

Национальная академия наук Кыргызской Республики

**Институт машиноведения, автоматике и геомеханики
Кыргызско – Российский Славянский университет им.Б.Н.Ельцина**

Диссертационный совет Д 05.23.686

На правах рукописи
УДК 51:51-71

Абдрасакова Айзада Байышбековна

**Математическое моделирование регионального климата
отдельных областей Кыргызстана**

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико- математических наук

Бишкек – 2025

Работа выполнена на кафедре «Информационные системы в экономике»
Кыргызского государственного технического университета имени И. Раззакова.

**Научный
консультант:**

Сулайманова Света Мукашовна
доктор физико-математических наук, профессор
образовательной программы «Прикладная математика и
информатика» Кыргызского Национального Университета
им.Ж.Баласагына

**Официальные
оппоненты:**

**Ведущая
организация:**

Защита диссертации состоится _____ на заседании диссертационного совета Д 05.23.686 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) физико-математических и технических наук при Институте машиноведения, автоматизации и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики и Кыргызско – Российском Славянском университете им.Б.Н.Ельцина по адресу: 720071, г. Бишкек, пр. Чуй 265, ауд. 374. Ссылка доступа к видеоконференции защиты диссертации <https://vc.vak.kg/b/052-lto-twi-0js>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национальной академии наук Кыргызской Республики (720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265), Кыргызско – Российском Славянском университете им.Б.Н.Ельцина (720072, г.Бишкек, ул.Киевская 44) и на сайте Национальной аттестационной комиссии при Президенте Кыргызской Республики https://stepen.vak.kg/diss_sovety/d-05-23-686.

Автореферат разослан _____

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., с.н.с

Керимкулова Г.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Современные изменения климата оказывают значительное влияние на различные регионы мира, включая Кыргызстан, который отличается сложным горным рельефом и разнообразием микроклиматических зон. Исследование климатических изменений в данном регионе имеет важное значение для прогнозирования возможных природных катастроф (засух, наводнений, изменения водных ресурсов, деградации ледников), а также для адаптации сельского хозяйства, гидроэнергетики и других стратегически важных отраслей экономики.

В условиях глобального потепления особую значимость приобретает разработка точных и надежных математических моделей, позволяющих анализировать и прогнозировать климатические процессы на региональном уровне. Такие модели необходимы для оценки динамики температуры, осадков, влажности и других метеорологических параметров в отдельных районах Кыргызстана, разработки сценариев изменения климата и их последствий для экономики, экологии и социального развития, а также поддержки принятия решений в сфере водных ресурсов, сельского хозяйства, градостроительства и энергоснабжения.

Кроме того, учитывая ограниченное количество метеостанций в горных районах Кыргызстана, математическое моделирование становится важным инструментом для восполнения пробелов в данных и повышения точности прогнозов. Исследование региональных климатических характеристик, оценка будущих изменений климата и их последствий имеют существенное значение при планировании социально-экономического развития регионов Кыргызской Республики. Наблюдаемые региональные климатические изменения имеют тенденцию к повышению среднегодовой температуры воздуха, при этом наибольший рост отмечается с середины 1970-х гг.

Таким образом, исследование по данной теме является актуальным как с научной точки зрения, поскольку способствует развитию методов регионального климатического моделирования, так и с практической, так как результаты могут использоваться государственными и международными организациями для разработки стратегий адаптации к изменению климата в Кыргызстане.

Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями, крупными научными программами (проектами), основными научно-исследовательскими работами, проводимыми образовательными и научными учреждениями. Диссертационная работа является инициативной.

Цель диссертационной работы - разработка и применение математических моделей для анализа и прогнозирования климатических параметров (средней температуры воздуха, уровня CO₂ и осадков) в отдельных

регионах Кыргызстана на основе современных методов машинного обучения и численного моделирования.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Провести сравнительный анализ и прогнозирование среднемесячной температуры воздуха в отдельных регионах Кыргызстана на основе временных рядов с использованием методов машинного обучения;
2. Осуществить анализ динамики и прогнозирование выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу с учетом климатических и антропогенных факторов;
3. Разработать математические модели для описания процессов переноса загрязняющих веществ в атмосфере, включая уравнение Навье-Стокса для моделирования движения выбросов и уравнение переноса примесей с учетом наличия препятствий;
4. Осуществить расчет траекторий распространения загрязняющих веществ в атмосфере с учетом турбулентных эффектов и наличия препятствий, используя методы вычислительной гидродинамики в программном комплексе ANSYS Fluent;
5. Выполнить численное моделирование процессов диффузии загрязняющих веществ в атмосфере от точечного источника с использованием программного комплекса ANSYS CFX, учитывая влияние турбулентных процессов и аэродинамических факторов;
6. Провести анализ и прогнозирование среднемесячных сумм осадков за последние 100 лет по данным метеорологических наблюдений, используя модели временных рядов и методы машинного обучения;
7. Выполнить численный расчет фильтрации потоков жидкости в пористую среду с учетом разрыва пористости для оценки гидродинамических процессов, влияющих на климатическую систему региона.

Научная новизна полученных результатов

1. Разработаны математические модели прогнозирования среднемесячной температуры воздуха, выбросов углекислого газа (CO_2), среднемесячных осадков с учетом региональных климатических особенностей Кыргызстана, основанные на нейросетевых архитектурах LSTM, XGBoost.
2. Получена математическая модель турбулентного потока дыма при наличии препятствий на пути его распространения от точечного источника, разработанная с использованием программного комплекса ANSYS Fluent;
3. Разработана модель диффузионного рассеивания дымовых выбросов в атмосферу с использованием программного комплекса ANSYS CFX, учитывающая динамические характеристики потока.
4. Получены количественные зависимости скорости и дальности

распространения дымовых потоков от направления и скорости ветра, что позволяет более точно учитывать атмосферные условия при прогнозировании загрязнения воздуха;

5. Выполнены численные расчеты фильтрации распространения потока жидкости в пористую среду с учетом разрыва пористости, что позволяет учитывать гидродинамические процессы в неоднородных пластах, влияющие на климатическую систему. В рамках модели установлено, что скорость фронта намокания меньше скорости за ним.

Практическая значимость полученных результатов.

1. Разработанные модели позволяют эффективно прогнозировать климатические параметры, включая среднемесячную температуру воздуха, осадки и динамику выбросов загрязняющих веществ, что способствует более точному анализу климатических изменений в отдельных регионах Кыргызстана;

2. Разработанные математические модели распространения выбросов из дымовых труб, учитывающие влияние препятствий и метеорологических факторов, позволяют оценивать траектории движения загрязняющих веществ, в том числе углекислого газа (CO_2) в атмосфере и предсказывать зоны наибольшего их накопления;

3. Применение уравнений Навье-Стокса и потока энергии для моделирования турбулентных и диффузионных процессов позволяет проводить точные расчеты динамики атмосферных выбросов в трехмерном пространстве с учетом нестационарных факторов;

4. Использование программных комплексов ANSYS Fluent и ANSYS CFX дает возможность решать стационарные и нестационарные задачи в 3D-моделировании, что позволяет повысить точность расчетов процессов переноса загрязняющих веществ в атмосфере;

5. Полученные количественные зависимости скорости и дальности распространения дымовых потоков от направления и скорости ветра, стабильности атмосферы, температуры потока на выходе из трубы, температуры воздуха могут быть использованы при экологическом мониторинге и разработке мер по снижению вредного воздействия промышленных выбросов;

6. Разработанные прогнозные модели изменения температуры воздуха и осадков могут быть применены в сельском хозяйстве, водных ресурсах и градостроительстве для адаптации к изменениям климата и эффективного управления природными ресурсами.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Математическая модель прогнозирования среднемесячной температуры воздуха, основанная на анализе климатических данных за 100-летний период с использованием нейросетевых архитектур LSTM, XGBoost, позволяющие выявлять долгосрочные тенденции изменения температуры в

отдельных регионах Кыргызстана;

2. Анализ и сравнительное исследование состава атмосферного воздуха в осенний и весенний периоды, выявляющие особенности сезонных колебаний концентрации загрязняющих веществ, обусловленные метеорологическими условиями и антропогенной нагрузкой;

3. Прогнозная модель динамики выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу, включающая количественные оценки изменения уровня выбросов с учетом климатических и техногенных факторов, а также тренды выбросов парниковых газов до 2050 года;

4. Результаты численного моделирования процессов диффузии и рассеивания дымовых выбросов из точечного источника в атмосфере, определяющие основные закономерности переноса загрязняющих веществ с учетом аэродинамических характеристик потока;

5. Модель турбулентного потока дымовых выбросов, учитывающая влияние препятствий (зданий и других объектов) на распространение загрязняющих веществ, построенная на основе расчетов в программном комплексе **ANSYS Fluent, CFX** позволяющая оценить воздействие выбросов на качество воздуха в городской среде;

6. Модель прогнозирования суммарных атмосферных осадков, основанная на метеорологических данных за 1921–2021 гг., содержащая количественные зависимости для оценки их динамики до 2040 года в отдельных регионах Кыргызстана;

7. Расчеты процессов тепловлагопереноса в пористый грунт, учитывающие разрыв пористости, взаимодействие почвы с атмосферными осадками и температурными изменениями, важные для прогнозирования гидрологических и климатических процессов.

