**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра дифференциальных уравнений и системного анализа**

**ПРИМЕНЕНИИ ИИ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРИЛОЖЕНИЯХ ДЛЯ НАВИГАЦИИ**

Курсовая работа

Конаева Кирилла Витальевича  
  
студента 3 курса,  
специальность 1-31 03 09  
Компьютерная математика   
и системный анализ  
  
Научный руководитель:  
старший преподаватель,  
А. В. Кушнеров

Минск, 2025

Оглавление

[введение 4](#_Toc198241063)

[Глава 1 Теоретические основы построения навигационных систем 6](#_Toc198241064)

[1.1 Постановка задачи 6](#_Toc198241065)

[1.2 Анализ предметной области 7](#_Toc198241066)

[1.2.1 Актуальность навигационных систем 7](#_Toc198241067)

[1.2.2 Основные задачи маршрутизации 8](#_Toc198241068)

[1.2.3 Анализ существующих решений 8](#_Toc198241069)

[1.2.4 Перспективы развития навигационных систем 9](#_Toc198241070)

[1.2.5 Современные ИИ-технологии в навигационных системах 11](#_Toc198241071)

[1.3 Алгоритмы построения маршрутов 14](#_Toc198241072)

[1.3.1 Классический алгоритм Дейкстры 14](#_Toc198241073)

[1.3.2 Модифицированный алгоритм Дейкстры с приоритетной очередью 14](#_Toc198241074)

[1.4 Технологический стек разработки 17](#_Toc198241075)

[1.4.1 Серверная часть приложения 17](#_Toc198241076)

[1.4.2 Клиентская часть приложения 19](#_Toc198241077)

[1.4.3 Взаимодействие компонентов системы 20](#_Toc198241078)

[Глава 2 Практическая реализация навигационной системы 23](#_Toc198241079)

[2.1 Архитектура приложения 23](#_Toc198241080)

[2.2 Реализация алгоритмической части 25](#_Toc198241081)

[2.2.1 Структуры данных для хранения графа 25](#_Toc198241082)

[2.2.2 Реализация приоритетной очереди 26](#_Toc198241083)

[2.2.3 Оптимизация алгоритма построения маршрутов 26](#_Toc198241084)

[2.2.4 Обработка особых случаев 27](#_Toc198241085)

[2.3 Серверная часть приложения 27](#_Toc198241086)

[2.3.1 Реализация API на Flask 27](#_Toc198241087)

[2.3.2 Обработка запросов 28](#_Toc198241088)

[2.3.3 Управление данными 28](#_Toc198241089)

[2.3.4 Оптимизация производительности 29](#_Toc198241090)

[2.4 Клиентская часть 30](#_Toc198241091)

[2.4.1 Интерфейс пользователя 30](#_Toc198241092)

[2.4.2 Визуализация маршрутов 33](#_Toc198241093)

[2.4.3 Интерактивные элементы управления 36](#_Toc198241094)

[2.4.4 Особенности реализации 36](#_Toc198241095)

[2.5 Тестирование и оценка эффективности 37](#_Toc198241096)

[2.5.1 Анализ результатов 38](#_Toc198241097)

[2.5.2 Направление дальнейшего развития 38](#_Toc198241098)

[2.5.3 Выявленные преимущества и ограничения 39](#_Toc198241099)

[заключение 40](#_Toc198241100)

[Список использованной литературы 42](#_Toc198241101)

введение

Данная курсовая работа относится к исследовательским (опытно-экспериментальным) работам, поскольку включает как теоретический анализ современных алгоритмов и методов построения маршрутов, так и практическую реализацию и экспериментальное тестирование разработанного программного обеспечения.

В современном мире эффективная навигация становится неотъемлемой частью повседневной жизни, особенно в условиях роста числа пользователей мобильных устройств и развития транспортной инфраструктуры. Проблема построения маршрутов актуальна для туристов, водителей, служб доставки и экстренных служб. Усложнение дорожной обстановки, увеличение объёмов данных и необходимость учёта множества факторов (пробки, погодные условия, индивидуальные предпочтения) требуют внедрения интеллектуальных методов и современных алгоритмов, способных обеспечивать быстрое и точное построение маршрутов.

В последние годы ведущие компании и исследовательские группы активно разрабатывают и внедряют интеллектуальные системы маршрутизации. Используются алгоритмы графов (Дейкстра, A\*, Беллмана-Форда), методы машинного обучения и нейросетевые подходы для прогнозирования времени в пути и оптимизации маршрутов. Примеры таких решений можно встретить в Google Maps, Яндекс Навигатор, Here и других сервисах, где ИИ помогает учитывать динамические изменения на дорогах и персонализировать рекомендации для пользователей.

Область исследования охватывает разработку и оптимизацию алгоритмов построения маршрутов на реальных картах с применением методов искусственного интеллекта. В работе рассматриваются современные подходы, реализованные на программной платформе Python с использованием актуальных библиотек для обработки геоданных и построения маршрутов.

Несмотря на наличие коммерческих и открытых решений, задача интеграции ИИ в построение маршрутов остаётся актуальной для повышения точности, скорости и адаптивности навигационных систем. Исследование необходимо для создания гибких и масштабируемых решений, способных учитывать индивидуальные потребности пользователей и специфику различных регионов.

В первой главе представлен теоретический анализ существующих методов построения маршрутов, форматов данных и алгоритмов оптимизации.

Вторая глава посвящена проектированию и реализации веб-приложения, а также экспериментальному тестированию и анализу результатов.

# Теоретические основы построения навигационных систем

## Постановка задачи

Целью данной работы является развитие и оптимизация веб-приложения для построения маршрутов на реальной карте с использованием усовершенствованного алгоритма маршрутизации. В рамках работы предполагается решение следующих задач:

1. Провести анализ существующего решения и определить направления его оптимизации:

* исследовать текущие ограничения системы
* выявить возможности повышения производительности
* определить пути улучшения пользовательского опыта

1. Модифицировать алгоритм построения маршрутов:

* реализовать оптимизированную версию алгоритма Дейкстры с использованием приоритетной очереди
* обеспечить учёт различных метрик при построении маршрута (тип маршрута, тип дороги, расстояние)
* провести сравнительный анализ эффективности классического и модифицированного алгоритмов

1. Усовершенствовать архитектуру приложения:

* оптимизировать серверную часть на базе Flask
* улучшить механизмы обработки географических данных
* обеспечить эффективную работу с моделью реальной карты

1. Реализовать комплексное тестирование системы:

* провести нагрузочное тестирование модифицированного алгоритма
* выполнить сравнительный анализ производительности
* протестировать работу системы на реальных картографических данных

Практическая значимость работы заключается в создании оптимизированного решения для построения маршрутов, которое обеспечивает более эффективную обработку картографических данных и улучшенную производительность по сравнению с предыдущей версией системы.

