УТВЕРЖДАЮ
Проректор по проектной деятельности
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
_____ М-А.Х. Осмаев
«09» сентября 2026 г.

# ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственный университет» на диссертационную работу Мингалиева Заида Зульфатовича «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 исследования

В настоящее время анализ и прогнозирование временных рядов является важной составляющей решения широкого круга научных и прикладных задач, связанных с исследованием процессов, изменяющихся во времени. Временные ряды используются при мониторинге технических систем, управлении транспортными и беспилотными аппаратами, обработке медицинской информации, анализе производственных процессов и в других предметных областях. При этом реальные данные, как правило, не являются однородными и стационарными: характер их изменения может зависеть от режима функционирования объекта, внешних воздействий и текущего состояния системы. Кроме того, измерения могут содержать шумы, пропуски и аномальные значения, а закономерности, характерные для одного участка временного ряда, могут существенно отличаться от закономерностей на другом участке. Такие особенности затрудняют построение универсальных моделей, обеспечивающих требуемую точность прогнозирования.

Одним из основных подходов к исследованию динамики процессов при наличии экспериментальных или наблюдаемых данных является математическое и компьютерное моделирование. В задачах прогнозирования на основе последовательности предшествующих наблюдений формируется модель, позволяющая оценивать последующее поведение исследуемого объекта. Современные методы машинного обучения и глубокого обучения, в частности рекуррентные нейронные сети и LSTM-модели, позволяют учитывать сложные нелинейные и долговременные зависимости во временных данных. Однако применение единой модели к неоднородным временным рядам не всегда позволяет получить требуемое качество прогнозирования. При существенном различии структуры и характера поведения отдельных рядов универсальная модель должна одновременно учитывать различные

закономерности, что может приводить к снижению точности прогноза. Кроме того, глубокие нейросетевые модели характеризуются значительной вычислительной сложностью, что ограничивает возможность их использования в системах реального времени и на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Одним из возможных способов повышения эффективности прогнозирования неоднородных временных рядов является предварительная структуризация исходных данных. В частности, кластеризация временных рядов по их статистическим и динамическим характеристикам позволяет выделить группы рядов со сходным характером поведения и построить для каждой группы специализированную прогнозную модель. Дополнительное снижение вычислительной нагрузки может быть достигнуто за счет адаптивной аппроксимации временных данных с сохранением наиболее существенных особенностей их структуры. Такой подход позволяет перейти от обработки исходных последовательностей большой размерности к их более компактному представлению и тем самым уменьшить объем последующих вычислений. В диссертации именно сочетание адаптивной аппроксимации, кластеризации и специализированных нейросетевых моделей рассматривается как основа повышения точности и вычислительной эффективности прогнозирования.

Известные методы позволяют решать отдельные задачи обработки и прогнозирования временных рядов. Классические статистические модели обладают сравнительно невысокой вычислительной сложностью, однако их применение ограничивается требованиями к свойствам исследуемых данных. Методы машинного обучения и глубокие нейросетевые модели способны описывать более сложные нелинейные зависимости, но их применение может требовать значительных объемов данных и вычислительных ресурсов. При этом вопросы адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов, предусматривающего предварительное выявление их структурных особенностей, снижение размерности данных и последующее использование специализированных моделей в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, требуют дальнейшего развития. В связи с этим разработка методов и моделей адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов, обеспечивающих повышение точности прогнозов при одновременном снижении вычислительных затрат, является актуальной научной задачей.

**Структура, объем и содержание диссертации**

Диссертация Мингалиева З. З. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 118 источников и приложений. Общий объем диссертации составляет 163 страницы, работа содержит 38 рисунков и 33 таблицы. В приложениях представлены акты о внедрении и использовании результатов диссертационного исследования, а также свидетельства о государственной регистрации разработанных программ для ЭВМ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы научная задача, цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения о научной новизне и практической значимости работы.

В первой главе проведен анализ существующих методов кластеризации и прогнозирования временных рядов. Рассмотрены методы, основанные на измерении расстояний, вероятностные подходы и методы глубокого обучения, а также классические статистические методы и современные модели машинного обучения. Особое внимание уделено проблемам работы с неоднородными временными рядами, характеризующимися изменчивостью, шумами, пропусками и сменой режимов поведения. По результатам анализа выявлена необходимость разработки специализированных методов адаптивной кластеризации и прогнозирования с учетом структурных особенностей данных.

