

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра дифференциальных уравнений и математической экономики

Иерархический рейтинг регионов по уровню экологической
безопасности

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 451 группы

направления - 38.03.05 Бизнес- информатика

механико-математического факультета

Емелина Ивана Витальевича

Научный руководитель
доцент, к.ф.-м.н., доцент

И.Ю.Выгодчикова

Заведующий кафедрой:
зав.кафедрой, д.ф.-м.н., профессор

С.И. Дудов

Саратов 2025

ВВЕДЕНИЕ

Современные экологические проблемы требуют разработки новых подходов к оценке и управлению экологической безопасностью регионов. Одним из эффективных инструментов является создание рейтинговых систем, которые позволяют количественно оценивать уровень экологической безопасности на основе ключевых показателей. В последние годы активно развиваются методы анализа больших данных (Big Data), машинного обучения и математического моделирования, которые находят применение в экологических исследованиях. Однако вопросы создания иерархических рейтингов регионов с использованием IT-технологий остаются недостаточно изученными, особенно с точки зрения автоматизации расчетов и визуализации результатов.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью применения современных IT-инструментов для решения экологических задач. Существующие подходы к оценке экологической безопасности регионов часто требуют значительных временных затрат на ручную обработку данных и не всегда учитывают динамический характер экологических процессов. Использование IT-технологий позволяет автоматизировать процесс сбора, обработки и анализа данных, что повышает точность и оперативность оценки.

Новизна исследования заключается в разработке IT-ориентированной методологии построения иерархического рейтинга регионов, основанной на математическом моделировании и программировании. Предлагаемый подход использует такие инструменты, как Python для реализации алгоритмов, метод аналитической иерархии (АИР) для определения весовых коэффициентов и визуализацию данных с помощью карт и графиков. Для формализации процесса построения рейтингов была разработана IDEF0-модель, которая позволяет структурировать этапы анализа, выбора показателей и агрегирования данных.

Целью работы является разработка IT-ориентированной методологии построения иерархического рейтинга регионов по уровню экологической безопасности и её реализация в виде программного решения.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ теоретической базы по проблеме экологической безопасности региона и выбрать ключевые показатели для оценки.
2. Разработать математическую модель рейтингования с использованием метода аналитической иерархии (АНР) и реализовать её в Python.
3. Создать алгоритм расчета интегрального показателя экологической безопасности и провести анализ чувствительности к изменению весов.
4. Применить разработанную модель к реальным данным, автоматизировав процесс расчетов и визуализации результатов.
5. Оценить ограничения модели и предложить направления её совершенствования с точки зрения IT-реализации.

Основное содержание работы

Структура выпускной квалификационной работы включает пять глав:

- **Глава 1** посвящена анализу теоретической базы по проблеме экологической безопасности региона, выбору ключевых показателей и методов построения рейтингов. Особое внимание уделяется сравнительному анализу методов построения рейтингов, а также разработке IDEF0-модели для формализации процесса.

- **Глава 2** описывает разработку математической модели и её реализацию в Python, включая блок-схему алгоритма.

- **Глава 3** направлена на прогнозирование экологической безопасности на основе машинного обучения и практическом применении.

- **Глава 4** сфокусирована на применении разработанной модели, расчете интегрального индекса и анализе лидеров/аутсайдеров.

- **Глава 5** включает обсуждение ограничений модели, практическое значение и дальнейшие перспективы.

Научная значимость работы заключается в создании универсальной методологии, которая может быть применена для оценки экологической безопасности регионов в различных странах. Положения, выносимые на защиту, включают разработанную математическую модель, программное решение для автоматизации расчетов и рекомендации по улучшению экологической политики.

Глава 1 посвящена анализу теоретической базы по проблеме экологической безопасности региона. В рамках данного раздела рассмотрено понятие экологической безопасности, которое определяется как состояние защищенности жизненно важных интересов общества и природной среды от возможных угроз, возникающих в результате антропогенного воздействия. Подчеркивается, что экологическая безопасность региона является комплексным показателем, который включает в себя множество факторов, таких как загрязнение воздуха, воды и почвы, уровень промышленного воздействия, качество медицинского обслуживания и состояние природных ресурсов.

Проведен обзор ключевых показателей экологической безопасности, используемых в современных исследованиях. Среди них выделены такие индикаторы, как концентрация загрязняющих веществ в атмосфере, уровень выбросов парниковых газов, площадь лесных массивов, доля перерабатываемых отходов и доступность чистой питьевой воды. Для каждого показателя проведена оценка его значимости и применимости в контексте регионального анализа. На основе проведенного анализа выбраны ключевые показатели, которые легли в основу разработанной методологии.