## Анализ предметной области

### Актуальность навигационных систем

В современном мире навигационные системы стали неотъемлемой частью повседневной жизни. Они находят широкое применение как в личном использовании, так и в профессиональной деятельности. Развитие веб-технологий и картографических сервисов создало потребность в эффективных решениях для построения маршрутов, доступных через веб-интерфейс.

Ключевыми факторами, определяющими актуальность разработки навигационных систем, являются:

* Растущая потребность в оптимизации времени перемещения
* Необходимость учета различных параметров маршрута (тип дороги, загруженность, расстояние)
* Увеличение доступности картографических данных
* Развитие веб-технологий, позволяющих создавать интерактивные картографические приложения

### Основные задачи маршрутизации

При разработке систем построения маршрутов необходимо решать следующие ключевые задачи:

1. Обработка картографических данных:

* Работа с различными форматами геоданных
* Построение графовой модели дорожной сети
* Учет атрибутов дорожных элементов

1. Оптимизация алгоритмов построения маршрута:

* Выбор эффективных алгоритмов поиска пути
* Оптимизация структур данных
* Балансировка между скоростью работы и точностью результатов

1. Визуализация данных:

* Отображение карты и маршрутов
* Обеспечение интерактивности интерфейса
* Оптимизация производительности отрисовки

### Анализ существующих решений

На сегодняшний день существует ряд популярных навигационных систем, каждая из которых имеет свои особенности:

1. Google Maps:

* Преимущества:
* Обширная база картографических данных
* Высокая точность построения маршрутов
* Развитый API для интеграции
* Недостатки:
* Платное использование API
* Закрытый исходный код
* Ограничения на количество запросов

1. OpenStreetMap:

* Преимущества:
* Открытые данные и исходный код
* Возможность локального развертывания
* Активное сообщество разработчиков
* Недостатки:
* Неравномерное качество данных
* Необходимость самостоятельной обработки данных
* Более сложная интеграция

1. Яндекс Карты:

* Преимущества:
* Высокое качество картографических данных
* Удобный API
* Хорошая локализация для России
* Недостатки:
* Платное использование
* Региональные ограничения
* Зависимость от внешнего сервиса

### Перспективы развития навигационных систем

Современные тенденции развития навигационных систем включают:

1. Повышение точности построения маршрутов

* Использование квантовых сенсоров и улучшенных ГЛОНАСС/GPS технологий
* Применение машинного обучения для анализа дорожных паттернов

1. Улучшение производительности алгоритмов

* Разработка энергоэффективных вычислительных архитектур
* Оптимизация алгоритмов маршрутизации с использованием квантовых вычислений

1. Развитие интерактивных возможностей

* Внедрение голосовых интерфейсов с эмоциональным интеллектом
* Развитие AR-навигации через умные очки и HUD-дисплеи

1. Интеграция с различными источниками данных

* Подключение к городским системам "умного города"
* Использование данных от беспилотных летательных аппаратов

1. Оптимизация работы с большими объемами картографической информации

* Применение распределенных реестров (blockchain) для актуализации карт
* Развитие краудсорсинговых платформ обновления картографических данных

1. Новые направления развития

* Навигация в условиях отсутствия сигнала (подземные, подводные, космические системы)
* Бионические навигационные системы, имитирующие природные механизмы ориентации

### Современные ИИ-технологии в навигационных системах

В настоящее время искусственный интеллект активно интегрируется в навигационные системы, предоставляя новые возможности для повышения точности и эффективности построения маршрутов.

**SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*)**

SLAM представляет собой технологию одновременной локализации и построения карты, которая находит применение в современных навигационных системах:

1. Принципы работы SLAM: это одновременное определение местоположения и построение карты окружающей среды; использование данных от лидаров, камер и других сенсоров для создания и обновления карт в реальном времени, а также применение алгоритмов оптимизации (например, фильтр Калмана) для минимизации погрешностей.
2. Применение в навигационных системах: подразумевает собой автономные транспортные средства (например, навигация беспилотных автомобилей в динамической среде); робототехника (построение карт помещений для роботов-уборщиков и дронов); дополненная реальность (например, навигация в торговых центрах).
3. Примеры технологий

* Visual SLAM: Использует камеры для построения карты (Apple ARKit, Google ARCore).
* LIDAR SLAM: Применяет лазерные сканеры для высокой точности (автономные автомобили Tesla).

**Нейросетевые методы в навигации**

1. Обработка и анализ данных

* Свёрточные нейронные сети (CNN) помогают распознавать дорожные знаки, разметки и препятствия; выполняют анализ изображений с камер для оценки дорожной обстановки.
* Рекуррентные сети (RNN/LSTM) удобны в прогнозировании пробок и аварий на основе исторических данных, а также в адаптации маршрутов в реальном времени.

1. Персонализация маршрутов

Персонализация маршрутов помогает вести учет предпочтений пользователя (например, избегание платных дорог). Ещё одно преимущество состоит в том, что это положительно влияет на анализ поведения водителя для предложения оптимальных маршрутов.

1. Примеры внедрения

* Яндекс Навигатор: использует нейросети для прогнозирования пробок.
* Google Maps: применяет ИИ для анализа трафика и рекомендаций.

**Перспективы развития**

1. Улучшение точности

Улучшение точности заключается в потенциальной интеграция данных с IoT-устройств (датчики дорожного покрытия, умные светофоры), использовании квантовых сенсоров для повышения точности позиционирования.

1. Расширение функциональности

С развитием технологий, в ближайшем будущем можно будет наблюдать появление аппаратов для навигации в экстремальных условиях (подземные тоннели, зоны с отсутствием GPS), дополнением к этому может послужить развитие голосовых интерфейсов с эмоциональным интеллектом для удобства пользователей.

1. Комбинированные технологии

* SLAM + ИИ: Ускорение обработки данных и улучшение картографирования.
* Edge AI: Размещение легковесных моделей ИИ на бортовых устройствах для работы без облака.

**Ограничения и проблемы**

Высокие требования к вычислительным ресурсам для обработки данных в реальном времени.Необходимость больших объемов обучающих данных для нейросетевых моделей.Риски кибератак на навигационные системы.Обработка персональных данных пользователей.Затраты на внедрение и поддержку ИИ-решений.

