

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение  
высшего образования  
«Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

*На правах рукописи*

Ехлаков Роман Сергеевич

# МЕТОД МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ МОДЕЛЕЙ СЕТЕВЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ СХОДСТВА С ИДЕАЛЬНЫМ РЕШЕНИЕМ

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

Судаков Владимир Анатольевич,  
доктор технических наук, доцент

Москва – 2025

Диссертация представлена к публичному рассмотрению и защите в порядке, установленном ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» в соответствии с предоставленным правом самостоятельно присуждать ученые степени кандидата наук, ученые степени доктора наук, согласно положениям пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике».

Публичное рассмотрение и защита диссертации состоятся 9 сентября 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Финансового университета Д 505.001.126 по адресу: Москва, Ленинградский проспект, д. 51, корп. 1, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в диссертационном зале Библиотечно-информационного комплекса ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» по адресу: 125167, Москва, Ленинградский проспект, д. 49/2, комн. 100 и на официальном сайте Финансового университета в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: [www.fa.ru](http://www.fa.ru).

Персональный состав диссертационного совета:

председатель – Шевцов В.А., д.техн.н., профессор;  
заместитель председателя – Рябов П.Е., д.физ-мат.н., доцент;  
ученый секретарь – Щетинин Е.Ю., д.физ-мат.н., доцент;

члены диссертационного совета:

Кочкаров А.А., д.техн.н., доцент;  
Тимошенко А.В., д.техн.н., профессор;  
Фархадов М.П., д.техн.н., с.н.с.

Автореферат диссертации разослан 16 июня 2025 г.

## **I Общая характеристика работы**

**Актуальность темы исследования.** Современные системы поддержки принятия решений в транспортных сетях – это информационные средства, функционирующие на принципах теории графов, машинного обучения и многокритериальной оценки, предназначенные для решения задач прогнозирования загруженности, обеспечения безопасности и выбора рациональных маршрутов. Проектирование алгоритмов маршрутизации строится как ряд итеративных процедур формирования промежуточных гипотетических вариантов моделей сетевых структур и требует оценки большого количества критериев эффективности. По причине длительности сроков создания прогнозных моделей при их проектировании необходимо учитывать: характеристики транспортных потоков с учетом погодных условий, возможность появления новой элементной базы и новых конструкторских разработок и технологий, которые позволяют повысить точность прогнозирования. Однако использование новых конструктивно-технических решений в процессе проектирования моделей транспортных сетей может привести к повышению рисков несвоевременного создания или невыполнения требований к точности и скорости обработки данных. В частности, при проектировании алгоритмов поиска маршрутов оценка выполнимости всех требований к безопасности и загруженности может стать неразрешимой задачей, так как для выполнения каждой характеристики требуется определенный ресурс вычислительных мощностей и данных, поэтому уже на первых стадиях жизненного цикла разработки программного комплекса становится важным решение вопроса повышения эффективности проектирования моделей и выбора совокупности наиболее важных критериев, выполнение которых с наименьшими рисками обеспечит требуемое качество поддержки принятия решений.

Указанные обстоятельства отражают наличие практического противоречия в необходимости учитывать – время на перемещение, загруженность транспортной сети и безопасность маршрута. Существующие модели ориентированы на использование только загруженности, таким образом повышая риски несвоевременного создания маршрутов и выбора нерационального варианта. Это определяет важное практическое значение исследований, направленных на повышение эффективности поддержки принятия решений, и обосновывает актуальность исследования.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемам управления процессами проектирования и создания сложных технических систем, таких как транспортные сети, основанных на поэтапном контроле характеристик отдельных компонент и комплексной оценке эффективности процесса на протяжении всего жизненного цикла, посвящены работы М. Кастельса, М.А. Айзермана,

А.В. Олескина, Б. Кернера, В.Л. Арлазарова, Н.Е. Емельянова, В.В. Подиновского, В.Д. Ногина, А.В. Лотова, И.И. Поспеловой, А.А. Морозова, Е.О. Черноусовой, В.А. Судакова и других авторов.

Вопросы математического моделирования транспортных сетей исследовали М. Лайтхилл, Дж. Уизем, П. Ричардс, А. Решель, Л. Пайп, А.В. Гасников, С.Л. Кленов, Е.А. Нурминский, Я.А. Холодов, Н.Б. Шамрай, В.И. Швецов, А.А. Петров, Ю.В. Шокин, А.Ю. Замятин, С.Е. Семенов, В.В. Буслаев, М.Ю. Шокин, М.В. Яшина, А.Г. Таташев и другие.

Критерии, как показатели качества и эффективности альтернатив (решений), исследовали такие ученые, как О.И. Ларичев, Э.А. Трахтенгерц и другие.

Проблемы влияния поведенческого фактора в сетевых структурах (водитель в потоке) исследовали А. Рейн, Р.В. Шкрабак, Н.У. Гюлев, В.Н. Басков, Д.О. Кожин, Д.Е. Алекминский, В.В. Евграшин, Ю.Н. Баранов, А.В. Олескин, М.М. Чучкевич, Н.Н. Марфенин и другие.

Существующие модели и методы управления транспортных сетей основаны на принципах всестороннего анализа и синтеза проектных решений. В работах классических алгоритмов маршрутизации в качестве универсального показателя эффективности маршрутов рассматривается время поиска кратчайшего пути. Оценка рисков позволяет прогнозировать вероятность нахождения оптимального маршрута и минимизировать вычислительную сложность. Однако определение оптимального варианта состава критериев оценки рассматривается только с точки зрения готовности составных частей к применению в процессе разработки алгоритмов, не учитывая достигаемые показатели безопасности и загруженности, что не позволяет однозначно судить о выполнении требований к комплексной оценке маршрутов. Отмеченный недостаток проявляется в том, что в случае неверной оценки технического облика модели возможно увеличение сроков создания эффективного программного комплекса.

**Объектом исследования** является транспортная сетевая структура, для которой разрабатываются математические модели и численные методы сбора, расчета, анализа и прогнозирования значений критериев.

В работе рассматриваются объективные и экспертные критерии. Объективные могут быть рассчитаны на основе статистических данных, а экспертные – на основе мнения экспертов в области транспортного планирования.

**Предметом исследования** является процесс принятия решений с использованием многокритериальной оценки результатов моделирования на основе моделей для поиска рационального маршрута и когнитивных моделей расчета критериев оценки маршрута.

В работах многокритериального анализа отмечается, что при проектировании транспортных систем следует максимально возможно сокращать количество характеристик, влияющих на принятие решений о правильности проектирования. Результаты исследований, представленных в этих работах, показывают, что такие показатели качества проектирования как относительная близость к идеальному решению характеризуют поисковые возможности моделей и позволяют оценить выполнение основных требований заказчиков, что открывает возможности для совершенствования методов проектирования сетевых структур за счет включения предпочтений лица, принимающего решения (далее – ЛПР).