Личный вклад соискателя в самостоятельной постановке научной задачи, основных идей и положений исследования; в разработке математических моделей прогнозирования климатических параметров, включая среднемесячную температуру воздуха, осадки и выбросы углекислого газа (CO_2), с использованием методов машинного обучения и численного моделирования; в построении и реализации моделей диффузии и турбулентного переноса загрязняющих веществ в атмосфере с учетом препятствий; в проведении численных расчетов процессов тепловлагопереноса. Формулировка общей цели работы, постановка задач, общая методология исследования принадлежат научному руководителю профессору Сулаймановой С.М.

В работах [1, 2] Сулаймановой С.М. принадлежит постановка задачи исследования. В работах [3-7] Сулаймановой С.М. принадлежит анализ и прогнозирование климатических данных с помощью нейронных сетей. В работах [1, 2] Картановой А.Дж. принадлежит моделирование двухфазного течения

смеси газа, твердых частиц и численное моделирование переноса примесей над ограниченной территорией.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты данной работы рассмотрены: на Международной научно – практической конференции “20-летие ИНИТ КГУСТА им. Н. Исанова ” Бишкек, 19-21 октября 2021 г. , на Международной конференции «Интеграция науки и образования в современном мире» Нурсултан (Астана), Казахстан. 15 октября 2021 г., на Международной конференции «30-летие КГУСТА им. Н. Исанова» Бишкек, 28-30 мая 2022 г., на Международной научно-практической конференции «Роль науки и инновационных технологий в устойчивом развитии горных территорий и экосистем», КГТУ им. И. Раззакова (Кыргызстан, Бишкек, 27-28 октября 2022г.), на Международной научной конференции «Современная техника и технологии в научных исследованиях» Научной станции Российской академии наук в г.Бишкек (НС РАН) 26 апреля 2023г., на Международной научно – практической конференции “Современные тренды в строительстве: проблемы и пути решения” 80-летие выдающегося государственного и политического деятеля КР Н.Исанова” Бишкек, 2 ноября 2023 г., на Международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация общества и искусственный интеллект» Кыргызско-Германского института прикладной информатики , 23 ноября 2023 г.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. По содержанию настоящей диссертации опубликовано 7 научных статей. Основные результаты диссертации опубликованы в журналах: “Проблемы автоматизации и управления” (1 статья), "Вестник КГУСТА" (2 статьи), "Известия ВУЗов Кыргызстана" (1 статья), “Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана” (1 статья), “Наука и инновационные технологии” (2 статьи).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, заключения, списка использованной литературы и приложения.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.ф.-м.н., профессору С.М.Сулаймановой за постановку задач, формулировку основной идеи исследования, ценные советы и содержательные обсуждения на всех этапах подготовки данной диссертации, а также за неизменное внимание и поддержку в ходе работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность исследования, определена цель и сформулированы задачи исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя. Также описана апробация результатов исследования, указана полнота отражения результатов

диссертации в публикациях, дана характеристика структуры и объема работы. В первой главе представлен обзор литературы по исследуемой теме, рассмотрены основные подходы к математическому моделированию климатических процессов, анализу данных о температуре воздуха и выбросах углекислого газа. Значительный вклад в анализ и прогнозирование регионального климата Кыргызстана внес А.О. Подрезов (2021), который в своих трудах он провел обзор исследований климата Кыргызстана, его изменений и прогнозов. Эти работы существенно расширяют понимание климатических изменений как показано на рис. 1 и их влияния на природные ресурсы Кыргызстана.

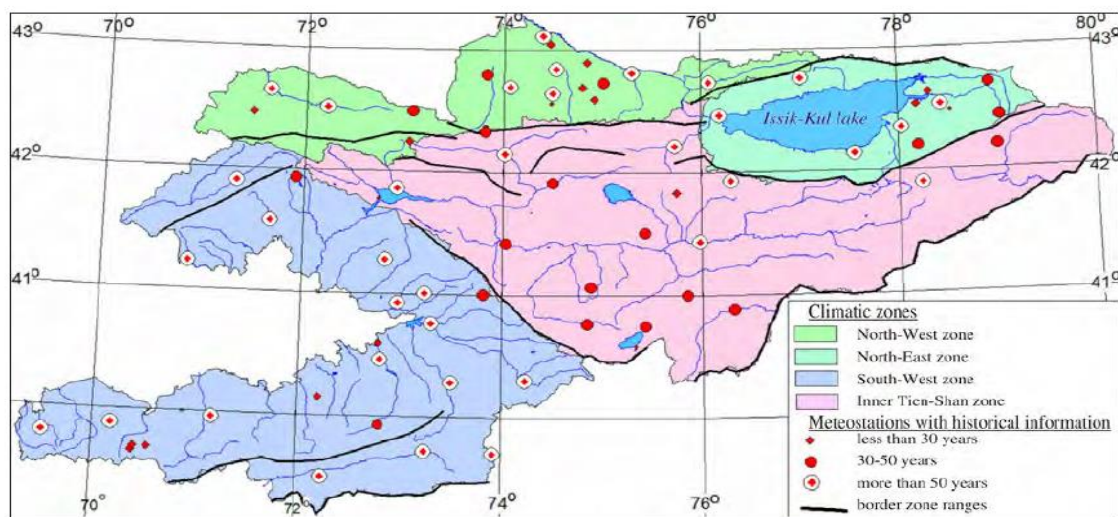


Рисунок 1 – Принятое климатическое зонирование республики
(источник Кыргызгидромет)

Проблемами метеорологии и атмосферы занимались Матвеев Л.Т (1984). Численные методы, используемые в атмосферных моделях применял Мезингер Ф., Аракава А. (1979), Дымников В.П. (2005). Оптимальное прогнозирование природных процессов предложено Пененко В.В. (2009). Климатические изменения рассмотрены в исследованиях Ильясов Ш., Забенко О., Гайдамак Н. (2013).

Построения прогнозной нейросетевой модели в работах Емалетдинова Л.Ю., Мухаметзянов З.И., Катасёва Д.В., Кабирова А.Н., Круглов В. В. (2021), Бильгаева Л.П., Власов К.Г. (2017), Ростовцев В.С. (2019).

Распространения загрязнений от точечного источника с помощью программного комплекса Ansys CFX в исследованиях Манукян А.А., Селиверстова Т.В (2017). Влияние переменных коэффициентов диффузии и скорости на рассеивание загрязнителей акцентируют Клицинг Г.Е., Петерс Л.К. (1971).

Течение жидкостей через пористые материалы подчеркивает Коллинз Р. (1964). Движение жидкостей и газов в пористых средах в исследовании

Михайлова Г.К., Николаевского В.Н. (1970), также в течениях газа в пористой среде с поверхностями разрыва пористости Крайко А.Н., Миллер Л.Г., Ширковский И.А. О (1982).

По-разному ведут себя температуры, усредненные по отдельному региону. Изменения регионального климата происходят часто гораздо быстрее и драматичнее. Именно эти изменения представляют особый интерес для каждой страны, но они проходят на фоне глобальных изменений.

Во второй главе «Методология и методы исследования» рассмотрены вопросы использования методов прогнозирования временных рядов с помощью нейронных сетей.

Предмет исследования – математические модели прогнозирования климатических параметров и численные методы анализа атмосферных и гидрологических процессов

Объект исследования – климатические параметры отдельных регионов Кыргызской Республики, включая температуру воздуха, осадки и выбросы углекислого газа (CO_2).

Методы исследования – в работе использованы методы машинного обучения (нейросети LSTM, XGBoost, GRNN), численного моделирования атмосферных процессов (уравнения Навье-Стокса, модели турбулентности), а также вычислительная гидродинамика (CFD) в программных комплексах ANSYS Fluent и ANSYS CFX.