Во второй главе представлены разработанные методы и модели. Автором предложен метод адаптивной кусочно-линейной аппроксимации временных рядов с переменным шагом, позволяющий снизить вычислительные затраты при сохранении заданной точности. Разработан также метод кластеризации на основе статистических и динамических характеристик временных рядов с использованием алгоритма DBSCAN. Для прогнозирования предложена адаптивная LSTM-модель, обучаемая отдельно для каждого выделенного кластера.

В третьей главе описана программная реализация разработанных методов и моделей. Представлены адаптивный модуль аппроксимации, поддерживающий жадный и адаптивный режимы разбиения временных данных, а также программный комплекс прогнозирования с предварительной кластеризацией. Рассмотрены архитектура программных решений и возможности их настройки для различных задач и типов временных данных.

В четвертой главе представлены результаты вычислительных экспериментов, проведенных для оценки применимости и эффективности разработанных методов. Исследования выполнены на данных различной природы: законах управления гибридным летательно-подводным аппаратом типа окто-квадрокоптер, функции динамики концентрации экзогенного инсулина и траектории движения автомобиля. Кроме того, проведены эксперименты по формированию нейросетевого контроллера автопилота легкого самолета и прогнозированию уровня глюкозы по данным непрерывного мониторинга.

Следует отметить, что структура диссертации соответствует поставленной научной задаче и позволяет последовательно рассмотреть существующие подходы, разработать оригинальные методы и модели, реализовать их программно и подтвердить их эффективность результатами вычислительных экспериментов.

**Новизна исследования и полученных результатов**

К новизне диссертационного исследования и полученных автором результатов можно отнести следующее:

1) метод адаптивной кластеризации временных рядов, базирующийся на анализе их статистических и динамических характеристик, отличающийся возможностью выявления однородных групп временных рядов с учетом индивидуальных и контекстно-зависимых особенностей их динамики, что позволяет повысить точность последующего прогнозирования;

2) метод адаптивной кусочно-линейной аппроксимации временных рядов, базирующийся на сегментации данных с переменным шагом по заданному критерию точности, отличающийся снижением размерности данных при сохранении их структурных свойств, что позволяет уменьшить вычислительные затраты на последующих этапах обработки и прогнозирования;

3) гибридная нейросетевая модель прогнозирования временных рядов, базирующаяся на интеграции LSTM-архитектур, методов кластеризации и адаптивной аппроксимации, отличающаяся использованием предварительной структуризации данных для формирования скрытых представлений, что позволяет повысить устойчивость прогнозов к шумам и пропускам, а также снизить вычислительную сложность модели;

4) программный комплекс для прогнозирования временных рядов, базирующийся на интеграции методов кластеризации, адаптивной кусочно-линейной аппроксимации и гибридных нейросетевых моделей, отличающийся модульной архитектурой и возможностью настройки под различные классы временных данных, что позволяет реализовать адаптивный подход к прогнозированию в системах реального времени;

5) численные эксперименты по решению задач прогнозирования неоднородных временных рядов, базирующиеся на использовании синтетических и реальных наборов данных с последующим статистическим анализом результатов, отличающиеся комплексной оценкой точности, устойчивости и вычислительной эффективности моделей, что позволяет обоснованно оценить применимость и эффективность разработанных методов и алгоритмов для решения поставленных задач.

Таким образом, научная новизна диссертационной работы заключается в разработке комплекса взаимосвязанных методов адаптивной обработки и прогнозирования неоднородных временных рядов, включающего адаптивную кусочно-линейную аппроксимацию, кластеризацию по статистическим и динамическим характеристикам и гибридную нейросетевую модель на основе LSTM. Существенным результатом является объединение указанных методов в единую технологию обработки временных данных, ориентированную на повышение точности прогнозирования и снижение вычислительных затрат. Разработанные методы реализованы в виде программного комплекса и апробированы на данных из различных предметных областей.

**Значимость полученных результатов для науки и производства**

Разработанное в диссертации алгоритмическое обеспечение для адаптивной обработки и прогнозирования неоднородных временных рядов представляет значимость для дальнейшего развития методов математического моделирования, анализа данных и интеллектуального прогнозирования в условиях изменяющейся структуры данных и ограниченных вычислительных ресурсов. Предложенный комплекс взаимосвязанных методов включает адаптивную кусочно-линейную аппроксимацию, кластеризацию временных рядов по статистическим и динамическим характеристикам и гибридную нейросетевую модель прогнозирования на основе

LSTM. Разработанные методы реализованы в виде программного комплекса, обеспечивающего последовательное выполнение процедур предварительной обработки, структуризации, кластеризации и прогнозирования временных данных. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, представленных в приложении к диссертации.