Однако непосредственное использование методов и средств, представленных в вышеуказанных работах, применительно к решению задачи обоснования конструктивно-технических решений маршрутизации затруднительно из-за необходимости учета разнородных факторов. Противоречие между тем, что традиционные методы маршрутизации осуществляют минимизацию времени на перемещение, а ЛПР требуется осуществлять улучшение и иных факторов (погодные условия, безопасность, загруженность), позволяет сформулировать научную гипотезу, которая заключается в разработке ансамбля моделей, включающего когнитивные методы и нейронные сети для повышения эффективности многокритериальной оценки сетевых структур.

**Цель работы** – повышение эффективности маршрутизации транспортных средств за счет повышения точности прогнозирования и комплексного учета факторов: нагрузки на сетевую структуру, погодных факторов, факторов безопасности движения, рассчитанных по результатам моделирования и объединенных в единый комплексный показатель эффективности маршрута.

На основании вышеизложенного и в соответствии с поставленной целью, решаемая научная задача заключается в разработке метода многокритериальной оценки моделей сетевых структур на основе сходства с идеальным решением. Декомпозиция поставленной научной задачи приводит к необходимости проанализировать современные подходы, методы моделирования и прогнозирования в сетевых структурах на примере транспортной сети и подготовить решения следующих частных задач:

- 1) разработать метод многокритериальной оценки сетевых структур на основе комплекса моделей, включающий: а) многокритериальную оценку комплексной эффективности маршрута; б) модель загруженности сетевой структуры с учетом погодных условий; в) оценку безопасности маршрута, рассчитанную по разнородным показателям; г) когнитивную модель расчета показателей оценки маршрута на основе фреймово-факторного графа экспертных оценок;

2) разработать численный метод поиска альтернативных маршрутов для увеличения скорости нахождения рационального маршрута;

3) разработать комплекс программ для оценки и выбора маршрута, использующий большие данные от навигационных приемников.

**Область исследования** диссертации соответствует п. 2. «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», п. 8. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента», п. 9. «Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий» Паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

– разработан метод многокритериальной оценки сетевых структур на основе комплекса моделей дорожного движения, включающий: а) модель многокритериальной оценки комплексной эффективности маршрута, которая отличается от известных тем, что: учитывает предпочтения ЛПР, при этом предпочтения обеспечивают расчет комплексного показателя эффективности маршрута, что позволяет построить удовлетворяющий ЛПР маршрут; для расчета эффективности маршрутизации используется комплексный показатель, который показывает, насколько найденный методикой маршрут близок к идеальному маршруту (маршруту, у которого по всем критериям оценки маршрута указаны наилучшие значения). Близость к идеальному маршруту вычисляется с помощью евклидовой метрики в пространстве критериев оценки качества маршрута. В качестве критериев оценки качества маршрута используются следующие критерии: расстояние; время в пути; стоимость проезда; загруженность маршрута; погодные условия; безопасность; скоростные характеристики; геометрия маршрута; качество дорожного покрытия; б) модель загруженности сетевой структуры с учетом погодных условий, отличающаяся от известных тем, что за счет выбора архитектуры и гиперпараметров искусственных нейронных сетей – Long-Short Term Memory и Weighted Self-Attention (далее – LSTM + WSA), включая выбор количества слоев, размера пакета, размера скрытого слоя, количества эпох обучения, скорости обучения, удалось повысить точность прогнозирования загруженности маршрута на 5-7% в сравнении с классической LSTM; в) модель безопасности маршрута, отличающаяся от известных тем, что: показатель безопасности определяется по разнородным показателям, которые агрегируются с использованием методов теории принятия решений. Для их расчета используются открытые данные о состоянии дорожного покрытия, средствах

регулирования движения (светофоры, пешеходные переходы), средствах фиксации нарушений (видеокамеры автоматической фиксации нарушений, радары), дорожно-транспортных происшествиях; используются экспертные оценки в форме парных сравнений приоритетов показателей безопасности, что отличается от подхода экспертного сравнения конкретных альтернативных маршрутов такое отличие позволяет произвести настройку модели один раз и использовать ее для оценки безопасности произвольного числа маршрутов; г) когнитивная модель расчета показателей оценки маршрута на основе многокритериальной оценки моделей сетевых структур для увеличения вероятности нахождения оптимального маршрута, отличающаяся от известных моделей тем, что: использована фреймово-факторная модель экспертных оценок; данная модель позволяет приближенно оценить сетевую структуру в случае недостаточности эмпирических данных для машинного обучения нейросетевых моделей;

– разработан численный метод поиска альтернативных маршрутов, отличающийся от известных методов  $A^*$  тем, что: а) применена буферизация данных о структуре улично-дорожной сети для двух множеств вершин: первого множества вершин, просматриваемых на текущей итерации при движении от начальной вершины к конечной, второго множества вершин, просматриваемых на текущей итерации при движении от конечной вершины к начальной, таким образом минимизировано количество обращений к графу на диске; б) введен усовершенствованный критерий остановки алгоритма для данного численного метода: алгоритм продолжает перебирать вершины из множеств после первого их пересечения, что повышает вероятность нахождения оптимального маршрута. В результате численный метод обеспечил увеличение скорости маршрутизации на 30% по сравнению с базовым методом  $A^*$ ;

– разработан комплекс программ для оценки и выбора маршрута, использующий большие данные от навигационных приемников отличающийся от наиболее распространенных навигаторов компаний Яндекс, 2GIS, Google Maps тем, что: а) маршрутизация происходит с учетом предпочтений лица принимающего решения по показателям загруженности и безопасности маршрута; б) опрос, проведенный по результатам тестирования, показал, что более 70% респондентов признали результаты работы комплекса программ приемлемыми, что на 10% выше уровня удовлетворенности другими техническими решениями, представленными на рынке коммерческих программных продуктов.

Полученные результаты увеличили: точность прогнозирования загруженности маршрута на 5-7%; скорость маршрутизации на 30%; рост удовлетворенности ЛПР на 10%, а также обеспечили достижение цели диссертационного исследования по повышению эффективности маршрутизации транспортных средств.

**Теоретическая значимость работы** состоит в том, что, в отличие от результатов, полученных другими исследователями, разработанные модели позволяют учесть актуальные разнородные критерии, влияющие на результат ранжирования. Разработан метод многокритериальной оценки сетевых структур на основе сходства с идеальным решением. Создана когнитивная фреймово-факторная модель определения значений критериев в случае недостаточного объема статистических данных. Разработанные модели могут служить базой для постановки более широких, в том числе теоретико-игровых, задач анализа взаимодействия элементов сетевых структур.

**Практическая значимость работы** заключается в широкой применимости сформулированных положений ансамбля моделей сетевых структур в качестве инструмента помощи при принятии решений. На основе разработанной модели возможно моделировать кризисные ситуации, оценить рациональность маршрута при различных значениях и весах критериев в модели для многокритериальной оценки сетевых структур.

**Методологию и методы исследования** составили результаты научных работ российских и зарубежных авторов, посвященные моделированию сетевых структур транспортной сети; многокритериальному анализу альтернатив; исследованиям математических моделей, описывающих влияние сложных факторов на сеть и ее участников; влиянию поведенческого фактора. В работе применялись методы научной абстракции, математического моделирования, машинного и глубокого обучения, теория множеств, теория графов, теория принятия решений, объектно-ориентированное и функциональное программирование.

