ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

профессора Высшей школы технологий искусственного интеллекта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктора технических наук, профессора Большакова Александра Афанасьевича на диссертацию Мингалиева Заида Зульфатовича на тему «Методы и модели адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы диссертации

В диссертационной работе Мингалиева Заида Зульфатовича решается задача прогнозирования временных рядов, характеризующих динамику сложных процессов, в условиях их неоднородности и ограниченных вычислительных ресурсов. Подобные данные широко используются при мониторинге технических систем, управлении беспилотными аппаратами, моделировании транспортных процессов, а также при обработке физиологических показателей. При этом реальные временные ряды, как правило, не являются однородными: их характеристики могут изменяться во времени в зависимости от режима функционирования объекта и воздействия внешних факторов.

Использование таких данных для прогнозирования сопровождается рядом существенных сложностей. Временные ряды могут содержать шумы, пропуски и аномальные значения, характеризоваться нелинейными зависимостями и различной динамикой на отдельных участках. В результате модель, хорошо описывающая один режим поведения объекта, может недостаточно точно работать в другом. Дополнительное ограничение возникает при использовании современных нейросетевых методов, т.к. их обучение и применение обычно требуют значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет их использование в системах реального времени и на вычислительно ограниченных устройствах.

Автором предлагается комплексный подход к решению этой важной научно-технической задачи, основанный на предварительной структуризации временных данных. В работе предложен метод адаптивной кусочно-линейной аппроксимации с динамическим выбором шага, позволяющий уменьшить объем обрабатываемых данных при сохранении заданной точности, а также метод кластеризации временных рядов по их статистическим и динамическим характеристикам. На основе сформированных однородных групп используются специализированные нейросетевые модели прогнозирования, что позволяет учитывать

особенности различных типов временных рядов и снижать при этом вычислительную сложность.

Практическая значимость поставленной задачи подтверждается проведенной в диссертации апробацией разработанных методов на данных различной природы. В частности, рассмотрены временные ряды, связанные с управлением беспилотными аппаратами, моделированием траекторий движения автомобилей и прогнозированием уровня глюкозы. Разработанные методы и модели реализованы в виде программного комплекса, обеспечивающего последовательную обработку, структуризацию, кластеризацию и прогнозирование временных данных.

Следует отметить, что существующие методы позволяют решать отдельные задачи кластеризации, аппроксимации и прогнозирования временных рядов, однако их совместное применение для адаптивного прогнозирования неоднородных данных при ограниченных вычислительных ресурсах исследовано недостаточно. В этой связи разработка методов, позволяющих одновременно учитывать структурную неоднородность временных рядов, повышать точность прогнозирования и сокращать вычислительные затраты, представляет актуальную научную задачу. Поэтому выбор темы диссертационной работы Мингалиева Заида Зульфатовича представляется обоснованным и своевременным, а проведенное исследование актуальным.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы из 118 наименований на 15 страницах и 2-х приложений на 9 страницах. Работа изложена на 163 страницах, из них 139 страниц основного текста, включающего 38 рисунков и 33 таблицы. Приложения содержат документы, подтверждающие практическую значимость работы.

Во введении обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы цель и задачи исследования, обозначены научная новизна и практическая значимость, определены основные положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения об апробации полученных результатов.

Первая глава носит обзорный характер. В главе выполнен анализ существующих подходов к кластеризации временных рядов, включая методы на основе расстояний, вероятностные методы и методы глубокого обучения. Для прогнозирования рассмотрены классические статистические модели, методы машинного обучения и глубокие нейросетевые архитектуры. Проведенный анализ позволяет автору выделить ограничения применения

универсальных моделей к временным рядам различной структуры и обосновать необходимость предварительной структуризации данных перед построением специализированных прогнозных моделей. На этой основе сформулирована задача разработки взаимосвязанного комплекса методов предварительной обработки, кластеризации и прогнозирования временных рядов.

Во второй главе представлены основные теоретические результаты диссертации. В разделе 2.1 разработан метод адаптивной кусочно-линейной аппроксимации, предусматривающий динамическое определение длины сегментов временного ряда. Такой подход позволяет получать компактное представление исходных данных с сохранением заданной точности. В разделе 2.2 сформирован метод построения признакового описания временных рядов с последующей нормализацией и кластеризацией полученных векторов с использованием DBSCAN. Особенностью подхода является совместное использование статистических показателей и характеристик динамики временных рядов. В разделе 2.3 предложена схема построения специализированных прогнозных моделей: после предварительной обработки и кластеризации для каждого выделенного кластера формируется собственная LSTM-модель, которая в дальнейшем используется для прогнозирования новых временных рядов. Предложенные методы прошли апробацию на нескольких наборах данных, результаты которой приведены в четвертой главе.