В главе обоснована необходимость исследования региональных климатических изменений, описаны используемые методы прогнозирования и представлена разработанная модель временных рядов на основе нейросетевых архитектур LSTM, XGBoost. Представлены методы использования программных комплексов ANSYS Fluent и ANSYS CFX для моделирования трехмерных, нестационарных и стационарных задач переноса и диффузии. Приводится система уравнений, привлекаемая для исследования нестационарных процессов тепловлагопереноса в пористой среде.

Третья глава посвящена исследованию климатических изменений в некоторых областях Кыргызской Республики за 100-летний период (1921–2021 гг.) и применению методов машинного обучения для прогнозирования среднемесячной температуры воздуха, парниковых газов в эквиваленте CO_2 и среднегодовых суммарных осадков.

Основным средством прогнозирования климата и оценки прошлых и будущих изменений климата является среднегодовая температура воздуха. Многие исследования показывают, что в условиях глобального потепления по-разному ведут себя температуры, усредненные по отдельным регионам. Изменения регионального климата в табл. 1 происходят часто гораздо быстрее и драматичнее на фоне глобальных изменений.

Таблица 1 – Изменение температуры (°C) по регионам по сравнению с базовым периодом

Область Показатель	Баткен- ская	Жалал- Абадска	Иссык- Кульска	Нарын - ская	Ошска я	Талас- ская	Чуйска я
Среднее 1961 -1900	9,45	8,11	3,04	-0,34	6,32	6,13	5,11
Среднее 1991-2010	10,13	9,00	3,30	0,11	7,16	6,66	5,65
Разница средних	0,67	0,89	0,32	0,46	0,84	0,53	0,54
Рост с 1 991 по 2010	1,61	1,42	0,88	1,57	1,36	1,39	1,22

Исследование основано на анализе временных рядов среднемесячной температуры воздуха. Представлены исходные климатические данные, описаны их основные характеристики, включая сезонные колебания и долгосрочные тенденции.

Для обработки данных использовалась их стандартизация: вычислялось среднее значение температурного ряда, после чего данные нормировались для обеспечения корректности работы модели.

Прогнозирование среднемесячной температуры воздуха осуществлялось с использованием рекуррентной нейронной сети с долгосрочной и краткосрочной памятью (LSTM). LSTM-сети способны анализировать сложные временные зависимости и являются эффективным инструментом для прогнозирования временных рядов в климатологии.

Для построения модели использовались следующие этапы: разбиение данных на обучающую и тестовую выборки: 90% данных использованы для обучения, 10% – для тестирования модели; нормализация данных: приведение значений температур к единому масштабу для повышения точности модели; формирование входных последовательностей для обучения LSTM; определение параметров модели, включая: количество скрытых слоев – 200 нейронов; метод оптимизации – Adam; число эпох – 250; начальная скорость обучения – 0,005 с адаптивным снижением.

Обучение модели проводилось с использованием алгоритма градиентного спуска, предотвращение переобучения обеспечивалось за счет ограничения градиента и адаптивной скорости обучения. После завершения обучения сеть тестировалась на ранее неиспользуемых данных.

Прогнозирование выполнялось поэтапно с использованием метода последовательного предсказания будущих значений на основе ранее полученных предсказаний.

На рис. 2 продемонстрированы прогнозируемые значения среднемесячной температуры воздуха на последующие 5 лет, полученные с использованием модели LSTM, на рис. 3 с XGBoost. Видно, что предсказанные данные соответствуют реальным тенденциям.

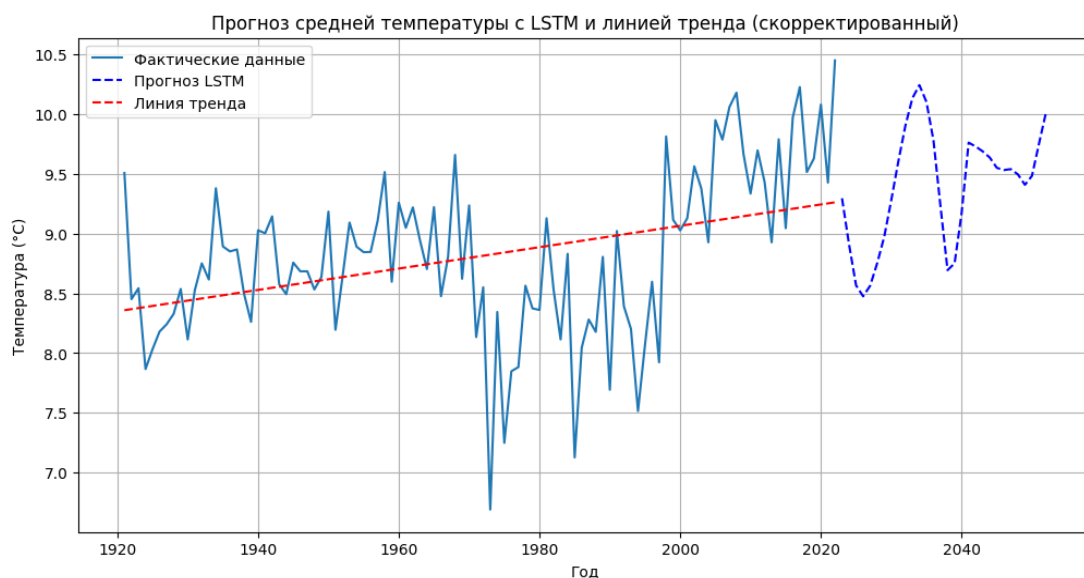


Рисунок 2 – Долгосрочные прогнозируемые значения среднегодовых температур с LSTM.

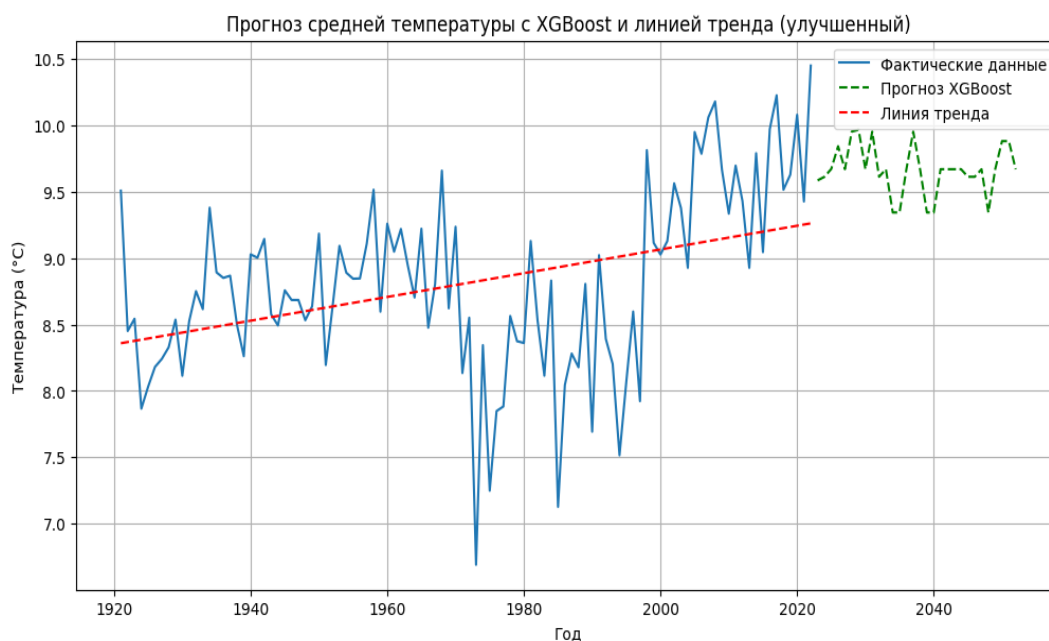


Рисунок 3 – Долгосрочные прогнозируемые значения среднегодовых температур с XGBoost

На рис. 4 показана изменения среднегодовой температуры по г.Ош, соответственно на рис.5 данные г.Нарын. Для оценки качества прогнозов использовалась среднеквадратичная ошибка (RMSE). В ходе экспериментов RMSE составила 158.1, что подтверждает высокую точность модели.

