. 102: «Например, в качестве примера можно привести схему процесса оптимизации генетического алгоритма для искусственных нейронных сетей, представленную в [?].».

Замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки проведённого научного исследования и диссертационной работы в целом.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Результаты диссертации могут быть использованы в отраслях, где требуется сочетание точности, адаптивности и физической интерпретируемости моделей. Акцент на автоматизацию и снижение вычислительных затрат делает их особенно востребованными в промышленности, наукоемких технологиях и прикладных исследованиях.

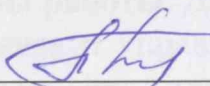
Заключение. Диссертационная работа Лазовской Татьяны Валерьевны «Методы анализа сложных систем по разнородной информации на основе нейросетевых и нейроморфных моделей» представляет собой самостоятельное, завершённое научное исследование, имеющее теоретическую и практическую значимость. Работа выполнена на высоком научно-методическом уровне, полученные результаты отличаются достоверностью и новизной. Представленные в диссертации выводы имеют практическое значение и могут быть использованы в промышленности. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертационной работы. Работа соответствует паспорту научной специальности 2.3.1 — Системный анализ, управление и обработка информации, статистика по пунктам 1, 2, 4, 5, 7, 11, 12.

Работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук.

Считаю, что автор диссертационной работы Лазовская Татьяна Валерьевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 — Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент: главный научный сотрудник, заведующий лабораторией теоретической нелинейной динамики Саратовского Филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, доцент, доктор физико-математических наук по специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

«17» апреля 2025



Купцов Павел Владимирович.

Почтовый адрес: 410019, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38.

Телефон: +7 (8452) 39-12-38.

Адрес электронной почты: kupav@mail.ru

Подпись П. В. Купцова заверяю
Учёный секретарь секции Ученого
совета ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
в Саратовском филиале, к.ф.-м.н.

«17» апреля 2025



Фатеев Д. В.