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс кафедры прикладной математики и информатики ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» при подготовке магистров по направлению «Прикладная математика и информатика», использованы в работе сектора безопасности дорожного движения и контрольно-надзорной деятельности Министерства транспорта и дорожного хозяйства Республики Татарстан и в центре разработки и сопровождения информационных систем ГБУ «Безопасность дорожного движения» при моделировании сложных траекторий движения транспорта, в системе поддержки принятия решений для прогнозирования уровня гликемии отделения эндокринологии детской республиканской клинической больницы МЗ РТ, а также в научно-производственном центре беспилотных авиационных систем (НПЦ БАС) Татарстана, что подтверждено актами о внедрении, приведенными в Приложении 1 диссертации.

На основе вычислительных экспериментов, выполненных автором с использованием разработанного программного комплекса, показана эффективность разработанного алгоритмического обеспечения.

Полученные результаты могут представлять интерес для научно-исследовательских и инженерных организаций, занимающихся математическим моделированием, обработкой временных данных, интеллектуальным прогнозированием и разработкой систем поддержки принятия решений. В первую очередь это организации, работающие в области транспортного моделирования, беспилотных технических систем, медицинского мониторинга и других прикладных задач, в которых требуется обработка неоднородных временных рядов в режиме, близком к реальному времени. Существенным преимуществом разработанных решений является их ориентация не только на повышение точности прогнозирования, но и на снижение вычислительных затрат, что расширяет возможности их применения на вычислительных ресурсах с ограниченной производительностью.

Результаты диссертационной работы имеют как научную, так и прикладную значимость: они развивают методы адаптивного анализа и прогнозирования неоднородных временных рядов, реализованы в виде комплекса программ, прошли вычислительную и практическую апробацию и нашли применение в образовательной, транспортной, медицинской областях, а также при моделировании и управлении беспилотными техническими системами.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации**

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать в:

– деятельности органов государственной власти (Минздрав, Минпромторг) и отраслевых объединений при разработке мер поддержки внедрения систем интеллектуального мониторинга и адаптивного прогнозирования в здравоохранении и промышленности;

– практике медицинских учреждений (в частности, эндокринологических отделений) и производителей медицинских изделий при создании систем подержки принятия решений для персонализированного управления сахарным диабетом и интеллектуальных инсулиновых помп;

– работе научно-производственных центров и конструкторских бюро (например, НПЦ БАС) для имитационного моделирования, оптимизации управления и снижения вычислительной нагрузки на бортовые компьютеры беспилотных летательных и гибридных летательно-подводных аппаратов;

– учебном процессе высших учебных заведений при подготовке специалистов по направлениям «Прикладная математика и информатика», «Компьютерное моделирование», «Теория принятия решений» и «Искусственный интеллект».

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Положения, сформулированные в диссертационной работе Мингалиева З.З., основываются на известных достижениях в области математического моделирования, математической статистики, кластерного анализа, нейросетевого моделирования и методов обработки временных рядов. В работе корректно применяются методы математической статистики, математического и нейросетевого моделирования, кластерного анализа, а также методы оптимизации и объектно-ориентированного программирования. Автором последовательно решены поставленные задачи, проведено сопоставление предложенных подходов с существующими методами, выполнена экспериментальная проверка разработанных методов и моделей.

Мингалиевым З.З. проведен анализ известных методов кластеризации и прогнозирования временных рядов, включая статистические методы, методы машинного обучения и глубокие нейросетевые модели. На основании проведенного анализа сформулирована научная задача разработки методов и моделей адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов с учетом ограниченных вычислительных ресурсов. Обоснованность предложенных решений подтверждается результатами вычислительных экспериментов на реальных и синтетических временных рядах различной природы, а также результатами практического использования разработанного программного обеспечения.

Достоверность полученных результатов обусловлена корректностью применяемого математического аппарата, использованием методов кластерного анализа, аппроксимации и нейросетевого моделирования, а также проведением численных экспериментов и статистическим анализом их результатов. В диссертации приведены результаты применения разработанных методов к задачам моделирования траекторий и управления беспилотными аппаратами, прогнозирования физиологических временных рядов и моделирования транспортных процессов.

Полученные Мингалиевым З.З. научные и практические результаты соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

п.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;

п.3. *Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента*: реализация разработанных методов и алгоритмов в виде комплекса программ, на базе которого проведены вычислительные эксперименты по оценке эффективности разработанного алгоритмического обеспечения и возможности его практического использования для решения поставленных задач;

п.8. *Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента*: разработана гибридная нейросетевая модель прогнозирования временных рядов с применением адаптивных методов предварительной кластеризации и кусочно-линейной аппроксимации;

п.9. *Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий*: проведены численные эксперименты с последующим статистическим анализом их результатов для оценки эффективности разработанных методов и алгоритмов.