Особое внимание уделено сравнительному анализу методов построения рейтингов. Рассмотрены различные подходы, включая метод аналитической иерархии (АИР), метод главных компонент (РСА) и метод взвешенной суммы. Показано, что метод аналитической иерархии наиболее подходит для решения поставленной задачи, так как позволяет учитывать как количественные, так и качественные показатели, а также определять весовые коэффициенты на основе экспертных оценок.

Для формализации процесса построения рейтингов разработана IDEF0-модель, которая структурирует этапы анализа, выбора показателей и агрегирования данных. Модель включает в себя три основных блока: входные данные (показатели экологической безопасности), процесс обработки (определение весовых коэффициентов и расчет интегрального индекса) и выходные результаты (рейтинг регионов). Использование IDEF0-модели позволило четко определить последовательность действий и обеспечить прозрачность процесса.

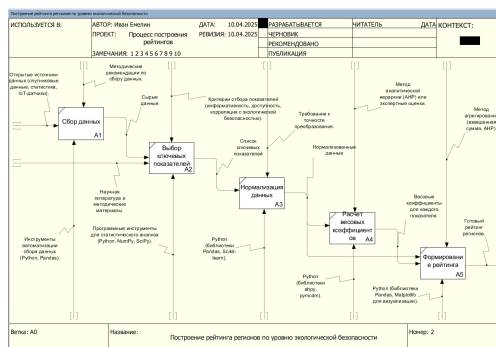


Рисунок 1 — IDEF0 модель ветка A0

Таким образом, первый раздел работы заложил теоретическую основу для дальнейшей разработки математической модели и её практической реализации. Выбранные показатели и методология послужили базой для создания IT-ориентированного решения, описанного в последующих разделах.

Во второй главе описана разработка математической модели и её реализация в Python для построения рейтинга экологической безопасности регионов. Основой модели послужил метод аналитической иерархии (АИР), который позволяет агрегировать качественные и количественные показатели с учетом их весовых коэффициентов. Метод АИР был выбран благодаря его гибкости и возможности учитывать экспертные оценки при определении значимости каждого показателя.

Для реализации модели был разработан алгоритм, состоящий из нескольких этапов. На первом этапе проводится нормализация данных для обеспечения сопоставимости показателей, выраженных в различных единицах измерения. На втором этапе рассчитываются весовые коэффициенты для каждого показателя на основе парных сравнений, выполненных экспертами. Затем производится агрегирование данных с использованием взвешенной суммы, что позволяет получить интегральный индекс экологической безопасности для каждого региона.

Важным элементом работы стала реализация модели в Python. Были написаны скрипты для автоматизации всех этапов расчета, включая предобработку данных, определение весовых коэффициентов и вычисление интегрального индекса. Для наглядности процесса представлена блок-схема

алгоритма, которая отражает последовательность действий: от загрузки исходных данных до формирования итогового рейтинга.

Проведен анализ чувствительности модели к изменению весовых коэффициентов. Показано, что небольшие изменения в значениях весов не оказывают значительного влияния на итоговый рейтинг, что подтверждает устойчивость модели. Также выполнен анализ ошибок и погрешностей, возникающих на этапах расчета, и предложены способы их минимизации.

Для визуализации результатов использовались графики и карты, которые позволяют наглядно представить распределение регионов по уровню экологической безопасности. В частности, построены столбчатые диаграммы, отражающие значения интегрального индекса для каждого региона, и карта с цветовой шкалой, демонстрирующая географическое распределение лидеров и аутсайдеров.

Таким образом, второй раздел работы содержит детальное описание математической модели, её реализацию в Python и анализ результатов. Разработанная модель легла в основу дальнейшего применения и прогнозирования, описанных в последующих разделах.

Глава 3 посвящена прогнозированию экологической безопасности регионов на основе методов машинного обучения. В рамках данного раздела была проведена предобработка данных, включающая очистку от пропусков, нормализацию и преобразование данных в пригодный для анализа формат. Особое внимание уделено обработке выбросов и аномалий, которые могли бы исказить результаты прогнозирования.

Для прогнозирования использовались три модели машинного обучения: линейная регрессия, случайный лес (Random Forest) и градиентный бустинг (Gradient Boosting). Каждая модель была обучена на исторических данных за последние годы (2018–2024), где целевой переменной выступал индекс загрязнения воздуха, а признаками — рейтинг региона, население, уровень промышленного развития и другие факторы. После обучения моделей проведена их оценка с использованием метрик качества, таких как средняя абсолютная ошибка (MAE) и коэффициент детерминации (R^2).