В третьей главе диссертации представлена программная реализация разработанных методов и алгоритмов. Описаны отдельные программные компоненты для адаптивной аппроксимации, обработки данных и прогнозирования временных рядов с предварительной кластеризацией. Для модуля аппроксимации реализованы различные режимы формирования сегментов и средства формирования результатов обработки. Программный комплекс прогнозирования объединяет этапы предварительной обработки данных, построения признакового описания, кластеризации, обучения LSTM-моделей и прогнозирования новых временных рядов. Описаны архитектура программы и взаимодействие ее основных компонентов, что обеспечивает возможность практической реализации предложенной методики.

В четвертой главе представлены результаты вычислительных экспериментов, направленных на получение оценки применимости и точности разработанных методов и алгоритмов в различных предметных областях. Для метода адаптивной кусочно-линейной аппроксимации исследованы данные, связанные с управлением летательно-подводным аппаратом типа окто-квадрокоптера, динамикой концентрации экзогенного инсулина и траекторией движения автомобиля. Отдельная серия

экспериментов посвящена использованию кластеризации и специализированных LSTM-моделей при формировании нейросетевого контроллера автопилота легкого самолета и прогнозировании уровня глюкозы по данным мониторинга пациентов с сахарным диабетом 1-го типа. Полученные результаты сопоставлены с альтернативными вариантами прогнозирования, что позволяет оценить влияние предварительной кластеризации на качество итогового прогноза.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы, намечены перспективные направления дальнейших исследований.

Содержание диссертации полностью соответствует сущности проведенного исследования и отражает решение поставленных перед автором задач. Результаты исследования представляют завершенную научно-квалификационную работу, описанную грамотным научным языком. Диссертация отличается четкой структурой, логической последовательностью и целостностью изложения материала. Автореферат соответствует диссертации, отражает содержание работы и достигнутые результаты. Диссертация и автореферат, выполнены в соответствии с требованиями ВАК.

Научная новизна исследования и полученных результатов

Наиболее существенными новыми научными результатами, полученными в диссертационном исследовании, являются следующие:

1. Метод адаптивной кластеризации временных рядов, основанный на совместном использовании статистических и динамических характеристик исследуемых последовательностей. Его отличительной особенностью является формирование групп временных рядов с учетом особенностей их поведения, что позволяет осуществлять последующее прогнозирование с использованием моделей, соответствующих структуре выделенных групп.

2. Метод адаптивной кусочно-линейной аппроксимации временных рядов, основанный на разбиении исходной последовательности на линейные сегменты переменной длины с учетом заданного требования к точности. Его отличительной особенностью является возможность сокращения объема представления исходных данных при сохранении основных особенностей их структуры, что позволяет снизить вычислительные затраты при последующей обработке и прогнозировании.

3. Гибридная нейросетевая модель прогнозирования временных рядов, объединяющая методы предварительной обработки и кластеризации данных с LSTM-моделями, формируемыми для выделенных групп временных рядов.

Ее отличительной особенностью является учет результатов предварительной структуризации данных при построении прогнозирующих моделей, что позволяет повысить качество прогнозирования и снизить вычислительную сложность по сравнению с применением единой модели для всего множества временных рядов;

4. Архитектура программного комплекса для прогнозирования временных рядов, включающая взаимосвязанные программные модули адаптивной аппроксимации, кластеризации и нейросетевого прогнозирования. Ее отличительной особенностью является модульная организация вычислительных процедур и возможность настройки отдельных компонентов в зависимости от характеристик обрабатываемых данных, что обеспечивает практическую реализацию разработанных методов и проведение вычислительных экспериментов;

5. Методика и результаты численных экспериментов по прогнозированию неоднородных временных рядов с последующим анализом полученных результатов. Отличительной особенностью проведенных исследований является комплексное сопоставление точности прогнозирования и вычислительной эффективности различных вариантов обработки и моделирования временных рядов, что позволяет оценить работоспособность и практическую применимость разработанных методов и моделей.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций. Выводы и основные положения, выносимые автором на защиту, логично следуют из проведенного исследования. Достоверность полученных результатов обеспечена корректной постановкой задач, детальным анализом предложенных методов и алгоритмов и подтверждена результатами проведенных экспериментальных исследований.