Таким образом, представленные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации имеют достаточную степень обоснованности и подтверждены как теоретическими положениями, так и результатами вычислительных экспериментов и практической апробации разработанных методов и программного комплекса.

**Дискуссионные вопросы и замечания по диссертации**

Несмотря на высокий уровень работы и ее несомненные достоинства, можно высказать ряд замечаний и пожеланий дискуссионного характера:

1. В диссертации не всегда четко разграничены понятия «неоднородные временные ряды», «смешанные временные ряды» и отдельные группы временных рядов, формируемые в результате кластеризации. В различных разделах работы эти понятия используются в близком контексте, однако их взаимосвязь и отличие не во всех случаях раскрываются явно (с. 11, 17, 53–54). Автору следовало бы в начале работы дать более строгое определение указанных понятий и далее придерживаться единой терминологии.

2. Автор диссертационного исследования сосредоточился на разработке методов прогнозирования временных рядов, значения которых представляют собой последовательности непрерывных числовых величин (с. 32–40, 53–56 и др.). Однако на практике также встречаются временные ряды с дискретными значениями, а также категориальные и счетные временные данные. В тексте диссертации не приводится

обоснования выбора именно непрерывных моделей прогноза. Не совсем понятно, почему автор ограничился использованием только этих моделей.

3. При разработке метода кластеризации временных рядов автор использует набор статистических и динамических характеристик для перехода от исходных временных последовательностей к векторам признаков (с. 48–52, 121). Однако в тексте работы отсутствует какое-либо обоснование, почему для описания динамической структуры временного ряда выбраны именно эти показатели и насколько результаты кластеризации зависят от состава используемых признаков.

4. В методе адаптивной кусочно-линейной аппроксимации в качестве меры точности используется коэффициент детерминации $R^2$ (с. 45–47, 80–81). Автор никак не обосновывает такой выбор. Вместе с тем то, что данный показатель является оптимальным именно для задачи определения границ сегментов временного ряда, не является очевидным.

5. В диссертации предполагается, что при поступлении нового временного ряда для прогноза, он будет сначала отнесен к одному из сформированных ранее кластеров, после чего для него выбирается соответствующая специализированная LSTM-модель (с. 55–56, 132–133). Остается открытым вопрос: что произойдет в случае, если алгоритм DBSCAN не отнесет новый временной ряд ни одному из кластеров, а выделит его как новый объект?

6. Некоторые рисунки в диссертации содержат нечитаемые обозначения и элементы. В частности, на рис. 3 (стр. 61) архитектура программного модуля представлена с использованием англоязычных обозначений, что затрудняет восприятие схемы без обращения к пояснениям в тексте. Кроме того, рис. 10–12 (стр. 69–70), иллюстрирующие алгоритмы работы блоков предварительной обработки данных, обучения и прогнозирования, выполнены в масштабе, не позволяющем однозначно прочитать обозначения отдельных блоков и проследить последовательность выполняемых операций.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы и не влияют на ее общую положительную оценку.

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

Оформление диссертации соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11–2011 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Автореферат диссертации выполнен с соблюдением установленных требований и достаточно точно отражает содержание диссертационной работы.

Основные научные результаты диссертационного исследования достаточно полно представлены в публикациях автора. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, включая 5 статей в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, и 1 статью в издании, индексируемом в базе данных Scopus. Результаты исследования также апробированы на российских и

международных научных конференциях и подтверждены свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация Мингалиева Заида Зульфатовича «Методы и модели адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача разработки методов и моделей адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов, имеющая значение для развития и применения средств математического моделирования, численных методов и комплексов программ для адаптивного прогнозирования неоднородных временных рядов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, в различных предметных областях.

Считаем, что диссертация Мингалиева З. З. удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. № 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.

Диссертационная работа и отзыв обсуждены на расширенном заседании кафедры информационных технологий факультета прикладной математики и кибернетики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» (протокол № _3_ от _09.10.2026_ г.).

Отзыв составили:

Заведующий кафедрой информационных технологий ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», д.ф.-м.н., профессор, 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в промышленности)

_____ Язенин Александр Васильевич

«_09_» __10_____ 2026 г.

Доцент кафедры информационных технологий ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», к.т.н., доцент, 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

_____ Солдатенко Илья Сергеевич

«_09_» ___10_____ 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Тверской государственный университет»
Адрес: 170100, г. Тверь, ул. Желябова, д.33
Телефон: +7(4822) 342452
Электронная почта: rector@tversu.ru
Адрес официального сайта: https://tversu.ru

Вход. № 05-9101
«20» 10 2026 г.
подпись