Информационную базу составили анонимные GPS-треки пользователей различных устройств, аналитические отчеты и статистические данные о чрезвычайных ситуациях на дорогах, научные исследования российских и зарубежных ученых, а также материалы конференций, опубликованные в периодической печати и в сети Интернет.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1) метод многокритериальной оценки сетевых структур на основе следующего комплекса моделей: а) модель многокритериальной оценки комплексной эффективности маршрута (С. 54-60); б) модель загруженности сетевой структуры с учетом погодных условий повысившую точность прогнозирования на 5-7% (С. 60-76); в) модель безопасности маршрута (С. 76-85); г) когнитивная модель расчета показателей оценки маршрута на основе многокритериальной оценки моделей сетевых структур и фреймово-факторного графа экспертных оценок (С. 85-89);



2) численный метод поиска альтернативных маршрутов, ускоряющий поиск маршрута на 30% (С. 111-119);

3) комплекс программ для оценки и выбора маршрута, использующий большие данные от навигационных приемников и одобренный более 70% респондентов после тестирования (С. 121-126).

**Степень достоверности, апробация и внедрение результатов исследования.** Достоверность положений исследования подтверждается проведенными вычислительными экспериментами с использованием разработанного комплекса программ.

Основные положения и результаты научного исследования докладывались и получили одобрение на следующих научных мероприятиях: на 19-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, Московский авиационный институт, 23-27 ноября 2020 г.); на X Международной научно-практической конференции «Абалкинские чтения» (Москва, РЭУ имени Г.В. Плеханова, 26-27 апреля 2021 г.); на XII Всероссийской научно-практической конференции «Высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации» (г. Пенза, МЦНС «Наука и Просвещение», 7 сентября 2021 г.); на IV Всероссийской научно-практической конференции «Цифровая трансформация управления: проблемы и решения» (Москва, Государственный университет управления, 12 мая 2022 г.); на XII Международной научно-практической конференции «Абалкинские чтения» (Москва, РЭУ имени Г.В. Плеханова, 26-27 апреля 2023 г.); на 15th International KES Conference On Intelligent Decision Technologies (г. Рим, Италия, Springer Singapore, 14-16 июня 2023 г.).

Программа для ЭВМ «Программа поддержки принятия финансовых решений на основе сетевых структур», подготовленная по результатам исследования, внесена в Реестр программ для ЭВМ Роспатента (свидетельство о регистрации Роспатента № 2024615278 от 05.03.2024; автор и правообладатель: Ехлаков Р.С.).

Материалы исследования используются в практической деятельности геоинформационного сервиса «VK Карты» ООО «VK»: внедрены разработанные модели оценки и прогнозирования загруженности транспортной сети, позволяющие существенно улучшить качество ответов веб-сервисов. Реализованы отдельные модули поиска маршрута при помощи алгоритма двустороннего A\*. Выводы и основные положения диссертации реализованы в виде модулей веб-приложения для решения логистических задач с использованием актуальной информации о пробках.

Материалы исследования используются Кафедрой анализа данных и машинного обучения Факультета информационных технологий и анализа больших

данных ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» в преподавании учебной дисциплины «Практикум по программированию». Результаты диссертации используются при проведении научно-исследовательских семинаров и выполнении самостоятельной работы.

Апробация и внедрение результатов исследования подтверждены соответствующими документами.

**Публикации.** Основные результаты и положения диссертации изложены в 9 научных работах общим объемом 7,52 п.л. (авторский объем – 6,35 п.л.), в том числе 3 работы общим объемом 2,23 п.л. (авторский объем – 2,05 п.л.) опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России, а также 4 работы общим объемом 3,04 п.л. (авторский объем – 2,5 п.л.) опубликованы в изданиях, включенных в международную цитатно-аналитическую базу «Scopus». Получено одно свидетельство на программу для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации** определяется поставленной целью и задачами исследования. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка литературы, состоящего из 214 наименований и 11 приложений. Текст диссертации изложен на 237 страницах, содержит 29 таблиц, 46 рисунков и 65 формул.

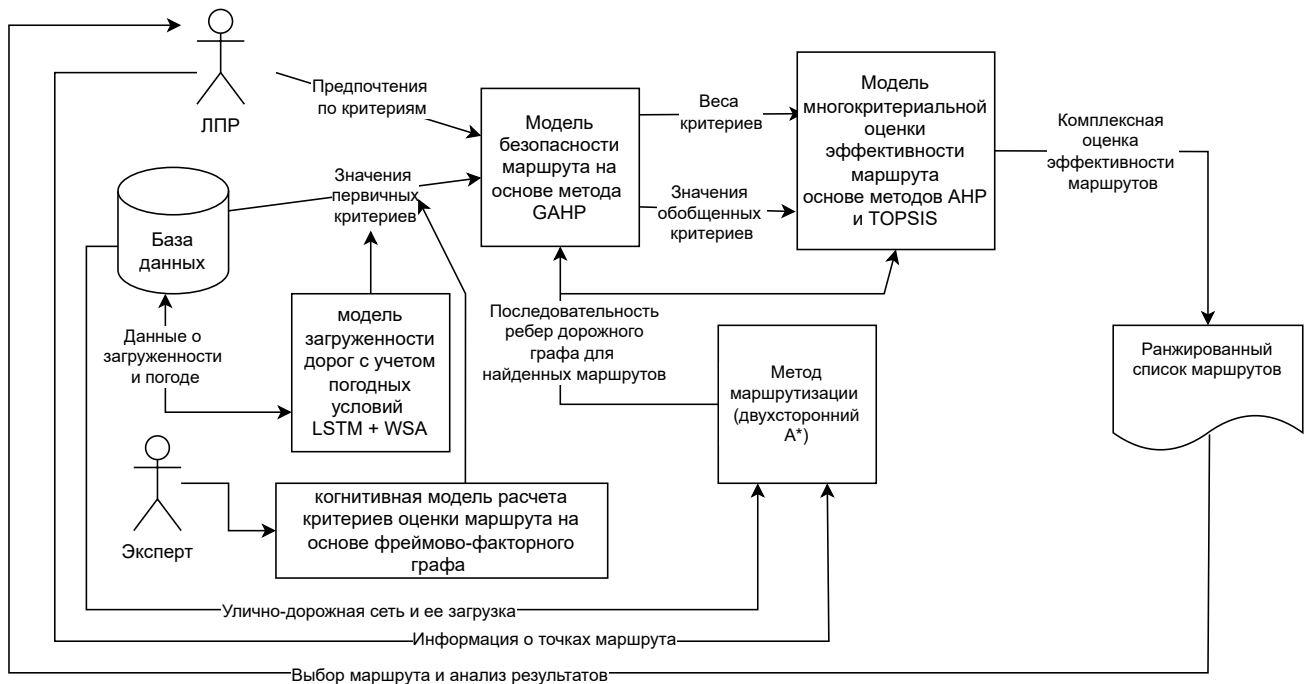
## **II Основное содержание работы**

Во Введении диссертации раскрывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна, сформулирована теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе диссертации рассмотрены современные методы моделирования сетевых структур, методы поддержки принятия решений на основе векторного критерия. По результатам анализа российских и зарубежных исследований и мнений экспертов отрасли транспортного планирования выделены критерии, влияющие на транспортную сеть. Исследованы математические модели поведения, загруженности, оценки и прогнозирования в транспортной сети. Проанализировано влияние погодных условий на загруженность маршрута. Изучены работы по прогнозированию загруженности с учетом негативных погодных условий. Проведено сравнение алгоритмов поиска альтернативных маршрутов в графе. Выявлены недостатки существующих моделей и предложены улучшения.