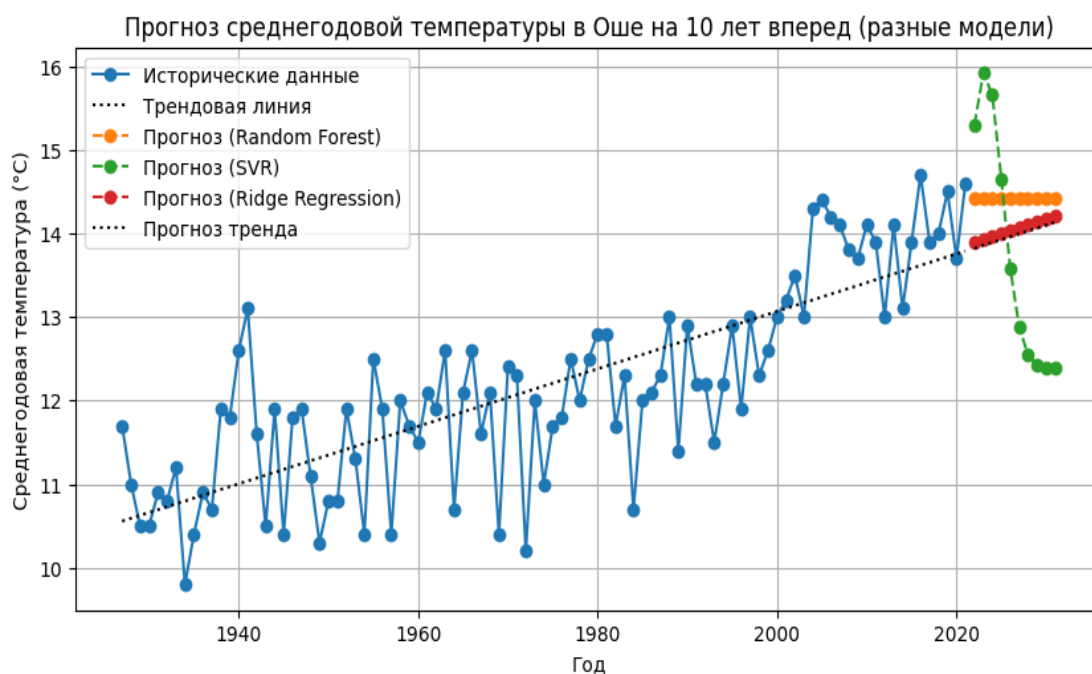


Рисунок 4 – Тенденция изменения среднегодовой температуры в г.Ош

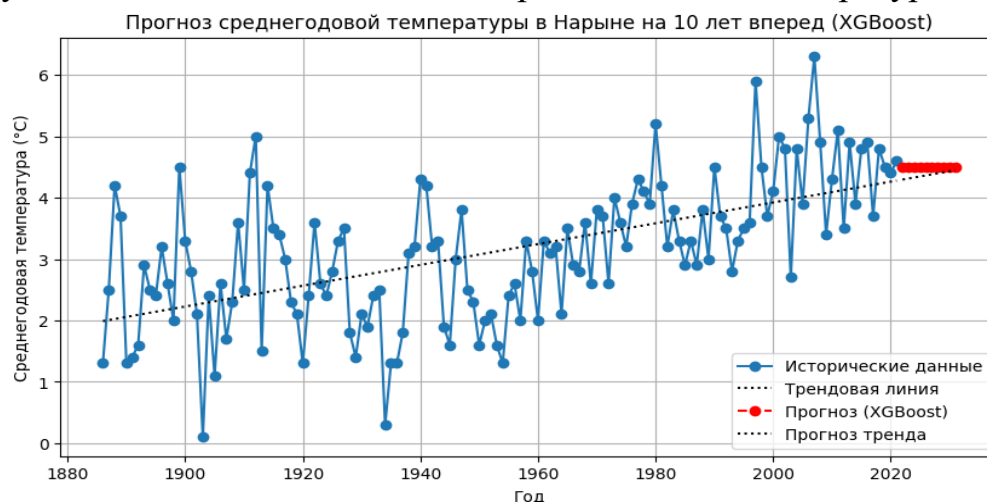


Рисунок 5 – Тенденция изменения среднегодовой температуры в г. Нарын

Глобальное потепление во многих исследованиях по изменению климата связывается с ростом малой концентрации углекислого газа CO_2 в атмосфере ($\text{КСО}_2=5 \times 10^{-4}$). При решении задачи прогнозирования временных рядов, членами которых являются эмиссии и парниковые газы в эквиваленте CO_2 тысячи тонн в год начиная с 1977 по 2023 гг. Как показано на рис.6, в качестве нейронной сети была выбрана обобщенно-регрессионная сеть, реализующая методы ядерной аппроксимации (GRNN). Прогноз значений будущих эмиссий парниковых газов на период 2025-2050 гг. на рис. 7., где тренд имеет нелинейный характер. Недавние исследование в области прогнозирования с помощью GRNN предполагают, что GRNN может быть многообещающей альтернативной традиционной модели временных рядов. Он показал большие возможности в моделировании и прогнозировании нелинейных временных рядов и постепенно входит в ряды многоцелевых, широко используемых методов.

GRNN-сеть имеет два скрытых слоя: слой радиальных элементов и слой элементов, которые формируют взвешенную сумму для соответствующего

элемента выходного слоя. В выходном слое определяется взвешенное среднее путем деления взвешенной суммы на сумму весов. В качестве радиальной функции применяется функция Гаусса. Используем NEWGRNN для создания обобщенной регрессионной сети.



Рисунок 6 – Динамика выбросов за 1977-2025 гг.

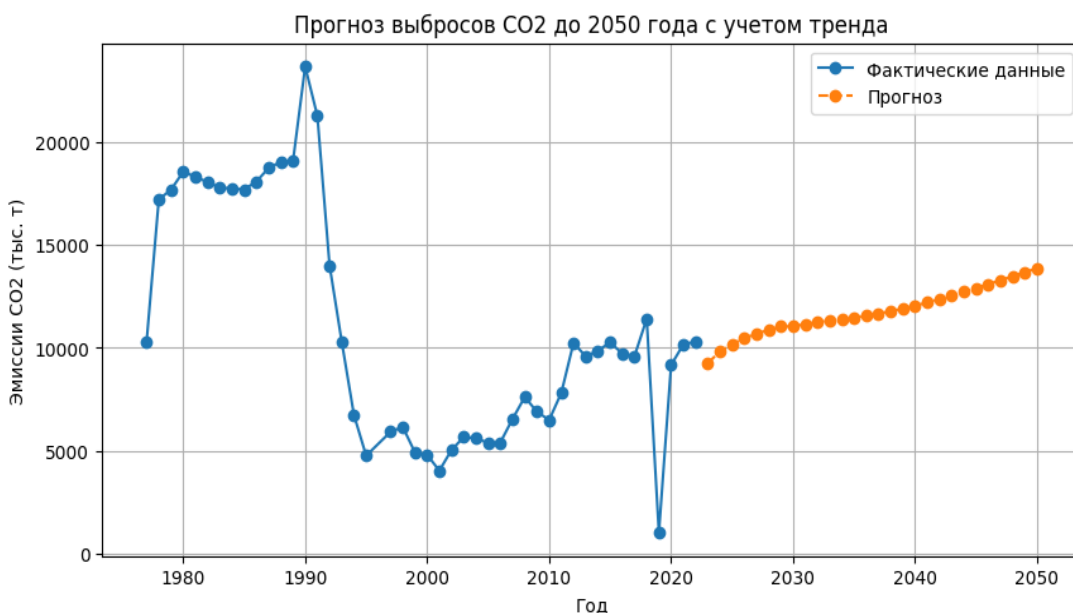


Рисунок 7 – Динамика выбросов и прогнозируемые значения будущих эмиссий парниковых газов на период 2025-2050 гг.

Итак, анализ климатических изменений в Кыргызской Республике показал, что температура за период с 1885 по 2020 гг. значительно возросла, причем динамика изменений носит нелинейный характер. В последние десятилетия темпы повышения температуры существенно увеличились, особенно с 1970-х годов, что подтверждается графиками температурных трендов.

В среднем в ближайшее десятилетие прогнозируется повышение средней температуры на $1,8^{\circ}\text{C}$. За 90-летний период (1925–2015 гг.) величина повышения среднегодовой температуры составила $1,6^{\circ}\text{C}$ согласно линейным трендам.

Результаты анализа климатических данных и прогнозирования, выполненного с помощью нейронных сетей, свидетельствуют о высокой обобщающей способности методов машинного обучения. По сравнению с

классическими моделями, нейросетевые методы обеспечивают более точную аппроксимацию и прогнозирование временных рядов, что подтверждает их эффективность в задачах климатического моделирования и прогнозирования.

В этой главе также рассматриваются прогнозирование временного ряда осадков с помощью нейронных сетей.

