В диссертационный совет
24.2.312.08, созданный на базе
ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский
технологический университет»

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, заведующего кафедрой «Программное обеспечение автоматизированных систем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» Орловой Юлии Александровны
на диссертационную работу Мингалиева Заида Зульфатовича
«Методы и модели адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов» по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертационного исследования

Задачи анализа и прогнозирования процессов, изменяющихся во времени, возникают в различных областях науки и техники. Реальные временные ряды, как правило, характеризуются неоднородностью, изменчивостью, шумами и пропусками данных. При этом закономерности, характерные для различных участков ряда или режимов функционирования объекта, могут существенно различаться, что затрудняет применение единой модели и снижает точность прогнозирования.

Для решения подобных задач применяются статистические методы, методы машинного обучения и нейросетевые модели. Однако универсальные модели не всегда способны учитывать особенности неоднородных временных рядов, а современные глубокие нейросетевые модели требуют значительных вычислительных ресурсов. Это особенно существенно для систем реального времени и вычислительных устройств с ограниченными ресурсами.

Диссертационная работа Мингалиева Заида Зульфатовича посвящена разработке методов и моделей адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Разработанные методы реализованы в виде программного комплекса и апробированы на временных рядах из различных предметных областей. Автор предлагает учитывать структурные особенности временных рядов посредством их предварительной кластеризации по статистическим и динамическим характеристикам, а также адаптивной кусочно-линейной аппроксимации. Для выделенных групп формируются специализированные нейросетевые модели прогнозирования на основе LSTM. Такой подход позволяет адаптировать

прогнозирование к характеру данных, повысить точность и одновременно сократить вычислительные затраты.

Объектом исследования диссертации являются временные ряды, характеризующие динамику сложных процессов, предметом исследования - методы и модели адаптивного прогнозирования временных рядов на основе глубокого обучения.

Исходя из вышесказанного, диссертационная работа Мингалиева Заида Зульфатовича, направленная на разработку методов адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов с учетом требований к точности и вычислительной эффективности, является актуальной.

Общая характеристика работы

Диссертация включает введение, 4 главы, заключение, список использованной литературы из 118 наименований, 38 рисунков, 33 таблицы и приложения. Полный объем диссертации составляет 163 страницы.

Во *Введении* обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, приведены положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также сведения о достоверности, апробации и практической реализации полученных результатов. Автором обоснована необходимость разработки методов адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов, учитывающих их изменчивость, наличие шумов и пропусков данных, а также ограничения по вычислительным ресурсам.

В *первой главе* диссертации проведён анализ существующих подходов к кластеризации и прогнозированию временных рядов. Рассмотрены статистические методы, методы машинного обучения и нейросетевые подходы к прогнозированию, а также методы кластеризации временных данных. Проанализированы особенности применения указанных методов к временным рядам различной структуры и длины, рассмотрены проблемы обработки неоднородных данных и ограничения существующих подходов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. На основании проведённого анализа автором сформулирована задача разработки методов адаптивной обработки, кластеризации и прогнозирования неоднородных временных рядов с использованием математического моделирования и нейросетевых методов.

Во *второй главе* представлены разработанные автором методы и модели. В разделе 2.1 предложен метод адаптивной кусочно-линейной аппроксимации временных рядов, позволяющий формировать сегменты переменной длины с учетом заданной точности аппроксимации. В разделе 2.2 разработан метод кластеризации временных рядов на основе их статистических и динамических характеристик с использованием алгоритма DBSCAN. Для формирования

признакового описания временных рядов используются, в частности, характеристики положения, рассеяния и формы распределения, автокорреляционные и динамические характеристики. В разделе 2.3 предложена гибридная модель прогнозирования, объединяющая предварительную обработку и кластеризацию временных рядов с обучением специализированных LSTM-моделей для сформированных кластеров. Таким образом, в главе сформирован комплекс взаимосвязанных методов, направленных на повышение точности прогнозирования и снижение вычислительных затрат.