Во второй главе диссертации для реализации заданных требований разработаны взаимосвязанные модели, представленные на рисунке 1

(прямоугольники – это модели, а стрелки показывают, какие данные между элементами схемы передаются).



Источник: составлено автором.

Рисунок 1 – Структурно-логическая схема информационного взаимодействия комплекса моделей и методов маршрутизации транспортных средств

В сложных системах, при принятии решений об изменении транспортной инфраструктуры необходимо комплексно оценить, как изменяться возможные маршруты в транспортной сети. Другое назначение комплексной оценки маршрутов – это решение задач оптимизационных задач логистики – составление планов грузоперевозок, в процессе которого необходимо учитывать факт конфликта значений критериев (показателей) при выборе маршрута (например, более безопасный маршрут может быть более долгим), что обуславливает необходимость поиска компромиссов между критериями.

Будем полагать, что выбранный маршрут должен иметь наименьшее расстояние от наилучшего (идеального) решения (маршрута) и наиболее удаленное от наихудшего решения. Тогда математически модель можно выразить в виде формул, применяемых в следующей последовательности.

Расчет нормализованной матрицы решений ( $N$ ), где нормализованное значение  $N_{ij}$  рассчитывается по формуле (1)

$$N_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n X_{ij}^2}}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $X_{ij}$  значения показателей;  
 $i$  – номер показателя;

$j$  – номер маршрута.

Расчет взвешенной нормализованной матрицы решений ( $V$ ), где взвешенное нормализованное значение  $V_{ij}$  описывается формулой (2)

$$V_{ij} = W_i N_{ij}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $W_i$  – нормированный вес  $i$ -го показателя рассчитываемый с использованием метода парных сравнений.

Определение положительного идеального и отрицательного идеального решения описывается формулой (3). Положительное идеальное решение ( $A^+$ ) для максимизируемых показателей включает наивысшие значения показателя, а для минимизируемых показателей включает наименьшие значения показателя. Кроме того, идеальное отрицательное решение ( $A^-$ ) для максимизируемого и минимизируемого показателей включает наименьшее и наибольшее значения показателя соответственно в формуле (3)

$$\begin{aligned} A^+ &= \{V_1^+, \dots, V_n^+\}, \text{ где } V_j^+ = \begin{cases} \max_i V_{ij}, & \text{если } j \in K, \\ \min_i V_{ij}, & \text{если } j \in K', \end{cases} \\ A^- &= \{V_1^-, \dots, V_n^-\}, \text{ где } V_j^- = \begin{cases} \min_i V_{ij}, & \text{если } j \in K, \\ \max_i V_{ij}, & \text{если } j \in K', \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, m\};$

$j \in \{1, 2, \dots, n\};$

$K$  соответствуют показателям с направлением улучшения на максимум;

$K'$  соответствуют показателям с направлением улучшения на минимум.

Расстояние каждой альтернативы от положительного идеального и отрицательного идеального решения ( $d$ ) описывается формулой (4)

$$\begin{aligned} d_j^+ &= \left\{ \sum_{i=1}^m (V_{ij} - V_i^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, j = \overline{1, n}, \\ d_j^- &= \left\{ \sum_{i=1}^m (V_{ij} - V_i^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, j = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (4)$$

Относительная близость альтернативы  $A_j$  по отношению к  $A^+$  ( $R$ ) определяется по формуле (5)

$$R_j = \frac{d_j^-}{(d_j^+ + d_j^-)}, j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где  $d_j^+ \geq 0$ ;  
 $d_j^- \geq 0$ ;  
 $R_j \in [0, 1]$ .

Ранжирование порядка маршрутов производится на основе значений  $R_j$ . Каждая альтернатива с большим  $R_j$  лучше, чем другие маршруты. Приведенные выше операции в отличие от традиционных подходов к маршрутизации транспорта (основанных на минимизации по одному критерию времени проезда с переводом других критериев в ограничения), позволяют искать компромиссные решения по нескольким критериям одновременно. Кроме того, разработанная модель многокритериальной оценки эффективности маршрута на основе сходства с идеальным решением отличается от известных решений тем, что:

- использует гибкое ранжирование показателей: при котором ЛПР, может изменять приоритеты показателей в зависимости от конкретной ситуации. В отличие от существующих моделей, фиксированных в своих приоритетах, данная модель позволяет адаптировать вес каждого показателя под текущие потребности пользователя, обеспечивая повышение эффективности маршрутизации транспортных средств за счет комплексного учета факторов: нагрузки на сетевую структуру, погодных факторов, факторов безопасности движения;
- с использованием парных сравнений значений критериев, модель интегрирует в единую комплексную оценку как количественные, так и качественные показатели, в том числе такие как геометрия маршрута и качество дорожного покрытия, что позволяет комплексно учесть показатели выбора маршрута по сравнению с моделями, учитывающими только количественные показатели (например, расстояния и времени в пути) и расширяет возможности использования модели в сложных условиях транспортного планирования;
- адаптирована для работы с множеством источников данных, включая как открытые, так и коммерческие данные, что обеспечивает полное и актуальное представление о дорожной обстановке. Большинство существующих моделей ограничены лишь одним или двумя источниками данных, что снижает их точность в условиях изменяющихся транспортных потоков и погодных условий.

Проведенный анализ показал, что ключевыми критериями при выборе маршрута являются критерии основанные на оценке его загруженности. Значения

этих критериев динамичны, то есть подвержены существенным изменениям в процессе маршрутизации транспорта, поэтому важно обеспечить удовлетворительную точность их прогнозирования.

Для расчета оценки загруженности маршрута используется параметр контрольного времени, в течение которого маршрут можно проехать по свободной дороге без нарушений правил. Длина известна заранее на основе данных OpenStreetMap (далее – OSM), а средняя скорость рассчитывается в режиме реального времени после подсчета всех точек на дуге. Среднюю скорость движения на дороге можно рассчитать по формуле (6)

$$x_{ab} = \frac{1}{M_r} \sum_{i=1}^{M_r} \left( \frac{1}{Tra_i - 1} \sum_{j=1}^{Tra_i-1} \frac{distance(o_{i,j}, o_{i,j+1})}{interval(o_{i,j}, o_{i,j+1})} \right), \quad (6)$$

где  $x_{ab}$  – средняя скорость движения по дороге  $a$  за время  $b$ ;  
 $M_r$  – количество траекторий дороги  $a$ ;  
 $Tra_i$  – количество точек GPS на траектории  $i$ , проходящей через дорогу  $a$ ;  
 $o_{i,j}$  – GPS точка траектории  $i$ , проходящая через дорогу  $a$ ;  
 $distance(o_{i,j}, o_{i,j+1})$  – дуговое расстояние совпадающих точек  $o_{i,j}, o_{i,j+1}$ ;  
 $interval(o_{i,j}, o_{i,j+1})$  – интервал времени выборки между  $o_{i,j}$  и  $o_{i,j+1}$ .