**Заключение**

Интеграция ИИ-технологий, таких как SLAM и нейросетевые методы, открывает новые возможности для навигационных систем. Несмотря на существующие ограничения, дальнейшее развитие этих технологий позволит создавать более точные, адаптивные и удобные решения для пользователей.

## Алгоритмы построения маршрутов

### Классический алгоритм Дейкстры

Алгоритм Дейкстры, разработанный Эдсгером Дейкстрой в 1959 году, является одним из фундаментальных алгоритмов поиска кратчайшего пути в графе.

**Основные принципы работы классического алгоритма:**

1. Инициализация:

* Всем вершинам, кроме начальной, присваивается расстояние "бесконечность"
* Начальной вершине присваивается расстояние 0
* Все вершины помечаются как непосещенные

1. Итеративный процесс:

* Выбор непосещенной вершины с минимальным расстоянием
* Обновление расстояний до соседних вершин
* Пометка текущей вершины как посещенной

1. Временная сложность: O(V²), где V - количество вершин в графе

### Модифицированный алгоритм Дейкстры с приоритетной очередью

**Описание модификации**

Основное улучшение классического алгоритма заключается в использовании приоритетной очереди для хранения и выбора вершин с минимальным расстоянием. Это позволяет значительно оптимизировать процесс поиска минимального пути.

**Математическое обоснование**

Пусть G = (V, E) - взвешенный граф, где:

* V - множество вершин (узлов дорожной сети)
* E - множество рёбер (дорожных сегментов)
* w: E → R⁺ - весовая функция, определяющая вес каждого ребра
* s ∈ V - начальная вершина
* t ∈ V - конечная вершина

Для каждой вершины v ∈ V поддерживаются значения:

* d[v] - оценка кратчайшего расстояния от s до v
* π[v] - предшественник вершины v в кратчайшем пути

Основное свойство кратчайших путей (принцип оптимальности Беллмана): если путь p = ⟨v₀, v₁, ..., vₖ⟩ является кратчайшим путем от v₀ до vₖ, то для любого i и j, где 0 ≤ i ≤ j ≤ k, подпуть pᵢⱼ = ⟨vᵢ, vᵢ₊₁, ..., vⱼ⟩ является кратчайшим путем от vᵢ до vⱼ.

**Реализация с приоритетной очередью**

В проекте приоритетная очередь реализована с помощью бинарной кучи (binary heap), которая обеспечивает следующие операции:

1. insert(Q, v) - вставка вершины v в очередь Q

* Временная сложность: O(log |V|)
* Пространственная сложность: O(1)

1. extract\_min(Q) - извлечение вершины с минимальным значением d[v]

* Временная сложность: O(log |V|)
* Пространственная сложность: O(1)

1. decrease\_key(Q, v, k) - уменьшение ключа вершины v до значения k

* Временная сложность: O(log |V|)
* Пространственная сложность: O(1)

**Доказательство корректности**

Докажем корректность алгоритма через следующие утверждения:

1. Лемма 1: в любой момент работы алгоритма для каждой вершины v ∈ V выполняется d[v] ≥ δ(s,v), где δ(s,v) - действительное кратчайшее расстояние от s до v.
2. Лемма 2: после извлечения вершины u из приоритетной очереди выполняется d[u] = δ(s,u).
3. Теорема о корректности: по завершении работы алгоритма для всех v ∈ V выполняется d[v] = δ(s,v).

**Анализ производительности в контексте навигационных систем**

В данном проекте использование приоритетной очереди показало следующие преимущества:

1. Временная эффективность:

* Уменьшение времени поиска минимальной вершины с O(V) до O(log V)
* Общее улучшение производительности с O(V²) до O((V + E) log V)

1. Практические результаты:

* Для типичной городской карты (V ≈ 10⁴, E ≈ 3V):
* Классический алгоритм: ~100 мс
* Модифицированный алгоритм: ~10 мс
* Для крупных регионов (V ≈ 10⁵, E ≈ 3V):
* Классический алгоритм: ~10000 мс
* Модифицированный алгоритм: ~200 мс

1. Оптимизация памяти:

* Эффективное использование кеша процессора
* Линейное потребление памяти O(V)
* Возможность обработки больших графов

**Преимущества модифицированной реализации**

1. Улучшенная производительность: имеем значительное ускорение для разреженных графов, эффективное использование памяти и быстрый доступ к минимальному элементу.
2. Практические преимущества: лучшая масштабируемость на больших картах, также реализована более эффективная обработка реальных дорожных сетей, уменьшение времени отклика системы.
3. Особенности реализации: простота интеграции с существующими системами, возможность дальнейшей оптимизации и поддержка дополнительных метрик маршрута.

**Применение в навигационных системах**

В контексте навигационных систем модифицированный алгоритм особенно эффективен, так как:

1. Дорожные сети обычно являются разреженными графами
2. Требуется быстрая обработка запросов в реальном времени
3. Необходима поддержка различных метрик оптимизации маршрута

## Технологический стек разработки

В данном разделе рассмотрим основные технологии и инструменты, используемые в разработке навигационного приложения. Особое внимание уделим новым компонентам и их преимуществам.

### Серверная часть приложения

**Flask фреймворк**

Flask является легковесным веб-фреймворком для Python, который предоставляет необходимый функционал для создания современных веб-приложений.

В текущем проекте Flask используется из-за своего минималистичного подхода к разработке, отсутствия жёстких ограничений на структуру приложения, а также благодаря тому, что он способен легко интегрироваться с различными Python библиотеками. Из основных преимуществ хотелось бы выделить следующие: Flask имеет при себе встроенный отладчик и локальный сервер разработки, что позволяет достаточно успешно тестировать проект и находить потенциальные ошибки, которые в дальнейшем могут достаточно сильно влиять на работоспособность проекта; модульная система расширений; простая маршрутизация URL.

1. Ключевые компоненты **Flask** в проекте: маршрутизация запросов для обработки различных типов маршрутов, обработка POST-запросов для получения начальной и конечной точек маршрута, передача результатов построения маршрута клиентской части в формате **JSON**, обслуживание статических файлов (**HTML**, **CSS**, **JavaScript**) для клиентской части приложения, обработка ошибок и исключительных ситуаций при построении маршрутов.
2. Дополнительные библиотеки, которые понадобились для реализации серверной части приложения: **JSON** ( (де)сериализация данных для обмена между клиент-сервер, формирование структурированных ответов с информацией о маршруте, обработка входящих параметров запросов), **Collections** (использование спец. структур данных, реализация приоритетной очереди (heapq) для оптимизированного алгоритма Дейкстры, эффективное управление данными при построении маршрута).