В *третьей главе* представлена программная реализация разработанных методов и алгоритмов. Описана архитектура комплекса программ, обеспечивающего выполнение этапов предварительной обработки данных, адаптивной аппроксимации, формирования признакового описания, кластеризации и нейросетевого прогнозирования. Представлены основные программные модули, алгоритмы их взаимодействия и последовательность обработки данных. Разработанное программное обеспечение предназначено для проведения вычислительных экспериментов и практического применения предложенных методов прогнозирования временных рядов.

В *четвёртой главе* представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию разработанных методов и моделей. Проведены исследования точности адаптивной кусочно-линейной аппроксимации, эффективности кластеризации временных рядов и качества предложенной гибридной модели прогнозирования. Рассмотрены прикладные задачи, связанные с прогнозированием физиологических временных рядов, в том числе данных мониторинга уровня глюкозы, а также с моделированием траекторий и управлением беспилотными летательными аппаратами. Полученные результаты сопоставлены с результатами известных методов, что позволяет оценить эффективность предложенных решений. Практическая реализация результатов также подтверждена их использованием в задачах моделирования транспортных потоков, прогнозирования гликемии и моделирования управления беспилотными летательными аппаратами.

В заключении обобщены полученные в работе научные и практические результаты, сформулированы направления перспективных исследований.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11–2011 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления», а также требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской

Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093 (в ред. приказа Минобрнауки России от 14 декабря 2023 г. № 1186).

В целом представленные материалы диссертационной работы позволяют достаточно полно оценить объем, сложность и актуальность проведенного исследования.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций является достаточно высокой и подтверждается корректным применением методов математической статистики, математического и нейросетевого моделирования, кластерного анализа, методов аппроксимации и регрессии, а также методов оптимизации и объектно-ориентированного программирования. Обоснованность полученных результатов подтверждается проведенными вычислительными экспериментами, в ходе которых исследованы предложенные методы адаптивной кусочно-линейной аппроксимации, кластеризации временных рядов и гибридного нейросетевого прогнозирования. Практическая значимость результатов дополнительно подтверждается их апробацией и использованием в:

- ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева КАИ»: в учебном процессе при подготовке магистров по направлению «Прикладная математика и информатика» при проведении лекционных и лабораторных занятий по дисциплинам «Компьютерное моделирование процессов и систем», «Теория принятия решений» и «Теория игр и исследование операций»;
- Секторе безопасности дорожного движения и контрольно-надзорной деятельности Министерства транспорта и дорожного хозяйства Республики Татарстан: в системе поддержки принятия решений для моделирования траекторий движения транспортных потоков на дорожных развязках сложных конфигураций;
- Центре разработки и сопровождения информационных систем ГБУ «Безопасность дорожного движения»: при разработке научных и практических основ моделирования транспортных потоков;
- отделении эндокринологии ДРКБ МЗ РТ: в системе поддержки принятия решений для прогнозирования уровня гликемии у больных инсулинозависимым сахарным диабетом, получающих помповую инсулинотерапию;
- Научно-производственном центре беспилотных авиационных систем Татарстана: для имитации сложных траекторий движения и моделирования управления беспилотными летательными аппаратами.

Научные положения и практические результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем прогнозирования и поддержки принятия решений, работающих с

неоднородными временными рядами, в различных предметных областях, включая транспортные системы, медицинский мониторинг и беспилотные технические системы. Полученные результаты также представляют интерес для научно-исследовательских организаций и предприятий, решающих задачи обработки, кластеризации и прогнозирования временных данных в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, а также для использования в образовательном процессе при подготовке специалистов в области математического моделирования, анализа данных и искусственного интеллекта.

Достоверность и новизна научных положений и рекомендаций

Достоверность научных положений и рекомендаций подтверждается результатами вычислительных экспериментов и практического использования, а также соответствием теоретических обоснований методов и алгоритмов известным положениям других авторов. Разработанное соискателем алгоритмическое и программное обеспечение прогнозирования неоднородных временных рядов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов позволяет успешно решать поставленную задачу, следовательно, является эффективным.