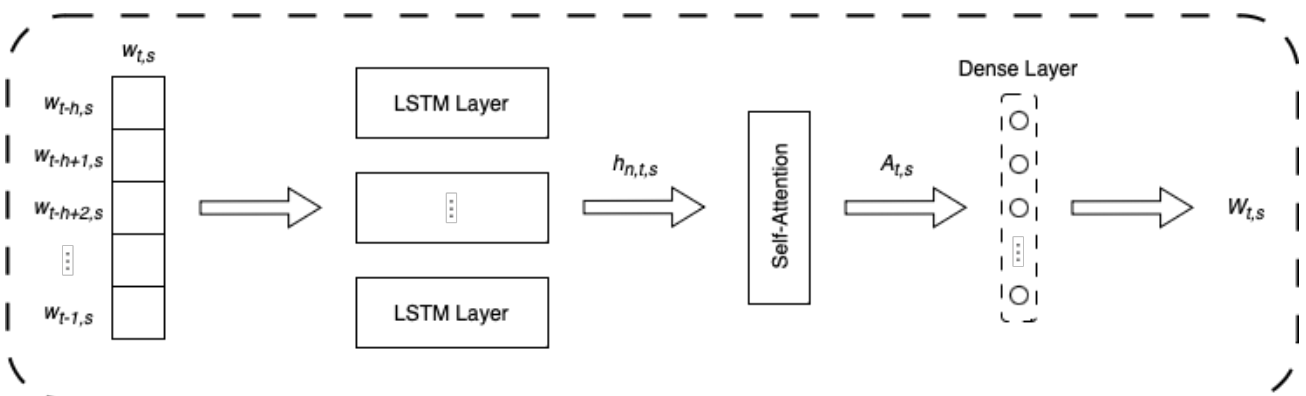
После обработки данных значения средних скоростей для дорог сохраняется в базе данных (далее – БД) каждые 5 мин. Если данные о скорости отсутствуют, то значение принимается максимально разрешенной скорости без нарушения ограничений правил дорожного движения (далее – ПДД). После расчета скорости и времени прохождения трека модель вычисляет насколько реальное время отличается от эталонного. Загруженность сети представляет шкалу от 0 до 10, где 0 баллов означает свободное движение, а 10 баллов – движение остановилось. Расчет загруженности для плановой скорости (далее –  $speed_p$ ) и фактической скорости (далее –  $speed_f$ ) выполняется по формуле (7)

$$\Delta = \frac{speed_p - speed_f}{speed_p} \times 100\%. \quad (7)$$

Задача прогнозирования загруженности транспортной сети заключается в прогнозировании средней скорости (методами временных рядов) на выбранном участке дороги и классификации по формуле (7). Входными данными являются исторические данные о средней скорости движения на участке дороги, рассчитанными по формуле (6). Результат – прогнозируемая средняя скорость на

дороге. Скорость движения в дорожных сетях имеет временные характеристики и такие модели как, рекуррентная нейронная сеть (далее – RNN), долгая краткосрочная память (далее – LSTM) и управляемый рекуррентный блок (далее – GRU), можно применять при прогнозировании транспортных потоков. В рамках экспериментов выбраны разные длины входных единиц временного окна для прогнозирования средней скорости. По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы. Модель RNN и производные способны изучать временные характеристики на основе входных данных и показывают высокую эффективность при прогнозировании краткосрочных последовательностей, в то время как модели LSTM и GRU более эффективны при прогнозировании долгосрочных рядов. В результате выбрана модель LSTM из-за способности к обучению долговременных зависимостей.

Проанализировано влияние погодных условий на такие характеристики транспортного потока, как средняя скорость (км/ч) и объем – количество автомобилей в час и плотность – количество автомобилей на 1 км. Использовались исторические данные о средней скорости, количестве автомобилей, погодных условиях и состоянии поверхности на маршруте. Для учета влияния погодных условий на загруженность транспортной сети разработана модель на основе глубокого обучения с механизмом взвешенного внимания (далее – WSA), учитывающая такие погодные факторы, как дождь, туман и снег. LSTM + WSA представляет собой рекуррентную нейронную сеть для пространственно-временного прогнозирования с механизмом внутреннего внимания, позволяющую учесть погодные условия и увеличить точность. Модель объединяет данные прогнозирования загруженности с блоком погодных условий. Архитектура погодного блока представлена на рисунке 2, в нем анализируется взаимосвязь между данными о погодных условиях и транспортных потоках. Веса блоков трафика и погоды определяются автоматически во время обучения модели. Если данные о погоде оказывают существенное влияние на прогноз транспортного потока в течение одного периода, то вес погодного блока увеличивается.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2 – Структурно-логическая схема модели прогнозирования загруженности с учетом погодных условий

Пространственно-временные характеристики погодных данных загружаются и анализируются при помощи слоя LSTM и описываются по формуле (8)

$$\begin{aligned}
 i_{n,t,s} &= \sigma_{n,s}^i (W_{n,s}^i \otimes [\bar{h}_{n,t-1,s}, \bar{w}_{n,t,s}] + b_{n,s}^i), \\
 f_{n,t,s} &= \sigma_{n,s}^f (W_{n,s}^f \otimes [\bar{h}_{n,t-1,s}, \bar{w}_{n,t,s}] + b_{n,s}^f), \\
 o_{n,t,s} &= \sigma_{n,s}^o (W_{n,s}^o \otimes [\bar{h}_{n,t-1,s}, \bar{w}_{n,t,s}] + b_{n,s}^o), \\
 c_{n,t,s} &= f_{n,t,s} \odot c_{n,t-1,s} + i_{n,t,s} \odot \tanh(W_{n,s}^c \otimes [\bar{h}_{n,t-1,s}, \bar{w}_{n,t,s}] + b_{n,s}^c), \\
 \bar{h}_{n,t,s} &= o_{n,t,s} \odot \tanh(c_{n,t,s}),
 \end{aligned} \tag{8}$$

где  $i_{n,t,s}$ ,  $f_{n,t,s}$  и  $o_{n,t,s}$  – выходные данные входного, забывания и выходного вентилей  $n$ -го слоя для времени  $t$  и секции  $s$ ;  
 $n \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ ;  
 $N$  – количество слоев;  
 $\bar{w}_{n,t,s}$  – входной вектор  $n$ -го слоя для времени  $t$  и секции  $s$ ;  
 $c_{n,t,s}$  и  $c_{n,t-1,s}$  – состояния ячеек  $n$ -го слоя для интервала времени  $[t-1, t]$  и секции  $s$ ;  
 $\bar{h}_{n,t,s}$  и  $\bar{h}_{n,t-1,s}$  – состояние ячеек памяти для  $n$ -го слоя интервала времени  $[t-1, t]$  и секции  $s$ ;  
 $\sigma_{n,s}^i$ ,  $W_{n,s}^i$  и  $b_{n,s}^i$  – вес и вектор смещения для элемента  $i_{n,t,s}$ ;  
 $\sigma_{n,s}^f$ ,  $W_{n,s}^f$  и  $b_{n,s}^f$  – вес и вектор смещения для элемента  $f_{n,t,s}$ ;  
 $\sigma_{n,s}^o$ ,  $W_{n,s}^o$  и  $b_{n,s}^o$  – вес и вектор смещения для элемента  $o_{n,t,s}$ ;  
 $W_{n,s}^c$  и  $b_{n,s}^c$  – вес и вектор смещения для элемента  $c_{n,t,s}$ .