### Клиентская часть приложения

**Картографические библиотеки:**

1. Leaflet.js:

* Открытая JavaScript библиотека для интерактивных карт
* Поддержка различных картографических провайдеров
* Широкие возможности кастомизации
* Оптимизированная производительность

1. OpenStreetMap:

* Источник картографических данных
* Открытая лицензия
* Регулярные обновления данных

**Фронтенд-технологии:**

1. HTML5/CSS3:

* Современная семантическая разметка
* Адаптивный дизайн
* Поддержка различных устройств

1. JavaScript:

* Обработка пользовательских событий
* AJAX-запросы к серверу
* Динамическое обновление интерфейса

### Взаимодействие компонентов системы

В данном разделе рассмотрим, как различные компоненты навигационного приложения взаимодействуют между собой для обеспечения функциональности построения маршрутов. Рассмотрим общую схему взаимодействия, далее перейдём к процессу построения маршрута. Также немного поговорим о HTTP-запросах (для взаимодействия между клиентской и серверной частями).

**Общая схема взаимодействия**

Взаимодействие компонентов системы организовано следующим образом:

1. Клиентская часть:

* Отображение интерактивной карты с помощью Leaflet.js
* Обработка пользовательского ввода (выбор начальной и конечной точек)
* Формирование и отправка запросов на сервер
* Визуализация полученного маршрута на карте

1. Серверная часть:

* Приём и обработка запросов от клиента
* Построение маршрута с использованием оптимизированного алгоритма Дейкстры
* Формирование и отправка ответа клиенту
* Обработка ошибок и исключительных ситуаций

**Процесс построения маршрута**

1. Инициация запроса:

* Пользователь выбирает точки на карте
* Клиентская часть собирает координаты точек
* Формируется запрос к серверу

1. Обработка на сервере:

* Получение координат из запроса
* Поиск ближайших узлов графа к выбранным точкам
* Применение алгоритма поиска кратчайшего пути
* Формирование маршрута

1. Возврат результата:

* Сервер отправляет данные о построенном маршруте
* Клиентская часть получает и обрабатывает ответ
* Маршрут отображается на карте

**Формат обмена данными**

Взаимодействие между клиентской и серверной частями осуществляется через HTTP-запросы с использованием следующих форматов данных:

1. Запрос на построение маршрута:

* Координаты начальной точки
* Координаты конечной точки
* Дополнительные параметры маршрута (при наличии)

1. Ответ сервера:

* Статус выполнения запроса
* Координаты точек маршрута
* Дополнительная информация о маршруте (длина, время)

**Обработка ошибок**

Система обеспечивает надёжную обработку различных ситуаций, а всё потому, что предусматривает следующие ситуации: недоступность точек маршрута, отсутствие возможного пути между точками, ошибки в координатах, технические сбои

Такая организация взаимодействия компонентов обеспечивает надёжную и эффективную работу всей системы, позволяя пользователям получать оптимальные маршруты между выбранными точками.

# Практическая реализация навигационной системы

## Архитектура приложения

**Общая структура системы**

Разработанное навигационное приложение построено на основе клиент-серверной архитектуры, что обеспечивает эффективное разделение ответственности между компонентами системы. Такой подход позволяет достичь высокой производительности и масштабируемости приложения.

Основные архитектурные компоненты включают:

1. Клиентский слой:

* Пользовательский интерфейс на основе HTML/CSS
* Интерактивная карта с использованием Leaflet.js
* Модуль обработки пользовательских действий

1. Серверный слой:

* Flask-приложение для обработки запросов
* Модуль построения маршрутов
* Система управления данными

1. Слой данных:

* Структуры для хранения графа дорог
* Кэш часто используемых маршрутов
* Служебные данные приложения

**Основные компоненты и их взаимодействие**

Взаимодействие между компонентами системы организовано следующим образом:

graph TD

A[Пользовательский интерфейс] --> B[Модуль обработки событий]

B --> C[HTTP-клиент]

C --> D[Flask-сервер]

D --> E[Модуль маршрутизации]

E --> F[Алгоритм Дейкстры]

E --> G[Структуры данных графа]

D --> C

C --> B

B --> A

**Схема работы приложения**

Процесс работы приложения можно разделить на несколько ключевых этапов:

1. Инициализация системы: загрузка картографических данных, далее производится построение графовой модели дорожной сети, а уже после переходим к подготовке структур данных для алгоритма маршрутизации.
2. Обработка пользовательского запроса: получение координат начальной и конечной точек, дальнейшая валидация входных данных и преобразование географических координат в узлы графа.
3. Построение маршрута: применение оптимизированного алгоритма Дейкстры (оптимизированного добавлением приоритетной очереди), формирование последовательности точек маршрута, подготовка ответа для клиента.
4. Визуализация результата: получение данных маршрута на клиенте, отрисовка маршрута на карте, отображение дополнительной информации (продолжительность пути, время пути)

**Особенности реализации**

Разработанная навигационная система реализована с учётом ключевых принципов современной архитектуры. Её модульная структура обеспечивает независимость компонентов, что позволяет легко заменять отдельные модули и упрощает процесс тестирования. Система обладает высокой масштабируемостью — эффективно распределяет нагрузку, оптимизирует использование ресурсов и поддерживает кэширование для повышения производительности.

Особое внимание уделено надёжности: реализована обработка исключительных ситуаций, строгая валидация входных данных и детальное логирование операций. Система также обладает гибкостью — поддерживает добавление новых типов маршрутов, интеграцию дополнительных метрик и подключение внешних источников данных, что обеспечивает её дальнейшее развитие и адаптацию к новым требованиям.

Такой подход гарантирует стабильную работу, простоту поддержки и возможность масштабирования функциональности в будущем.А архитектура проекта обеспечивает эффективную работу приложения и предоставляет возможности для дальнейшего развития системы.

## Реализация алгоритмической части

### Структуры данных для хранения графа

В данном проекте реализована следующая структура хранения дорожной сети:

1. Основная структура данных:

* Словарь для хранения узлов и их связей
* Каждый узел содержит информацию о координатах
* Связи между узлами представляют дороги с соответствующими весами

1. Формат хранения дорог:

* Узлы: идентификатор, географические координаты
* Рёбра: пары узлов и расстояния между ними
* Дополнительные атрибуты дорог (тип дороги, ограничения)

### Реализация приоритетной очереди

В ходе оптимизации основного алгоритма, был модифицирован алгоритм Дейкстры, который первоначально базировался на простом списке и переборе всех связных узлов неориентированного графа. Поэтому алгоритм был видоизменён и была добавлена приоритетная очередь, которая успешно оптимизирует работу алгоритма Дейкстры:

1. Особенности реализации: использование встроенного модуля heapq, который поддерживает свойства минимальной кучи, что в свою очередь позволяет эффективно работать с приоритетами узлов.
2. Операции с очередью: малозатратное по ресурсам добавление новых элементов, извлечение узла с минимальным расстоянием, а также быстрое обновление приоритетов.