Режим осадков в Кыргызской Республике характеризуется значительной территориальной и сезонной изменчивостью, а также межгодовой нестабильностью и цикличностью. В целом, с начала XX века в республике наблюдается постепенное увеличение годового количества осадков — в среднем на 0,11% ежегодно (или 1% за десятилетие). С середины 1970-х годов этот процесс ускорился, и темпы роста достигли 0,2% в год (или 2% за десятилетие).

Для прогнозирования временного ряда осадков в г. Бишкек за 100 лет использованы LSTM модели нейронных сетей, а также альтернативный метод прогнозирования такой как, XGBoost. Градиентный бустинг — это алгоритмы с открытым исходным кодом, который реализует деревья градиентного усиления с дополнительными улучшениями для лучшей производительности и скорости, т.е. это метод машинного обучения, используемый в задачах регрессии и классификации. Он создает модель прогнозирования как ансамбль других, слабых моделей прогнозирования, которые обычно являются деревьями решений.

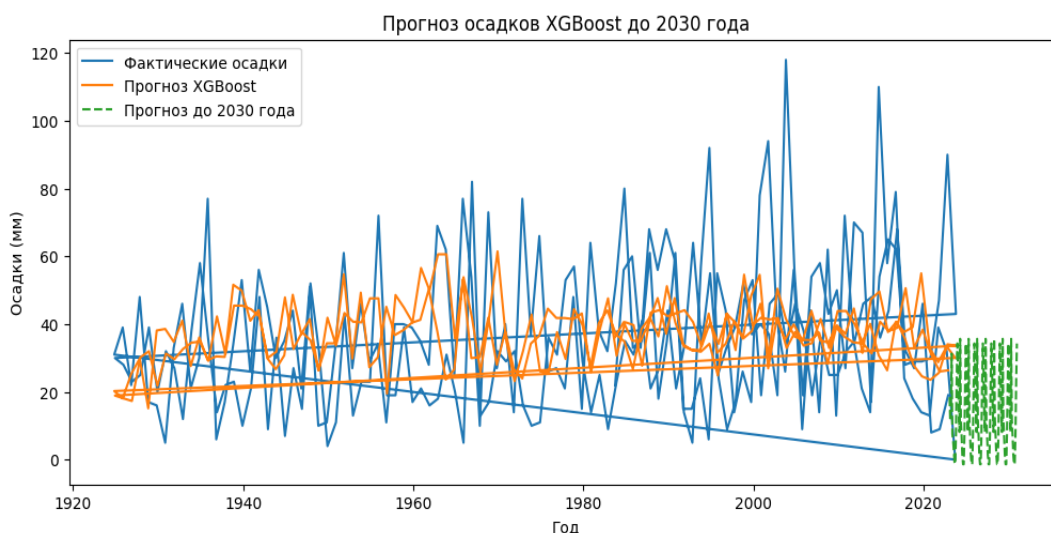


Рисунок 8 - Динамика и тренды изменения осадков в г. Бишкек за период 1925-2030 годы а) LSTM-модель

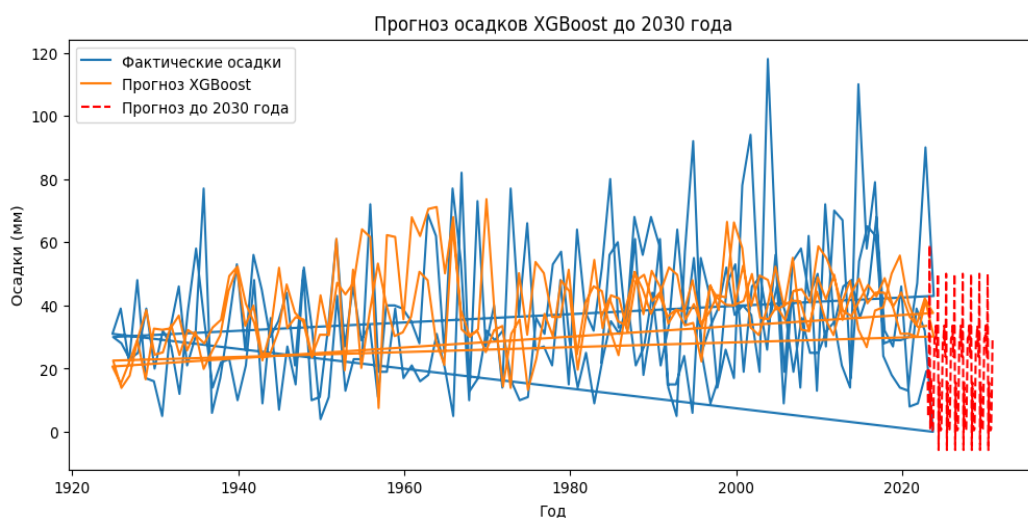


Рисунок 9 – Динамика и тренды изменения осадков в г. Бишкек за период 1925-2030 годы, б) XGBoost

Графики на рис.8,9 демонстрирует значительные колебания уровня осадков с выраженными периодическими изменениями. Тренды указывают на дальнейший рост количества осадков в г. Бишкек. Наблюдаются тенденции и возможная сезонность, при этом ожидаемое сезонное распределение осадков в целом соответствует наблюдениям последних десятилетий.

Таким образом, можно подчеркнуть значимость численного моделирования в задачах прогнозирования климатических и экологических процессов. Применение предложенных моделей позволяет более точно оценивать влияние внешних факторов на транспорт примесей в атмосфере и процессы водообмена в грунтовых слоях.

Четвертая глава посвящена трехмерному численному моделированию процессов распространения загрязняющих веществ из промышленной трубы с использованием программных комплексов ANSYS Fluent и ANSYS CFX. Представлены основные этапы моделирования, влияние метеорологических параметров на рассеивание загрязняющих веществ, а также влияние параметров дымовой трубы на процесс выбросов.

Исследование выполнено для Бишкекской ТЭЦ, крупнейшего потребителя угля в Кыргызстане. В работе рассмотрены параметры выбросов при сжигании угля и природного газа, а также влияние модернизации предприятия на характеристики выбросов. Проведен анализ конструкции дымовых труб, их геометрических параметров и динамики воздушных потоков.

Этапы численного моделирования с помощью ANSYS Fluent, CFX - описание геометрии домена; введение соответствующих граничных условий; введение источников, стоков и характеристик дисперсии для всей области; подбор значений параметров в модели; разбиение области на ячейки и решение конечно-разностных уравнений; визуализация результатов

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(U_x C)}{\partial x} - \frac{\partial(U_y C)}{\partial y} - \frac{\partial(U_z C)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + E - (k_1 + k_2)C + Q \quad (1)$$

Уравнение (1) где C — концентрация химических веществ, участвующих в модели (CO , NO_x , SO_2 и TH), U — скорость ветра, K_x , K_y и K_z — коэффициенты диффузии, E_s — источники выбросов, K_s и K_{s2} — коэффициенты осаждения (для сухого осаждения и мокрого осаждения соответственно) и $Q(C_s)$ представляют собой химические реакции.

Принятые допущения: Процесс стационарный ($DC/Dt=0$); $U_y=0$ $U_z=0$ (скорость ветра только в направлении x и является функцией z); Перенос объемным движением в направлении x превышает диффузию в направлении x ($K_x=0$); Отложений в системе нет ($K_s = K_{s2} = 0$); В системе нет реакции ($Q=0$).

$$\frac{\partial(U_x C^s)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C^s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C^s}{\partial z} \right) + E^s \quad (2)$$

В уравнении (2) начальные и граничные условия: при $x=0$, $C(0,j,k)=0$; при $y=0$, $DC/Dy=0$; при $y=W$, $DC/Dy=0$; при $z=0$, $DC/Dz=0$. Здесь z -длина смещения.

С использованием ANSYS Fluent и ANSYS CFX проанализированы: влияние скорости ветра, температуры окружающего воздуха, стабильности атмосферы и шероховатости поверхности на рассеивание загрязняющих веществ; влияние температуры, концентрации, скорости и высоты дымовой трубы на характер выбросов; турбулентные характеристики воздушного потока и взаимодействие выбросов с окружающей средой.

В модели были учтены геометрические параметры объекта, включая размеры дымовой трубы, здания и окружающего пространства.

Основные параметры представлены в таблице 2:

Таблица 2 – Исходные параметры геометрии трубы.