Новизна научных положений диссертационного исследования заключается в разработанных методе адаптивной кластеризации временных рядов, позволяющем группировать временные ряды различной длины и структуры для повышения точности последующего прогнозирования, и методе адаптивной кусочно-линейной аппроксимации, направленном на снижение вычислительных затрат. Научную новизну также представляет разработанная гибридная нейросетевая модель прогнозирования, сочетающая кластеризацию временных рядов и специализированные LSTM-модели, архитектура комплекса программ, обеспечивающая реализацию предложенных методов и алгоритмов, а также проведенные на их основе вычислительные эксперименты.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертационного исследования

Значимость для науки выводов и рекомендаций диссертационного исследования представляют разработанные методы адаптивной кусочно-линейной аппроксимации и кластеризации неоднородных временных рядов, учитывающие их статистические и динамические характеристики, а также гибридная модель прогнозирования на основе кластеризации и специализированных LSTM-моделей. Предложенные решения направлены на повышение точности прогнозирования и снижение вычислительной сложности обработки временных рядов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Выложено на сайт ВАК

Значимость для практики выводов и рекомендаций диссертационного исследования заключается в разработанном комплексе программ, реализующем предложенные методы, модели и алгоритмы адаптивной аппроксимации, кластеризации и прогнозирования временных рядов, а также в возможности их применения в системах прогнозирования и поддержки принятия решений. Практическая значимость разработок подтверждена результатами вычислительных экспериментов и использованием полученных результатов при решении задач прогнозирования физиологических временных рядов, моделирования транспортных потоков и управления беспилотными летательными аппаратами.

Оценка содержания и авторского вклада. Соответствие работы паспорту специальности

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

2. «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий». Разработаны, обоснованы и протестированы вычислительные методы адаптивной кластеризации и кусочно-линейной аппроксимации временных рядов, предназначенные для повышения эффективности их последующего прогнозирования в условиях ограниченных вычислительных ресурсов (п. 2.1, 2.2, 4.1, 4.2).

3. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента». Разработанные методы и алгоритмы реализованы в виде комплекса программ, включающего средства предварительной обработки, адаптивной кусочно-линейной аппроксимации, кластеризации и прогнозирования временных рядов. На базе разработанного программного комплекса проведены вычислительные эксперименты по оценке эффективности предложенных методов и возможности их практического использования (п. 3.1–3.5, 4.1, 4.2).

8. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента». Разработана гибридная нейросетевая модель прогнозирования временных рядов, объединяющая адаптивные методы предварительной обработки и кластеризации временных рядов с использованием специализированных LSTM-моделей для отдельных кластеров. Исследована эффективность предложенного подхода на различных прикладных задачах прогнозирования временных рядов (п. 2.1–2.3, 4.1, 4.2).

9. «Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий». Проведены численные эксперименты по исследованию эффективности методов адаптивной кусочно-линейной аппроксимации, кластеризации и гибридного нейросетевого прогнозирования с последующим анализом и сравнением полученных результатов, включая оценку точности прогнозирования и вычислительной эффективности предложенных решений (п. 4.1, 4.2).

Общие замечания по диссертационной работе:

1. Для восстановления пропущенных значений во временном ряде используется линейная или кубическая интерполяция между соседними точками (стр. 48–49). Остается неясным, насколько хорошо такой способ работает при наличии длинных участков пропущенных данных, либо при большом их количестве. Целесообразно было бы оценить, при какой длительности или количестве пропусков интерполяция становится неприменимой.

2. В диссертации предполагается, что временные ряды, отнесенные к одному кластеру, имеют достаточно близкие особенности динамики, что позволяет обучать для каждого кластера одну специализированную LSTM-модель (стр. 53–56). Однако никакие метрики для оценки степени однородности кластеров не приводятся. Также не ясно, насколько однородными должны быть временные ряды внутри кластера, чтобы использование одной модели оставалось эффективным.

3. В методе адаптивной кусочно-линейной аппроксимации используется параметр точности ε, определяющий условие завершения формирования очередного сегмента (стр. 45–47). При этом в диссертации не раскрыты ни способ выбора данного параметра, ни обоснование его конкретного значения для рассматриваемых прикладных задач.