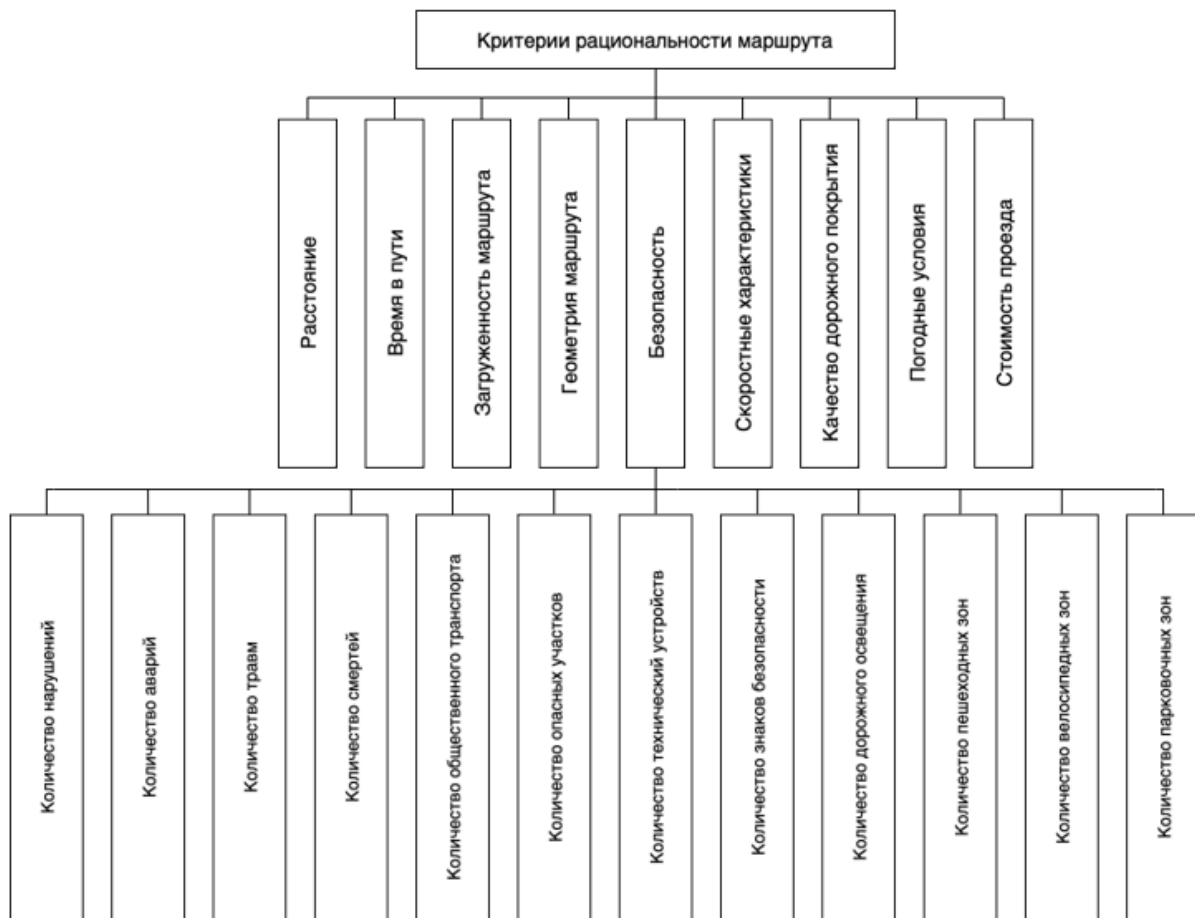
Результаты экспериментов показали, что погодные условия влияют на среднюю скорость транспортного потока (до 16%) и точность прогнозируемых значений (5-7%). Предложенная модель глубокого обучения на основе LSTM + WSA, включающая блок погодных условий и механизм внутреннего внимания, демонстрирует наилучшую точность прогнозирования при неблагоприятных погодных условиях.

В модели безопасности маршрута и когнитивного поиска рационального маршрута определены критерии и разработан численный метод расчета. На основе анализа научных исследований и мнений экспертов области транспортного моделирования, существует как минимум 9 критериев, изображенных на рисунке 3, оказывающих влияние при поиске и выборе маршрута.



Для расчетов используются как открытые данные о ДТП, нарушениях, наличии дорожных знаков и ограничениях проезда, так и коммерческие данные о количестве участников дорожного движения, их местоположении и погодных условиях из следующих источников информации:

- 1) OSM;
- 2) статистика ГИБДД и данные о технических устройствах;
- 3) карта ДТП;
- 4) данные о текущих и прогнозируемых погодных условиях;
- 5) онлайн-мониторинг дозы радиоактивного загрязнения;
- 6) пользовательские данные.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3 – Критерии, влияющие на выбор рационального маршрута

Модель расчета безопасности включает постоянную оценку безопасности маршрутов на основе актуальных данных о дорожно-транспортных происшествиях (далее – ДТП) и технических устройствах. По мнению экспертов в области безопасности дорожного движения существует как минимум 12 подкритериев, влияющих на критерий безопасности. Расчет проводится с помощью метода группового анализа иерархий (далее – ГАНР), для которого эксперты в области безопасности транспортного движения заранее заполнили матрицы попарного сравнения по шкале вербальных суждений. Основным инструментом будет

матрица парных сравнений критериев. Для представления приоритетов выбран собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному значению. Поскольку индекс несогласованности меньше 0,1, то проведенные сравнения являются приемлемыми, а веса обладают необходимой достоверностью.

Для расчета альтернатив разработана когнитивная модель, формализующая абстракции процесса, воспроизводящего ключевые моменты с целью экстраполяции сведений о процессе. Степень влияния одного фактора когнитивной модели на другой может быть представлена различными способами. Одним из таких способов является использование коэффициента влияния, который назначается каждой дуге и отражает степень воздействия одного фактора на другой. В работе используется статический метод оценки коэффициентов влияния, основанный на мнениях экспертов в области дорожного движения. Когнитивная модель формализуется в матричный вид по формуле (9)

$$X = AX + F, \quad (9)$$

где  $X$  – вектор значений факторов размерности  $n$ ;  
 $A$  – матрица коэффициентов влияния между соответствующими факторами;  
 $F$  – вектор значений, характеризующий внешнее влияние.