№	Данные модели	Ед изм.
1.	Длина пространства (куба) $L1$	600м
2.	Ширина пространства (куба) $L2$	100м
3.	Высота пространства (куба) $H1$	200м
4.	Диаметр выхода дыма из дымовой трубы (outlet1)	20м
5.	Высота дымовой трубы $H2$	150м
6.	Длина здания $L3$	50м
7.	Ширина здания $L4$	16м
8.	Высота здания $H3$	25м
9.	Расстояние между дым. трубы и здания $L5$	300м
10.	Скорость ветра	3м/с
11.	Скорость дыма из дымовой трубы	1м/с
12.	Температура пространства	150С
13.	Температура дыма из дымовой трубы	300°С

Для моделирования выбросов использован ANSYS Workbench, который предоставляет модульный интерфейс для создания геометрии, построения расчетной сетки, задания граничных условий и проведения численного анализа. Описаны основные этапы работы с платформой, включая: создание расчетной области и ее параметризацию; построение гибридной расчетной сетки (Mesh); задание граничных условий для входного и выходного потоков; проведение численного расчета в ANSYS Fluent.

Использовалась модель турбулентности k-ε, позволяющая точно описывать процессы переноса загрязняющих веществ в атмосферу. В результате моделирования получены данные о: давлении и скорости воздушных потоков; векторных полях движения выбросов; распределении температуры и концентрации загрязняющих веществ.

Для анализа рассеивания загрязняющих веществ была использована диффузионная модель, учитывающая влияние времени и метеорологических факторов изображена на рис.10,11.

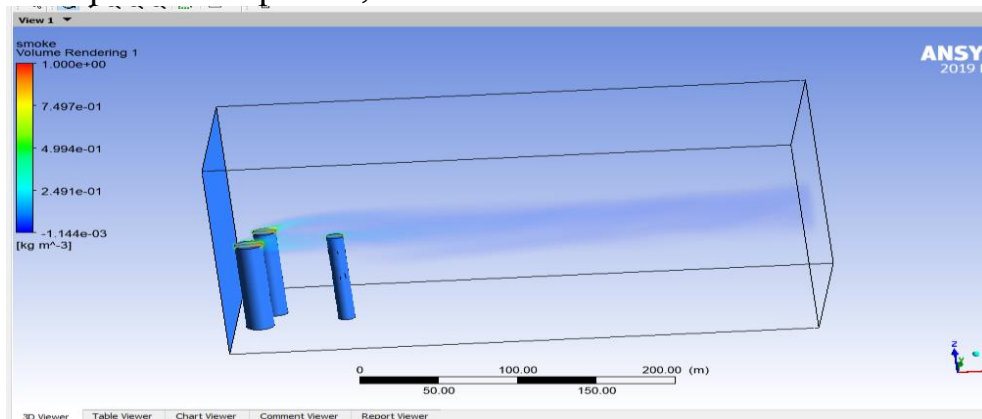


Рисунок 10 – Определение условий нестационарного режима выбросов; задание параметров диффузионного переноса; визуализацию результатов в режиме Transparency

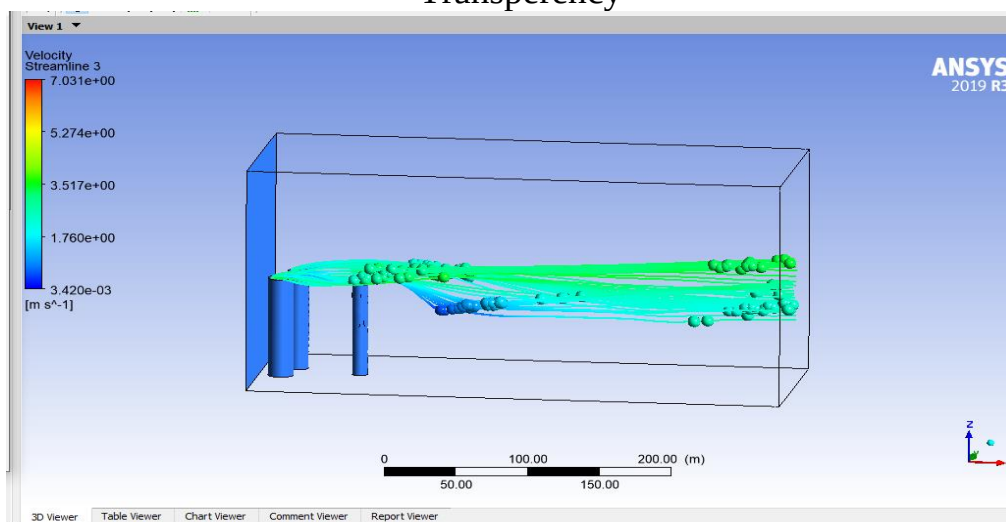


Рисунок 11 - Визуализация результатов в режиме Streamline.

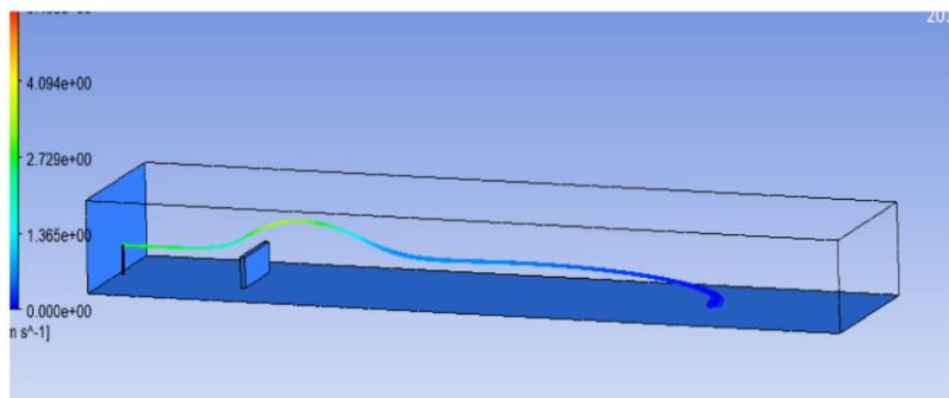


Рисунок 12 – Определение условий нестационарного режима выбросов с учетом препятствия.

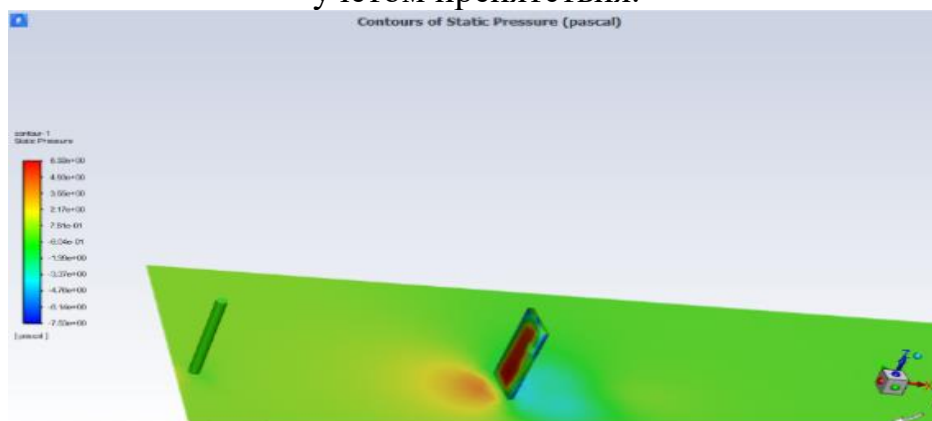


Рисунок 13 – Определение условий нестационарного режима выбросов с учетом препятствия с контуром давления

Результаты моделирования на рис. 12. и рис.13 показали, что выбросы демонстрируют характерное поведение в зависимости от погодных условий, скорости ветра и параметров источника загрязнения.

В результате численного моделирования установлено:

Характер рассеивания выбросов значительно зависит от высоты трубы, скорости ветра и температуры выбросов;

Использование модели турбулентности $k-\epsilon$ позволяет с высокой точностью прогнозировать распределение загрязняющих веществ;

Метод диффузионного переноса в ANSYS CFX позволяет учитывать динамическую изменчивость метеорологических условий;

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации выбросов и разработки рекомендаций по снижению загрязнения воздуха.

Таким образом, численное моделирование в ANSYS Fluent и ANSYS CFX является эффективным инструментом для анализа выбросов и прогнозирования их воздействия на окружающую среду.

Пятая глава посвящена численному моделированию переноса примесей в атмосфере и процессам тепловлагопереноса в пористых средах. Представлены разработанные математические модели, используемые для описания этих процессов, численные методы решения и результаты моделирования для различных сценариев.

В 5.1. рассматриваются математическая модель расчета переноса осредненной по высоте пассивной примеси над термически и орографически неоднородной территорией, включая Кыргызскую Республику. Применена двумерная модель, полученная путем интегрирования по высоте уравнений гидротермодинамики атмосферы.