4. Отсутствует обоснование выбора программных инструментов и сред для реализации компонентов программного комплекса (стр. 60–68).

5. Замечания по терминологии и оформлению диссертации и автореферата:

5.1. В диссертации для обозначения одного и того же набора характеристик временных рядов используются формулировки «статические и динамические характеристики» и «статистические и динамические характеристики» (с. 40, 47–49). Необходимо унифицировать терминологию и четко определить состав и смысл используемых групп характеристик.

5.2. Для обозначения предлагаемого подхода, объединяющего кластеризацию временных рядов и специализированные LSTM-модели, используется термин «гибридная нейросетевая модель» (с. 53–56). При этом не вполне очевидно, какая именно часть предложенного решения является

гибридной и какие компоненты образуют единую модель. Необходимо более четко определить содержание термина «гибридная модель» применительно к предлагаемому подходу.

5.3. В диссертации смешиваются понятия «входные данные», «выходные данные», «параметры» и «характеристики» методов. Не всегда понятно, какие величины являются исходными данными, какие задаются как параметры алгоритма, а какие являются результатами его работы (с. 48–52, 60–70, 124–133). Необходимо четко разграничить указанные понятия и унифицировать их использование в тексте диссертации. В автореферате аналогичная терминология используется при описании разработанных методов и программного комплекса (с. 11–13).

5.4. На рис. 9 стр. 68 диссертации (рис. 2 стр. 13 автореферата) направление информационных потоков представлено неоднозначно: одна линия объединяет передачу данных в LSTM-модель и возврат результата прогнозирования. Следует разделить эти потоки на две стрелки с отдельными подписями.

5.5. В тексте диссертации присутствуют опечатки на стр. 13, 52, 79, 89, 92 и др.

5.6. В тексте автореферата присутствуют опечатки на стр. 7, 20 и др.

Высказанные вопросы, замечания и пожелания не влияют на общую положительную оценку работы и не ставят под сомнение достигнутые теоретические и практические результаты.

Соответствие работы требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям

Считаю, что диссертационная работа Мингалиева Заида Зульфатовича «Методы и модели адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов» соответствует паспорту специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в т. ч. 5 статей в российских рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК, 1 публикация, индексируемая в Scopus, 6 публикаций в других журналах и материалах научных конференций. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

В диссертационной работе содержатся необходимые обязательные ссылки на источники заимствования, а также отметки об авторстве новых научных результатов с указанием личного вклада. Таким образом, работа соответствует пункту 14 Положения о присуждении ученых степеней.

Диссертация Мингалиева Заида Зульфатовича «Методы и модели адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов в условиях

ограниченных вычислительных ресурсов» является завершенной самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача разработки методов и моделей адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. В работе разработаны метод адаптивной кусочно-линейной аппроксимации временных рядов, метод их кластеризации с учетом статистических и динамических характеристик, гибридная нейросетевая модель прогнозирования на основе кластеризации и специализированных LSTM-моделей, а также комплекс программ, реализующий предложенные методы и алгоритмы. Полученные результаты подтверждены вычислительными экспериментами и практическим использованием разработанных решений в различных предметных областях. На основании вышесказанного можно утверждать, что работа удовлетворяет требованиям пункта 9, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и изложенным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), а ее автор Мингалиев Заид Зульфатович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Оппонент согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и дальнейшую их обработку.

Официальный оппонент:
заведующая кафедрой «Программное обеспечение автоматизированных систем»
ФГБОУ ВО «ВолгГТУ»,
доктор технических наук
(05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)),
доцент

Орлова Юлия Александровна
15 . 10 .2026

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»
Адрес: Россия, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, дом 28, п. 905
Тел.: +7 (8442) 24-84-86, факс: +7 (8442) 24-84-98
E-mail: yulia.orlova@gmail.com

Подпись официального оппонента проф. Ю.А. Орловой заверяю

ЗАВЕРЯЮ
Начальник отдела

Вход. № 05-9208
« 27 » 10 2026 г.