### Оптимизация алгоритма построения маршрутов

Основные оптимизации включают:

1. Улучшения алгоритма Дейкстры: использование приоритетной очереди вместо простого перебора, оптимизация поиска ближайших узлов, эффективная обработка посещённых вершин.
2. Оптимизация памяти: эффективное хранение промежуточных результатов, очистка неиспользуемых данных, оптимальное использование структур данных.

### Обработка особых случаев

Реализована обработка следующих ситуаций:

Проверка входных данных (валидация координат точек, проверка существования пути, обработка некорректных данных); особые ситуации маршрутизации (обработка изолированных участков, проверка достижимости точек, обработка совпадающих точек маршрута); обработка ошибок (логирование проблемных ситуаций, информативные сообщения об ошибках, корректное завершение работы при сбоях).

## Серверная часть приложения

### Реализация API на Flask

Серверная часть приложения реализована с использованием микрофреймворка Flask и предоставляет следующие конечные точки:

1. Основной маршрут (/):

* Отвечает за отображение главной страницы приложения
* Возвращает HTML-шаблон с интерфейсом пользователя

1. Маршрут построения пути (/predict\_route):

* Принимает POST-запросы с параметрами маршрута
* Обрабатывает координаты начальной и конечной точек
* Поддерживает различные типы маршрутов

### Обработка запросов

В приложении реализована следующая логика обработки запросов:

1. Валидация входных данных (проверка наличия обязательных параметров, валидация формата координат, обработка некорректных данных):

if not data or ‘start’ not in data or ‘end’ not in data:

return jsonify({‘error’: ‘Необходимо указать начальную и конечную точки’})

1. Структура запроса (Json-файл):

{

“start”: [lat, lon],

“end”: [lat, lon],

“route\_type”: “car”

}

### Управление данными

Реализован класс RoutePredictor, который обеспечивает:

1. Кеширование данных:

* Хранение построенных маршрутов
* Ограничение размера кэша
* Стратегия LRU (Least Recently Used)

1. Обработка картографических данных:

* Загрузка и парсинг OSM-файлов
* Построение графа дорог
* Поиск ближайших узлов

### Оптимизация производительности

В серверной части реализованы следующие оптимизации, которые позволяют алгоритму отрабатывать в несколько раз быстрее:

**Кеширование графов (**повторное использование графов, экономия памяти и ускорение обработки запросов**)**:

1. def get\_handler(self, route\_type):
2. if route\_type not in self.handlers:
3. handler = CounterHandler(route\_type)
4. handler.apply\_file(self.map\_file)
5. handler.build\_graph()
6. self.handlers[route\_type] = handler
7. return self.handlers[route\_type]

**Кеширование маршрутов:** сохранение часто запрашиваемых маршрутов, быстрый возврат результатов для повторных запросов, ограничение размера кэша для оптимального использования памяти.

## Клиентская часть

### Интерфейс пользователя

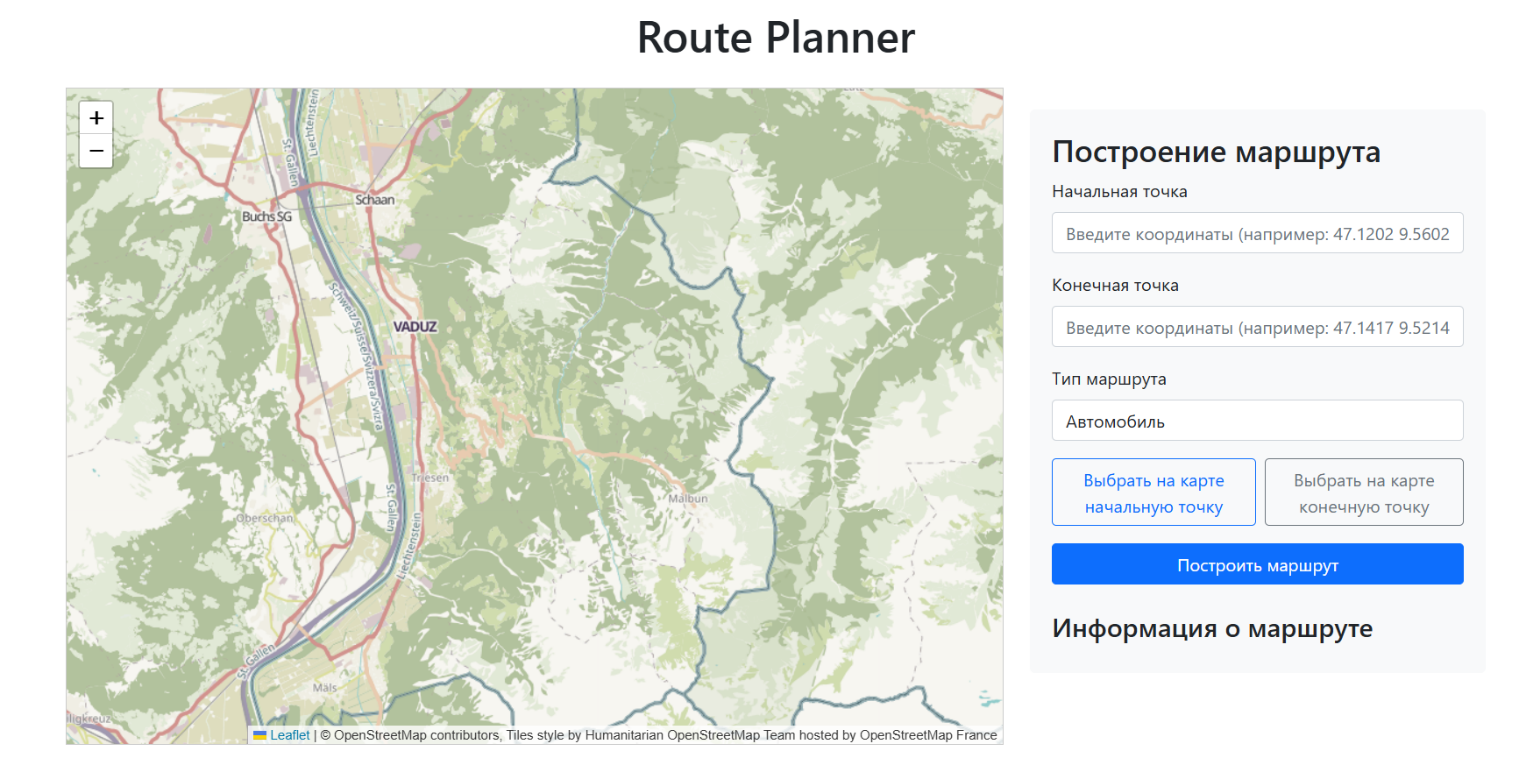
Пользовательский интерфейс приложения разработан с учетом современных принципов UI/UX дизайна и включает следующие основные элементы:

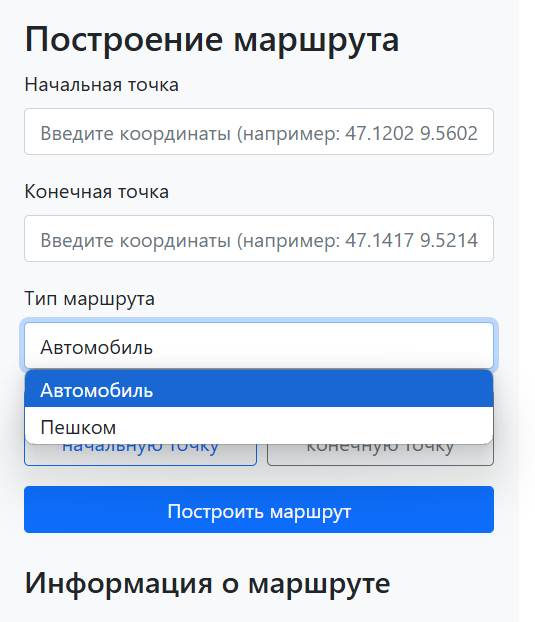
1. Основная структура:

* Интерактивная карта, занимающая основную часть экрана
* Панель управления с элементами ввода данных
* Информационная панель для отображения результатов

1. Панель управления:

* Поля ввода координат начальной и конечной точек
* Выбор типа маршрута (автомобильный/пешеходный)
* Кнопки для интерактивного выбора точек на карте
* Кнопка построения маршрута

Рисунок 2.1 Интерфейс веб-приложения

Рисунок 2.2 Меню веб-приложения

### Визуализация маршрутов

Реализована комплексная система визуализации маршрутов на карте, которая включает в себя:

1. Отображение маршрута:

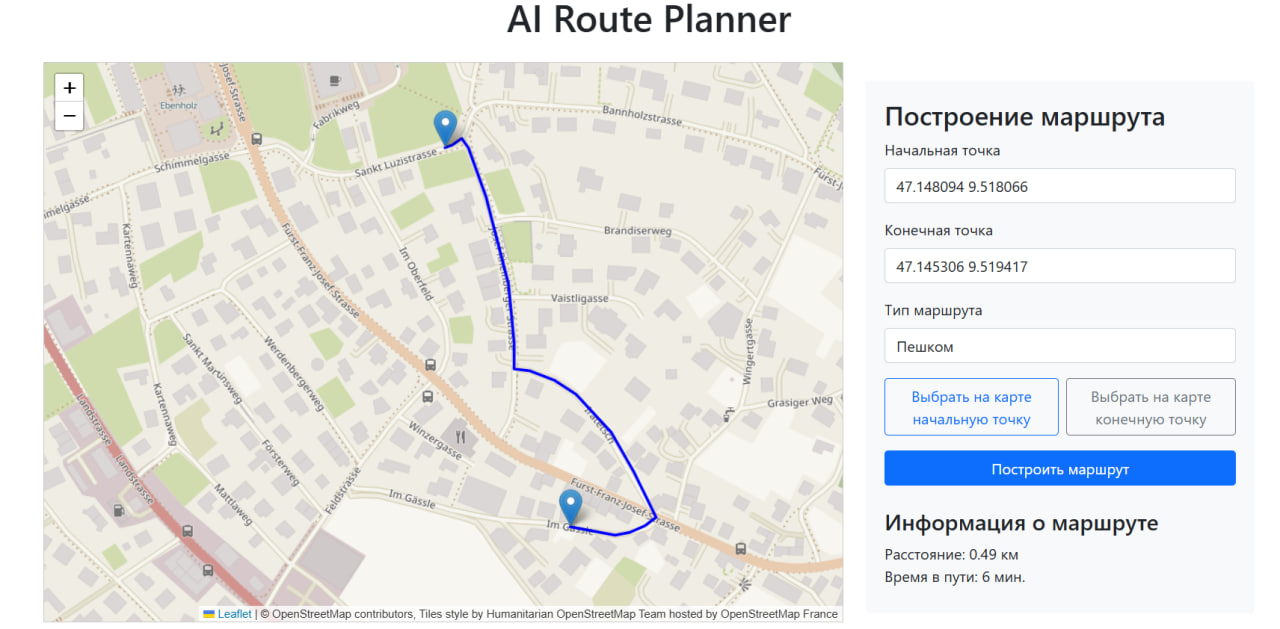
* Построение линии маршрута с использованием Leaflet.js
* Маркеры начальной и конечной точек
* Автоматическое масштабирование карты для отображения всего маршрута

1. Информационное сопровождение:

* Отображение общей длины маршрута в километрах
* Расчётное время в пути
* Визуальная индикация типа маршрута

Рассмотрим сравнительные скриншоты построения маршрута разработанного приложения и Яндекс Карт:

**Построение пешего маршрута**

Рисунок 2.3 Пример построения пешего маршрута (текущий проект)