Введение проблемы обусловлено необходимостью изучения влияния антропогенных факторов на атмосферу, что особенно актуально для территорий с развитой промышленностью и сложными рельефными условиями. В модели используются уравнения движения, неразрывности, переноса тепла и примеси, а также уравнение состояния. Определены краевые и начальные условия, включая влияние рельефа подстилающей поверхности, коэффициенты турбулентности и эффект Кориолиса.

Для численного решения применены консервативно-диссипативные разностные схемы, позволяющие учитывать сложные атмосферные процессы. Численные эксперименты проведены для различных метеорологических условий, включая западный и восточный перенос загрязняющих веществ. Рассмотрены случаи, моделирующие распространение примеси от точечного источника и формирование облака загрязнения.

Результаты расчетов показали значительное влияние топографии поверхности на характер движения воздушных масс и перенос примесей.

Построены изолинии концентрации примеси в зависимости от скорости и направления ветра, определены зоны максимального накопления загрязняющих веществ. Выявлено, что распространение примеси происходит с учетом циркуляции воздушных потоков, обусловленной сложностью рельефа местности.

Раздел 5.2. посвящен математической модели нестационарной фильтрации несжимаемой жидкости в неоднородной пористой среде. Основное внимание уделено учету разрыва пористости, что играет важную роль в гидрологических процессах и при проектировании инженерных систем.

Основные уравнения модели включают уравнение неразрывности, уравнения движения с учетом фильтрационных сил и уравнение фильтрации жидкости для описания течения жидкости через пористую среду. В модели учитываются зоны полного и частичного намокания, движение фронта намокания и особенности взаимодействия жидкости с капиллярными структурами. Также анализируется влияние неоднородности пористой среды на динамику фильтрации, что особенно важно для моделирования процессов инфильтрации и прогнозирования изменения уровня грунтовых вод.

Для численного решения применены разностные схемы и методы последовательной релаксации. Рассмотрены типовые задачи одномерной нестационарной фильтрации, включая импульсный полив, процесс

проникновения жидкости в сухую среду и распространение фронта насыщения. Важное внимание уделено определению градиентов давления и скорости инфильтрации жидкости в различных зонах пористых сред.

Результаты численных экспериментов подтвердили важность учета пространственной неоднородности пористости при моделировании фильтрационных процессов. Полученные данные могут быть использованы при проектировании ирригационных систем, прогнозировании динамики влажности почвы и оценке процессов инфильтрации в грунтовых водах. На основе расчетных данных определены параметры эффективного управления процессами увлажнения почвы и предотвращения засоления.

В выводах приведены полученные в диссертационной работе основные научно-практические результаты.

В приложении содержатся графики среднемесячных температур воздуха за 1921-2021 гг. по месяцам за осенние и весенние месяцы по регионам, листинг разработанного программного кода в ANSYS Fluent и ANSYS CFX, акт внедрения и свидетельства Кыргызпатента на численное моделирование в ANSYS Fluent и ANSYS CFX для анализа выбросов и прогнозирования их воздействия на окружающую среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных научных исследований были получены следующие основные результаты.

1. Прогнозирование среднемесячной температуры воздуха с применением моделей LSTM, XGBoost продемонстрировало высокую точность и обобщающую способность, что позволяет использовать данный подход для долгосрочного прогнозирования климатических изменений.

2. Проведен анализ динамики и прогнозирование выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу.

3. Разработаны численные модели переноса CO_2 и др. загрязняющих веществ в атмосфере, основанные на уравнении Навье-Стокса и диффузионных уравнениях, позволили исследовать влияние различных метеорологических факторов и препятствий на распространение примесей.

4. Получены численные эксперименты, расчет траекторий распространения загрязняющих веществ в атмосфере с учетом турбулентных эффектов и наличия препятствий, используя методы вычислительной гидродинамики выполненные с использованием программных комплексов ANSYS Fluent

5. Получено численное моделирование процессов диффузии загрязняющих веществ в атмосфере от точечного источника с использованием программного комплекса ANSYS CFX, ANSYS CFX, показали, что скорость и дальность распространения загрязняющих веществ зависят от скорости и

направления ветра, температуры выбросов и стабильности атмосферы.

6. Проведен анализ и прогноз среднемесячных сумм осадков за последние 100 лет по данным метеорологических наблюдений, с применением моделей временных рядов и методов машинного обучения;

7. Выполнен численный расчет фильтрации потоков жидкости в пористую среду с учетом разрыва пористости для оценки гидродинамических процессов, влияющих на климатическую систему региона.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Результаты диссертационных исследований могут использоваться:

- для анализа и прогнозирования климатических параметров, оценки выбросов загрязняющих веществ, оптимизации экологической политики и решения задач, связанных с управлением водными ресурсами и устойчивым развитием регионов;

- при экологическом мониторинге и разработке рекомендаций по снижению вредного воздействия промышленных выбросов;

- для адаптации сельскохозяйственного сектора к изменениям климата.

2. На основе прогноза динамики выбросов углекислого газа необходимо разработать меры по сокращению антропогенных выбросов, включая совершенствование законодательства в области экологии и внедрение технологий улавливания CO₂.

3. Прогнозируемый рост выбросов требует усиленного контроля со стороны экологических организаций, что может быть достигнуто за счет автоматизированного мониторинга выбросов с применением технологий машинного обучения.

4. В сельском хозяйстве стоит пересмотреть стратегии орошения, внедряя технологии по накоплению и эффективному использованию атмосферных осадков.

5. Разработанные численные модели переноса загрязняющих веществ могут быть использованы для оптимизации размещения промышленных предприятий и проектирования систем фильтрации выбросов.

6. Созданные математические модели могут быть применены для прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций, связанных с изменением атмосферных процессов.

7. Полученные данные целесообразно использовать при проектировании объектов инфраструктуры, чувствительных к климатическим изменениям (например, гидроэлектростанций, плотин и систем водоснабжения).

8. Результаты численных экспериментов подтверждают необходимость учета метеоусловий при прогнозировании распространения примесей, включая радиоактивные вещества.

9. Рекомендуется создание комплексной системы экологического

мониторинга, основанной на интеграции метеорологических данных и моделей переноса загрязняющих веществ.

10. Выявленные закономерности фильтрации жидкостей в пористых средах можно использовать для рационального управления водными ресурсами, особенно в районах с проблемами водоснабжения.

11. Данные модели могут помочь в прогнозировании риска засух и разработке стратегий по сохранению водных ресурсов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Картанова А.Дж, Сулайманова С.М., Абдрасакова А.Б. Компьютерное моделирование двухфазного течения смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения [Текст] / Проблемы автоматики и управления. №2 (41) 2021г. – С.18 – 25. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46337822>

2. Абдрасакова А.Б., Картанова А.Дж, Сулайманова С.М. Численное моделирование переноса пассивной примеси над ограниченной территорией.[Текст] / Вестник КГУСТА, Вып. 75 (1), Бишкек, 2022г. – С.210 – 216. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48339918>

3. Сулайманова С.М., Абдрасакова А.Б. Анализ климатических данных с помощью нейронных сетей. [Текст] / Вестник КГУСТА, Вып. 77 (3), Бишкек, 2022г. – С.1217 – 1222. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49803702>

4. Абдрасакова А.Б. Компьютерное моделирование температуры воздуха с использованием обобщенных регрессионных нейронных сетей. [Текст] / Известия ВУЗов Кыргызстана, № 2, 2023г. – С.21 – 26. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54762588>

5. Абдрасакова А.Б. Абанын температурасынын өзгөрүшүн болжолдоо үчүн нейрондук тармак ыкмаларын колдонуу. [Текст] / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана, № 5, 2023г. – С.7 – 10. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59741975>

6. Абдрасакова А.Б., Сулайманова С.М. Түтүктөрдөн абаны булгоочу заттардын дисперсиясы үчүн ANSYS - CFX негизинде симуляциялык программасын 3D моделдөө [Текст] / МУИТ. Наука и инновационные технологии. №4, 2023г. – С.13 – 19. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=61486578>

7. Абдрасакова А.Б., Сулайманова С.М. Применения рекуррентных нейронных сетей LSTM для прогнозирования временных рядов среднемесячной температуры воздуха [Текст] / Сулайманова С.М./ МУИТ. Наука и инновационные технологии. №4, 2023г. – С.5 – 7. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=61486574>

РЕЗЮМЕ

диссертации Абдрасаковой Айзады Байышбековны на тему: «Математическое моделирование регионального климата для отдельных областей Кыргызстана» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Ключевые слова: математическое моделирование, региональный климат, прогнозирование температуры, выбросы CO₂, атмосферные осадки, машинное обучение, нейронные сети, LSTM, диффузия загрязняющих веществ, ANSYS Fluent, ANSYS CFX, гидротермодинамика, тепловлагоперенос, фильтрация жидкости, уравнение Навье-Стокса.