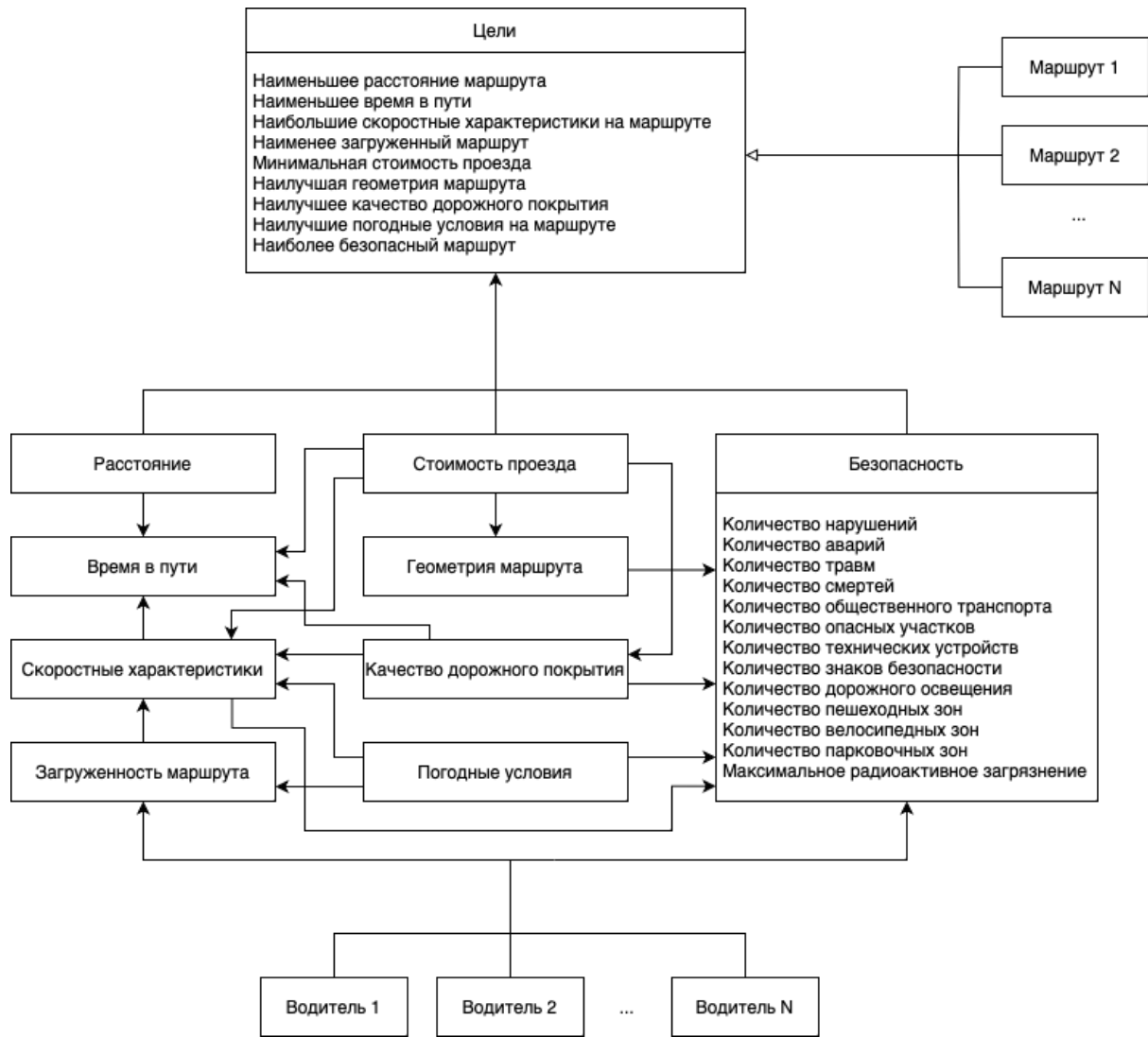
Значения факторов можно вычислить с помощью итерационной процедуры по формуле (10)

$$X^{k+1} = AX^k + F, \quad (10)$$

где  $k$  – номер итерации.

Скорость сходимости процедуры определяется собственными значениями матрицы  $A$ . В работе предлагается моделирование факторов на основе концепции фреймов. Фреймовая структура помогает уменьшить сложность системы, не углубляясь в детали внутренней структуры фрейма. Это позволяет исследовать влияние слотов одного фрейма на другой. На рисунке 4 представлена фреймово-факторная модель поиска рационального маршрута транспортной сети. Прямоугольниками обозначены фреймы. Влияния фреймов друг на друга показаны стрелками. Подобная схема позволяет упростить вариации структуры модели, например, при появлении новых критериев маршрута. Разработанная модель может быть успешно использована для решения следующих задач:

- определение факторов эффективности анализируемой системы;
- прогнозирование систем с прямыми и обратными связями;
- оценка решений на основе анализа используемых критериев;
- поиск альтернатив в условиях неполной информации.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4 – Когнитивная модель оценки маршрута

В третьей главе диссертации рассмотрены подходы к анализу данных о дорожном движении, включая использование глобальной навигационной спутниковой системы (далее – ГНСС) данных и данных мобильных устройств. Применение таких данных позволяет снизить затраты на оборудование стационарных датчиков, одновременно охватывая широкие участки дорожной сети. Использование мобильных данных предоставляет новые возможности для оценки транспортных потоков, благодаря их пространственно-временной детализации и низкой стоимости получения.

Дорожный граф рассматривается как основа анализа транспортной сети, где перекрёстки представлены вершинами, а участки дорог – дугами. Привязка треков к графу осложнена погрешностями ГНСС, что требует применения продвинутых алгоритмов. Алгоритм Витерби адаптирован для задачи привязки данных к дорожному графу, учитывая такие параметры, как расстояние до дуги, совпадение направлений движения и вероятность манёвров. Расстояние Фреше применялось

для оценки географической близости трека к графу. Методика сопоставления ГНСС-данных показала высокую эффективность в идентификации последовательности ребер графа, соответствующих маршруту.

Разработана методика для оценки загруженности дорожной сети, включающая: расчёт фактической средней скорости по данным ГНСС; сравнение фактической скорости с расчётной, основанной на данных OSM; применение шкалы загруженности от 0 до 10 баллов для интерпретации состояния дорог. Данный подход обеспечивает возможность оперативного анализа дорожной сети и принятия решений о маршрутизации и управлении движением.