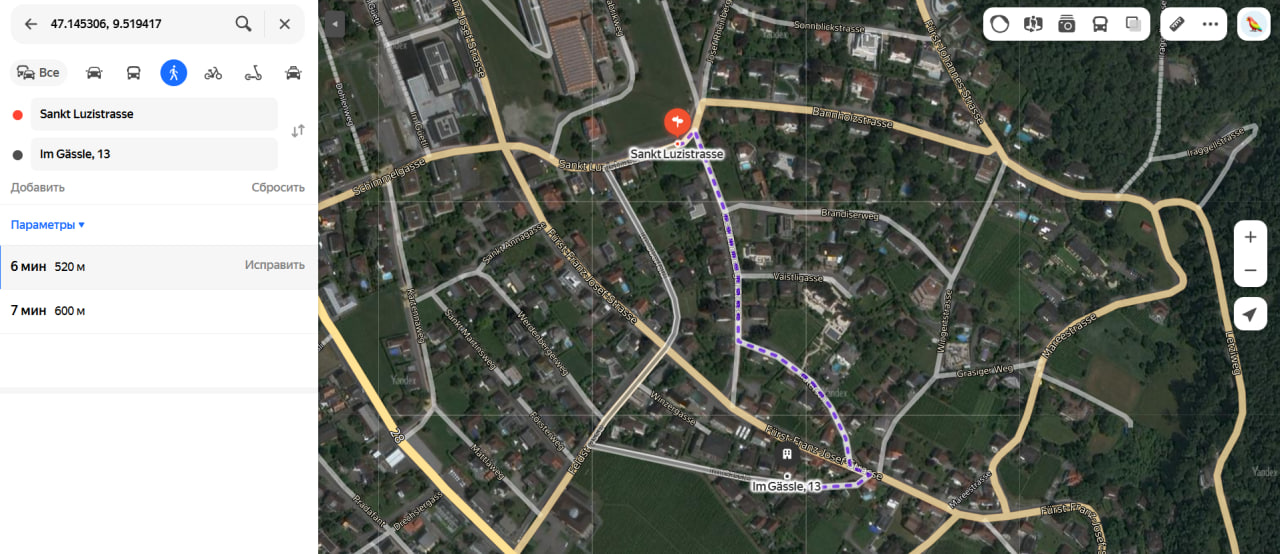
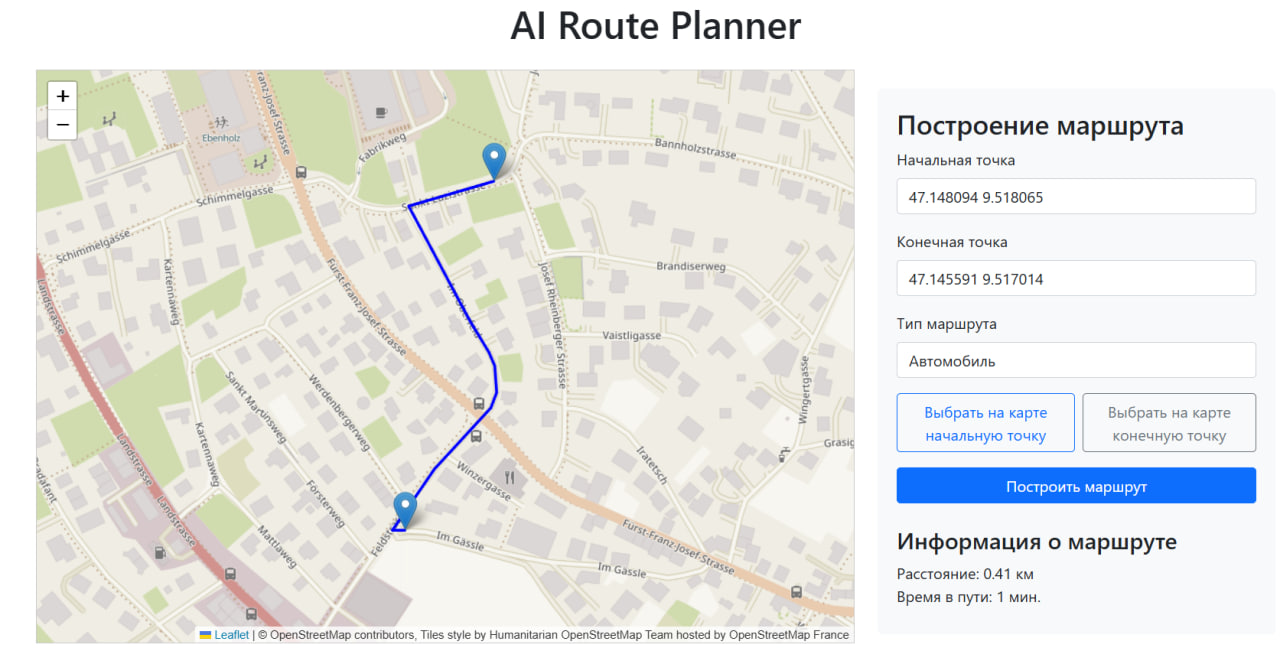


Рисунок 2.4 Пример построения пешего маршрута (Яндекс Карты)

**Построение дорожного маршрута**



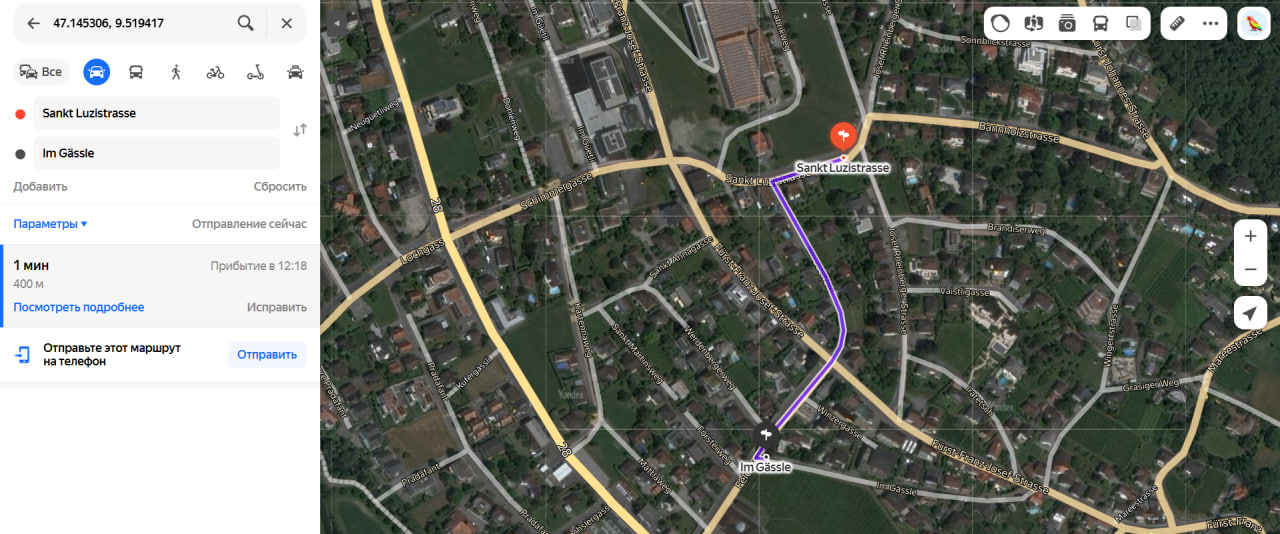
Рисунок 2.5 Пример построения дорожного маршрута (текущий проект)

Рисунок 2.6 Пример построения дорожного маршрута (Яндекс Карты)

### Интерактивные элементы управления

В приложении реализован богатый набор интерактивных функций:

1. Выбор точек маршрута:

* Возможность ручного ввода координат
* Интерактивный выбор точек кликом на карте
* Визуальная обратная связь при выборе точек

1. Управление картой:

* Масштабирование карты
* Перемещение по карте
* Автоматическое центрирование при построении маршрута

### Особенности реализации

1. Технологический стек: использование Leaflet.js для работы с картой, Bootstrap для создания адаптивного интерфейса, чистый JavaScript для обработки пользовательских действий.
2. Оптимизация производительности: эффективная обработка событий, оптимизированная перерисовка маршрутов.
3. Пользовательский опыт: интуитивно понятный интерфейс, достаточно быстрая обратная связь, плавные анимации при обновлении данных.