Методы исследования – в работе использованы методы машинного обучения (нейросети LSTM, XGBoost, GRNN), численного моделирования атмосферных процессов (уравнения Навье-Стокса, модели турбулентности), а также вычислительная гидродинамика (CFD) в программных комплексах ANSYS Fluent и ANSYS CFX.

Объект исследования – климатические параметры отдельных регионов Кыргызской Республики, включая температуру воздуха, осадки и выбросы углекислого газа (CO₂).

Предмет исследования – математические модели прогнозирования климатических параметров и численные методы анализа атмосферных и гидрологических процессов.

Цель работы – разработка и применение математических моделей для анализа и прогнозирования климатических параметров на основе современных методов машинного обучения и численного моделирования.

Основные результаты и их новизна:

- разработана математическая модель прогнозирования среднемесячной температуры воздуха с использованием нейронных сетей LSTM, XGBoost, GRNN, позволяющая с высокой точностью оценивать температурные изменения за 100-летний период (1921–2021 гг.);
- выполнен прогноз динамики выбросов углекислого газа (CO₂) и парниковых газов, включая аппроксимацию выбросов до 2050 года;
- получена математическая модель турбулентного потока дымовых выбросов с учетом препятствий, основанная на уравнении Навье-Стокса и реализованная в ANSYS Fluent;
- разработана диффузионная модель рассеивания выбросов в атмосфере с учетом метеорологических факторов и рельефа местности в ANSYS CFX;
- проведено численное моделирование фильтрации жидкости в пористых средах с учетом разрыва пористости, позволяющее учитывать
- гидродинамические процессы в неоднородных пластах;
- выполнен анализ среднемесячных осадков за 1921–2021 гг. и построена модель прогнозирования осадков до 2040 года.

Рекомендации по использованию и область применения: Разработанные модели могут быть использованы для климатического

мониторинга, прогнозирования экологических изменений, планирования природоохранных мероприятий, оптимизации выбросов промышленных предприятий, а также в градостроительстве, сельском хозяйстве и управлении водными ресурсами.

Физика-математика илимдеринин кандидаты окумуштуулук даражасын изденип алуу үчүн 05.13.18 – математикалык моделдөө, сандык ыкмалар жана программалык комплекстер адистиги боюнча жазылган Абдрасакова Айзада Байышбековнанын "Кыргызстандын айрым облустары үчүн аймактык климатты математикалык моделдөө" аттуу диссертациясынын

РЕЗЮМЕСИ

Негизги сөздөр: математикалык моделдөө, аймактык климат, температураны болжолдоо, CO₂ чыгындысы, атмосфералык жаан-чачын, машиналык окутуу, нейрондук тармактар, LSTM, булгоочу заттардын диффузиясы, ANSYS Fluent, ANSYS CFX, гидротермодинамика, жылуулук жана нымдуулук өткөрүү, суюктуктун фильтрациясы, Навье-Стокс теңдемеси.

Изилдөөнүн объектиси – Кыргыз Республикасынын айрым аймактарынын климаттык параметрлери, анын ичинде абанын температурасы, жаан-чачын жана көмүр кычкыл газынын (CO₂) бөлүнүп чыгышы.

Изилдөөнүн предмети – климаттык параметрлерди болжолдоонун математикалык моделдери жана атмосфералык жана гидрологиялык процесстерди талдоонун сандык ыкмалары.

Иштин максаты – заманбап машиналык окутуу жана сандык моделдөө ыкмаларынын негизинде климаттык параметрлерди талдоо жана болжолдоо үчүн математикалык моделдерди иштеп чыгуу жана колдонуу.

Изилдөө ыкмалары – иште машиналык окутуу ыкмалары (LSTM, XGBoost, GRNN нейрон торчолору), атмосфералык процесстерди сандык моделдөө (Навье-Стокс теңдемелери, турбуленттүүлүк моделдери), ошондой эле ANSYS Fluent жана ANSYS CFX программалык комплекстеринде эсептөөчү гидродинамика (CFD) колдонулган.

Негизги натыйжалар жана алардын жаңылыгы:

- LSTM, XGBoost, GRNN нейрон торчолорун колдонуу менен абанын орточо айлык температурасын болжолдоонун математикалык модели иштелип чыккан, ал 100 жылдык мезгил ичиндеги (1921–2021-жж.) температуранын өзгөрүүлөрүн жогорку тактыкта баалоого мүмкүндүк берет;
- көмүр кычкыл газынын (CO₂) жана парник газдарынын бөлүнүп чыгышынын динамикасынын болжолу аткарылган, анын ичинде 2050-жылга чейинки чыгарууларды аппроксимациялоо ишке ашырылган;
- Навье-Стокс теңдемесине негизделген жана ANSYS Fluentте ишке ашырылган тоскоолдуктарды эске алуу менен түтүн чыгаруунун турбуленттүү агымынын математикалык модели алынган;
- ANSYS CFXте метеорологиялык факторлорду жана жердин рельефин эске алуу менен атмосферада бөлүнүп чыккан заттардын диффузиялык модели иштелип чыккан;

- бир тектүү эмес катмарлардагы гидродинамикалык процесстерди эске алууга мүмкүндүк берген, көзөнөктүүлүктүн үзүлүшүн эске алуу менен көзөнөктүү чөйрөдө суюктуктун фильтрациясынын сандык моделдөөсү жүргүзүлгөн;

- 1921–2021-жылдар аралыгындагы орточо айлык жаан-чачындын анализи жүргүзүлүп, 2040-жылга чейинки жаан-чачындын болжолдоо модели түзүлгөн.

Колдонуу боюнча сунуштар жана колдонуу чөйрөсү: Иштелип чыккан моделдер климаттык мониторинг, экологиялык өзгөрүүлөрдү болжолдоо, жаратылышты коргоо иш-чараларын пландаштыруу, өнөр жай ишканаларынын чыгарууларын оптималдаштыруу, ошондой эле шаар курууда, айыл чарбасында жана суу ресурстарын башкарууда колдонулушу мүмкүн.

SUMMARY

of the dissertation by Abdrasakov A. Aizada Baiyshbekovna on the topic: "Mathematical Modeling of Regional Climate for Selected Areas of Kyrgyzstan" for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in the specialty 05.13.18 – mathematical Modeling, Numerical Methods, and Software Complexes

Keywords: mathematical modeling, regional climate, temperature forecasting, CO₂ emissions, atmospheric precipitation, machine learning, neural networks, LSTM, pollutant diffusion, ANSYS Fluent, ANSYS CFX, hydrodynamics, heat and moisture transfer, fluid filtration, Navier-Stokes equation.

Object of research – climatic parameters of selected regions of Kyrgyzstan, including air temperature, precipitation, and carbon dioxide (CO₂) emissions.

Subject of research – mathematical models for climate parameter forecasting and numerical methods for analyzing atmospheric and hydrological processes.

Research objective – to develop and apply mathematical models for analyzing and forecasting climate parameters using modern machine learning and numerical modeling techniques.

Research methods – the study employs machine learning methods (LSTM, XGBoost, GRNN), numerical modeling of atmospheric processes (Navier-Stokes equations, turbulence models), and computational fluid dynamics (CFD) in ANSYS Fluent and ANSYS CFX software.

Main results and scientific novelty:

- A mathematical model for forecasting monthly average air temperature using LSTM, XGBoost, GRNN, neural networks has been developed, enabling high-precision assessment of temperature variations over a 100-year period (1921–2021);

- Forecasts of CO₂ and greenhouse gas emissions dynamics have been conducted, including an approximation of emissions trends up to 2050;

- A mathematical model of turbulent smoke plume dispersion, considering obstacles, has been developed based on the Navier-Stokes equation and implemented in ANSYS Fluent;

- A diffusion model for pollutant dispersion in the atmosphere has been created in ANSYS CFX, accounting for meteorological factors and terrain features;

- Numerical modeling of fluid filtration in porous media, considering porosity discontinuities, has been performed to evaluate hydrodynamic processes in heterogeneous formations;
- An analysis of monthly precipitation data from 1921 to 2021 has been conducted, and a precipitation forecasting model has been developed for projections up to 2040.

Practical significance and application: The developed models can be used for climate monitoring, environmental impact assessments, optimization of industrial emissions, and urban and agricultural planning. The results of this study are applicable in hydrology, meteorology, environmental science, and resource management.