На основе анализа результатов было установлено, что модель градиентного бустинга показала наилучшую производительность, обеспечив высо-

кую точность прогнозов. Прогнозы были выполнены на два года вперед (2025–2026 годы) для каждого региона. Для наглядности результатов построены графики, демонстрирующие динамику изменения индекса экологической безопасности во времени.

Проведена интерпретация результатов прогнозирования. Показано, что регионы с высоким уровнем промышленного развития и плотным населением чаще всего демонстрируют негативные тренды в экологической безопасности. В то же время регионы с развитой экологической политикой и низкой антропогенной нагрузкой сохраняют стабильные или даже положительные тенденции.

В практическом плане результаты прогнозирования могут быть использованы для разработки мер по снижению загрязнения и улучшению экологической ситуации в регионах-аутсайдерах. Например, выявлены регионы, где требуется усиление контроля за выбросами или внедрение новых технологий очистки воздуха. Также предложены рекомендации по адаптации моделей для других стран и регионов, что расширяет возможности применения разработанной методологии.

Таким образом, третий раздел работы содержит описание процесса прогнозирования экологической безопасности, выбора моделей машинного обучения и интерпретации результатов. Полученные прогнозы легли в основу дальнейшего анализа лидеров и аутсайдеров, представленного в следующем разделе.

Глава 4 посвящена применению разработанной модели для построения рейтинга регионов, расчету интегрального индекса экологической безопасности и анализу полученных результатов. На основе данных за последние годы (2018–2024) был рассчитан интегральный индекс для каждого региона, который отражает уровень экологической безопасности с учетом всех выбранных показателей.

Для формирования рейтинга регионы были ранжированы по значениям интегрального индекса. В результате анализа выделены лидеры и аутсайдеры: регионы с высокими значениями индекса характеризуются низким уровнем загрязнения, развитой экологической политикой и устойчивым использованием природных ресурсов. Напротив, регионы-аутсайдеры

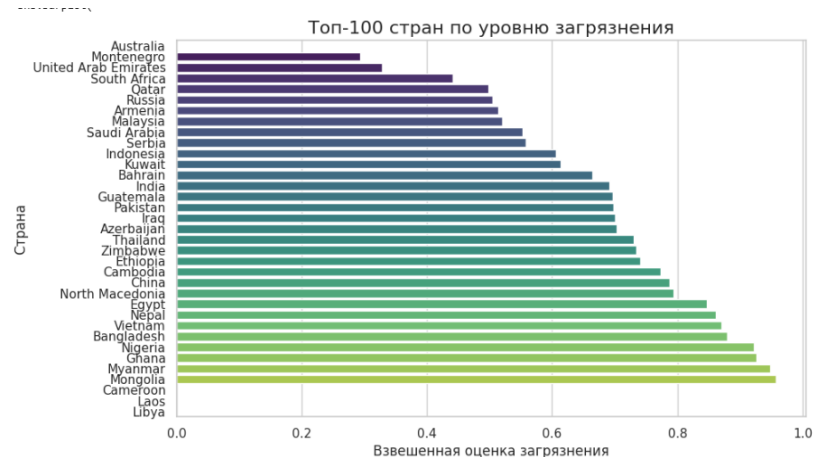


Рисунок 2 — Топ-100 стран по уровню загрязнения

демонстрируют высокий уровень антропогенного воздействия, недостаточную экологическую инфраструктуру и низкую эффективность мер по снижению загрязнения.

Для наглядного представления результатов была проведена визуализация данных. Построены столбчатые диаграммы, отражающие значения интегрального индекса для каждого региона, а также интерактивная карта с цветовой шкалой, демонстрирующая географическое распределение лидеров и аутсайдеров. Карта позволяет быстро выявить проблемные зоны и регионы, требующие особого внимания со стороны органов управления.

Проведен детальный анализ лидеров и аутсайдеров. Установлено, что лидеры рейтинга (например, регионы с развитой экологической политикой и низкой антропогенной нагрузкой) чаще всего расположены в зонах с низкой плотностью населения и минимальным уровнем промышленного производства. В то же время аутсайдеры (регионы с высоким уровнем загрязнения) характеризуются высокой концентрацией промышленных предприятий, интенсивным использованием природных ресурсов и слабой экологической инфраструктурой.

Особое внимание уделено практическому применению результатов. Разработанный рейтинг может быть использован для принятия решений на уровне государственных и региональных органов управления. Например, регионы-аутсайдеры могут стать приоритетными объектами для внедрения новых технологий очистки воздуха, строительства экологических станций

и реализации программ по снижению выбросов. Также предложены рекомендации по совершенствованию системы мониторинга экологической безопасности, включая автоматизацию сбора данных и расширение набора показателей.