Практическая значимость полученных соискателем результатов подтверждается:

- поддержкой диссертационных исследований Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках исполнения Государственного Задания;
- использованием результатов исследования в работе Сектора безопасности дорожного движения и контрольно-надзорной деятельности Министерства Транспорта и дорожного хозяйства Республики Татарстан;
- использованием результатов диссертационного исследования при реализации научного направления деятельности Центра разработки и

сопровождения информационных систем ГБУ «Безопасность дорожного движения»;

- использованием результатов в работе Научно-производственного центра беспилотных авиационных систем (НПЦ БАС) Татарстана;
- использованием результатов исследования в работе отделения эндокринологии ДРКБ РТ;
- внедрением результатов диссертационного исследования учебный процесс ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»;
- наличием четырех свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Замечания по диссертационной работе

По содержанию диссертационной работы имеются следующие вопросы и замечания.

1. При обучении специализированных LSTM-моделей для каждого кластера в рассматриваемом эксперименте используется один случайно выбранный временной ряд (стр. 124-127). Неясно, насколько один временной ряд способен адекватно представить динамические особенности всего кластера. Интерес представляет исследование зависимости качества прогнозирования от количества временных рядов, используемых при обучении модели внутри каждого кластера.

2. В работе приведено сравнение предложенного комбинированного метода с LSTM без кластеризации, а также с вариантами кластеризации на основе евклидова расстояния и параметров ARIMA (с. 133-135). Однако из этих результатов сложно определить факторы, которые вносят определяющий вклад в повышение точности: переход к признаковому описанию данных, кластеризация, использование отдельных LSTM-моделей. Целесообразно осуществить серию экспериментов с последовательным исключением отдельных компонентов предлагаемой схемы и оценкой изменения точности.

3. В эксперименте с прогнозированием сахара крови у пациентов с диабетом датасет строится на данных 8 дней, в результате формируется 16 временных рядов (с. 123, 126, 133). Возможно, автору следовало использовать более репрезентативный датасет для проверки сравнительной эффективности разработанных им методов.

4. Тестирование разработанного программного комплекса

представлено не полной мере. В работе показаны примеры функционирования отдельных модулей и результаты их применения в вычислительных экспериментах, однако не приведена оценка работы комплекса при различных вариантах входных данных, включая некорректные и неполные данные, а также при увеличении объема обрабатываемой информации.

5. Замечания по оформлению диссертации:

5.1. На рис. 1, 2 (с. 56-57), иллюстрирующих архитектуру LSTM-модели и функционирование предлагаемой гибридной модели прогнозирования, недостаточно явно выделены элементы, являющиеся собственно авторской разработкой, и стандартные компоненты LSTM-архитектуры.

5.2. В тексте встречаются опечатки и несогласованность форм. Например, на стр. 52: «с схожими» вместо «со схожими», на стр. 79: «будет построено две модели», вместо «будут построены две модели», и пр.

В целом вышеуказанные замечания не снижают ценности полученных теоретических и практических результатов, общей оценки качества проведенного исследования. Диссертационная работа отличается внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выносимые на защиту, что подтверждает существенный личный вклад автора в развитие науки.

Заключение

Диссертация Мингалиева Заида Зульфатовича на тему «Методы и модели адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, в т.ч. по критериям, указанным в разделе II Положения.

На основе вышеизложенного считаю, что представленная к защите диссертация Мингалиева Заида Зульфатовича на соискание ученой степени кандидата технических наук является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное народно-хозяйственное значение для развития вычислительных методов при адаптивном прогнозировании неоднородных временных рядов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов в различных предметных областях, что соответствует критерию п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а соискатель заслуживает

присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:
профессор Высшей школы технологий
искусственного интеллекта
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»,
доктор технических наук, профессор

Большаков Александр Афанасьевич

«19» октября 2026

Докторская диссертация защищена по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)

Даю согласие на обработку персональных данных.

Сведения об оппоненте:
ФИО: Большаков Александр Афанасьевич
Ученая степень: доктор технических наук
Ученое звание: профессор по кафедре систем искусственного интеллекта
Почтовый адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 литера Б
Телефон: +7-931-541-41-59
Адрес электронной почты: bolshakov_aa@spbstu.ru
Организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
Должность: профессор Высшей школы технологий искусственного интеллекта

Подпись Большакова А.А.
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист
по кадрам
«19» 10 2026

Вход. № 05-9204
«26» 10 2026 г.
подпись