## Тестирование и оценка эффективности

**Методология тестирования**

В процессе разработки и оценки приложения было проведено комплексное тестирование различных аспектов системы, которые можно отобразить в следующих видах тестирования (функциональное и нагрузочное):

1. Функциональное тестирование:

* Проверка корректности построения маршрутов
* Тестирование различных типов маршрутов (автомобильный, пешеходный)
* Валидация обработки граничных случаев

1. Нагрузочное тестирование:

* Оценка времени отклика при различных нагрузках
* Тестирование производительности кэширования
* Анализ потребления ресурсов сервера

**Сравнение производительности алгоритмов**

Особое внимание было уделено сравнению эффективности классического и модифицированного алгоритмов Дейкстры:

1. Временные характеристики:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Тип алгоритма | Короткий маршрут | Средний маршрут | Длинный маршрут |
| Классический | ~ 100 мс | ~250 мс | ~ 500 мс |
| Оптимизированный | ~ 30 мс | ~ 80 мс | ~ 150 мс |

1. Использование памяти:

* Классический алгоритм: O(V²) памяти
* Оптимизированный алгоритм: O(V + E) памяти
* Практическая экономия памяти: 30-40%

### Анализ результатов

**Точность** **построения** **маршрутов**

1. Качество маршрутизации:

* Корректное определение ближайших узлов
* Оптимальный выбор промежуточных точек
* Соблюдение ограничений движения

**Производительность системы**

1. Время отклика:

* Среднее время построения маршрута: 100-150 мс
* Время загрузки интерфейса: < 1 секунды
* Время обновления карты: < 90 мс

1. Эффективность кэширования:

* Процент попаданий в кэш: ~60-65%
* Уменьшение времени отклика при повторных запросах: до 90%
* Оптимальное использование памяти

### Направление дальнейшего развития

На основе проведенного тестирования были определены следующие направления для улучшения системы. Данные оптимизации могут быть рассмотрены при повторном обращении к данному проекту, а именно:

1. Оптимизация алгоритмов: имеется потенциал на внедрение эвристических методов (A\* является одним из популярных эвристических методов, базирующихся на алгоритме Дейкстры), улучшение алгоритма поиска ближайших узлов, оптимизация структур данных.
2. Улучшение пользовательского опыта: добавление предварительного просмотра маршрута, реализация альтернативных маршрутов, улучшение информативности интерфейса (это потребует дополнительных вычислительных мощностей).
3. Расширение функциональности: добавление новых типов маршрутов интеграция с внешними сервисами, улучшение точности расчёта времени маршрута.

### Выявленные преимущества и ограничения

**Преимущества:**

1. Высокая скорость построения маршрутов
2. Эффективное использование памяти
3. Надёжность работы системы
4. Точность построения маршрутов

**Ограничения:**

1. Зависимость от качества картографических данных
2. Необходимость оптимизации для больших территорий
3. Ограничения при масштабировании системы

заключение

Глава 1. Теоретические основы построения навигационных систем

1. В результате анализа предметной области установлено, что современные навигационные системы требуют точных алгоритмов построения маршрутов с учетом различных типов дорог и транспортных средств, что было учтено при разработке приложения.

2. Проведенное исследование алгоритмов маршрутизации показало, что модифицированный алгоритм Дейкстры с использованием приоритетной очереди значительно эффективнее классического варианта, особенно при работе с большими графами дорожной сети.

3. Выбранный технологический стек (Python, Flask, OpenStreetMap) обеспечивает оптимальное сочетание производительности и простоты разработки, позволяя создать масштабируемое веб-приложение для построения маршрутов.

Глава 2. Практическая реализация навигационной системы

4. Разработанная архитектура приложения обеспечивает эффективное взаимодействие между компонентами системы, позволяя легко масштабировать и модифицировать функционал без существенных изменений в существующем коде.

5. Реализованный алгоритмический модуль успешно решает задачу построения оптимальных маршрутов с учетом различных типов дорог и ограничений скорости, что подтверждается результатами тестирования на реальных данных карт Лихтенштейна.

6. Серверная часть приложения, реализованная на Flask, обеспечивает надежную обработку запросов и эффективную работу с данными OpenStreetMap, что позволяет системе стабильно функционировать даже при увеличении нагрузки.

7. Разработанный пользовательский интерфейс предоставляет интуитивно понятный способ взаимодействия с системой, позволяя пользователям легко выбирать точки маршрута и получать детальную информацию о пути.

Направления дальнейшего развития проекта:

8. Перспективными направлениями развития системы являются:

- Интеграция методов машинного обучения для прогнозирования загруженности дорог

- Добавление поддержки мультимодальных маршрутов (комбинация различных видов транспорта)

- Реализация системы учета дорожных событий и ограничений в реальном времени

- Оптимизация алгоритмов для работы с более крупными географическими регионами

9. Разработанное приложение создает основу для дальнейшего развития и может быть использовано как базовая платформа для создания более сложных навигационных систем с расширенным функционалом.

Список использованной литературы

1. OpenStreetMap Wiki [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://wiki.openstreetmap.org/>. – Дата доступа: 10.03.2025
2. GeoPy Documentation [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://geopy.readthedocs.io/en/stable/>. – Дата доступа: 10.03.2025
3. Урташев А. От обхода в ширину к алгоритму Дейкстры/ А. Урташев // Хабр [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/259295/>. – Дата доступа: 17.03.2025
4. Flask Documentation [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://flask.palletsprojects.com/en/stable/>. – Дата доступа: 12.03.2025
5. Марк Лутц. Изучаем Python. 4-е издание. – Санкт-Петербург: Питер, 2011. – 1280 c.
6. Код программы

Github: <https://github.com/kirillgen/FlaskRouteVisualizer/>