Таким образом, четвертый раздел работы содержит описание применения модели, расчет интегрального индекса, анализ лидеров и аутсайдеров, а также практические рекомендации по использованию результатов. Полученные данные легли в основу обсуждения ограничений модели и перспектив её дальнейшего развития, представленных в заключительном разделе.

Глава 5 посвящена обсуждению результатов исследования, оценке ограничений разработанной модели и определению перспектив её дальнейшего развития. В рамках данного раздела проведён критический анализ полученных результатов, выявлены слабые стороны методологии и предложены направления её улучшения.

Одним из основных ограничений модели является зависимость от качества исходных данных. Неполные или неточные данные могут существенно повлиять на точность расчётов и достоверность рейтинга. Кроме того, модель не учитывает некоторые факторы, такие как социальная активность населения, уровень экологической осведомлённости и влияние глобальных изменений климата. Для повышения точности рекомендуется расширить набор показателей и внедрить механизмы автоматической проверки данных.

Ещё одним ограничением является субъективность при определении весовых коэффициентов в методе аналитической иерархии (АИ). Экспертные оценки могут варьироваться в зависимости от состава экспертов и их профессионального опыта. Для минимизации этого эффекта предлагается использовать более объективные методы, такие как метод главных компонент (РСА), или комбинировать АИ с другими подходами.

Несмотря на ограничения, разработанная методология имеет значительную практическую ценность. Она может быть использована для мониторинга экологической безопасности регионов, выявления проблемных зон и разработки мер по снижению загрязнения. Результаты исследова-

ния также могут быть полезны для государственных органов управления, экологических организаций и научного сообщества.

Перспективы дальнейших исследований включают:

- Расширение набора показателей за счет включения новых факторов, таких как биоразнообразие, уровень шума и радиационный фон.
- Разработку моделей прогнозирования на основе более сложных алгоритмов машинного обучения, таких как нейронные сети.
- Создание единой информационной системы для сбора, обработки и анализа данных в режиме реального времени.
- Адаптацию методологии для использования на международном уровне, что позволит проводить сравнительный анализ экологической безопасности стран и регионов.

Таким образом, пятый раздел работы содержит обсуждение ограничений модели, её практической значимости и перспектив дальнейшего развития. Полученные результаты подтверждают актуальность темы исследования и открывают новые горизонты для совершенствования методологии оценки экологической безопасности регионов.

Основные результаты работы

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана IT-ориентированная методология построения иерархического рейтинга регионов по уровню экологической безопасности. Основные результаты исследования включают:

1. Разработка математической модели рейтингования. На основе метода аналитической иерархии (АИР) создана модель, позволяющая агрегировать количественные и качественные показатели экологической безопасности. Модель учитывает такие факторы, как загрязнение воздуха, воды и почвы, уровень промышленного воздействия и качество медицинского обслуживания.

2. Реализация модели в Python. Разработаны скрипты для автоматизации всех этапов расчета, включая предобработку данных, определение весовых коэффициентов и вычисление интегрального индекса. Блок-схема алгоритма обеспечила наглядность и прозрачность процесса.

3. Прогнозирование экологической безопасности. С использованием методов машинного обучения (линейная регрессия, случайный лес, градиентный бустинг) выполнен прогноз на 2025–2026 годы. Установлено, что регионы с высоким уровнем промышленного развития чаще демонстрируют негативные тренды.

4. Построение рейтинга регионов. Рассчитан интегральный индекс для каждого региона, выделены лидеры и аутсайдеры. Проведена визуализация результатов с помощью графиков и интерактивных карт, что позволило наглядно представить географическое распределение экологической безопасности.

5. Оценка ограничений и предложение направлений совершенствования. Выявлены слабые стороны модели, такие как зависимость от качества данных и субъективность при определении весовых коэффициентов. Предложены пути улучшения, включая расширение набора показателей и использование более сложных алгоритмов прогнозирования.

Научная значимость работы заключается в создании универсальной методологии, которая может быть адаптирована для оценки экологической безопасности регионов в различных странах. Практическая ценность подтверждается возможностью применения результатов для принятия решений на уровне государственных и региональных органов управления.

Положения, выносимые на защиту, включают:

- Разработанную математическую модель рейтингования с использованием метода аналитической иерархии.
- Программное решение для автоматизации расчетов и визуализации результатов.
- IDEF0-модель для формализации процесса построения рейтингов.
- Рекомендации по улучшению экологической политики на основе анализа лидеров и аутсайдеров.

Таким образом, данная работа представляет собой комплексное исследование, направленное на решение актуальной экологической проблемы. Полученные результаты могут быть использованы для мониторинга экологической безопасности, выявления проблемных зон и разработки мер по снижению загрязнения. Перспективы дальнейших исследований включают

расширение методологии, внедрение новых технологий и адаптацию модели для международного уровня.