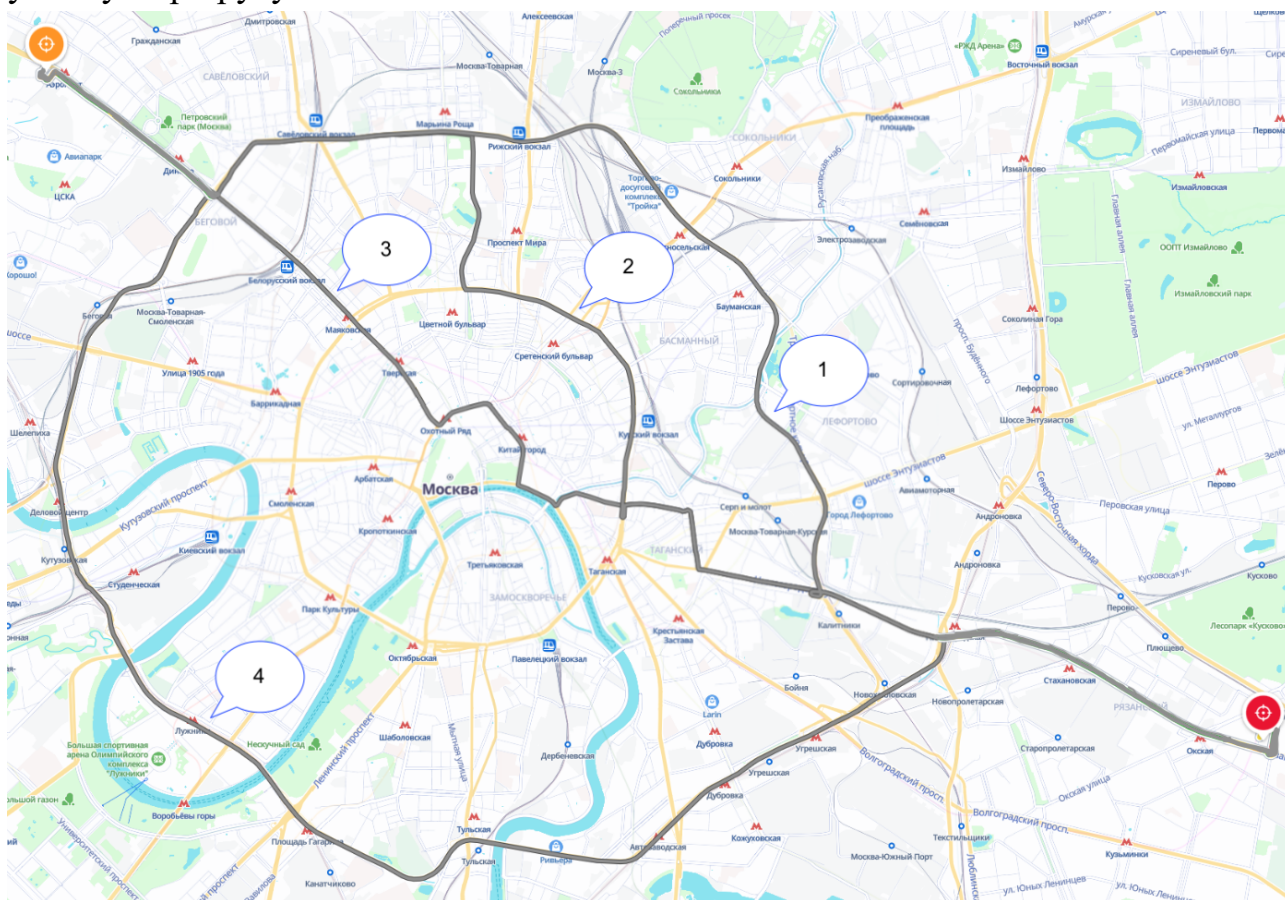
Разработана методика поиска альтернативных маршрутов на основе  $A^*$ . Предложена модификация классического алгоритма  $A^*$ , ориентированная на современные многоядерные устройства. Двухсторонний  $A^*$  пополняет два множества  $M_1$  и  $M_2$ , значительно сокращая количество рассматриваемых вершин. В среднем, двухсторонний  $A^*$  рассматривает в 2-3 раза меньше вершин, чем односторонний  $A^*$ , что особенно эффективно для длинных маршрутов. Реализация алгоритма учитывает ограничения мобильных устройств:

- 1) ограниченный объем оперативной памяти и необходимость загрузки частей графа с диска;
- 2) разделение данных для кэширования множеств  $M_1$  и  $M_2$ ;
- 3) оптимизация позволяет минимизировать нагрузку на процессор и память устройства.

Разработанная модификация двухстороннего  $A^*$  подходит для навигации на мобильных устройствах, где требуется быстрое и точное построение маршрутов. Методика показала высокую производительность и возможность гибкой настройки в зависимости от требований к скорости и ресурсам. Таким образом разработанный численный метод обеспечивает точное и актуальное моделирование состояния транспортной сети, позволяя решать задачи управления дорожным движением, прогнозирования пробок и оптимизации маршрутов.

В четвертой главе диссертации приведено описание комплекса программ и результаты вычислительных экспериментов с созданными моделями и численным методом. Разработанный комплекс программ состоит из нескольких модулей для расчета каждой альтернативы по описанным выше моделям. Модуль поиска альтернатив содержит в себе расчет нескольких маршрутов, по которым можно добраться из начальной точки в конечную с использованием дорог общего пользования – автомагистралей и главные дороги имеют больший вес по сравнению со второстепенными. При поиске альтернатив (маршрутов) используется алгоритм двухстороннего  $A^*$ , на вход которого подаются координаты начальной и конечной точек и данные графа дорог из OSM, на выход – маршруты. Маршруты между двумя точками, изображенные на рисунке 5, проложены с оптимизацией по

расстоянию. Оптимизация маршрута производится на основе данных ассессоров по пустому маршруту.



Источник: составлено автором.

Рисунок 5 – Найденные маршруты между начальной и конечной точками

Результатом работы модели многокритериального анализа являются ранги альтернатив, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Результат расчета ранга альтернатив

| Номер маршрута | $d_j^+$ | $d_j^-$ | $R_j$ | Вес  | Относительный вес, в процентах |
|----------------|---------|---------|-------|------|--------------------------------|
| 1              | 0,037   | 0,160   | 0,813 | 81,3 | 28,67                          |
| 2              | 0,103   | 0,084   | 0,451 | 45,1 | 15,90                          |
| 3              | 0,060   | 0,171   | 0,740 | 74,0 | 26,09                          |
| 4              | 0,032   | 0,158   | 0,832 | 83,2 | 29,34                          |

Источник: составлено автором.

Чем больше значение  $R_j$ , тем альтернатива считается лучше, относительно остальных. По результатам расчетов можно утверждать, что маршрут 4 является лучшим при заданном весе критериев с учетом мнения лица ЛПР. Окончательное решение по выбору маршрута остается при этом за ЛПР.

Полученные результаты сравнивались с современными сервисами поиска и прокладывания оптимальных маршрутов – Яндекс.Карты, 2ГИС и Google Maps. Сравнительный анализ показал, что при минимальном учете набора критериев (расстояние, время в пути и загруженность маршрута) разработанный сервис не уступает аналогам в результатах поиска и расчета маршрутов, прогнозируемой загруженности и времени движения по маршруту, а при учете всех критериев – расширяет возможности и результаты существующих сервисов. Сравнение происходило по найденным маршрутам (альтернативам) и их характеристикам, рекомендованному маршруту и оценке загруженности транспортной сети. В таблице 2 представлены результаты сравнительного анализа.

Результаты сервисов отличаются друг от друга и сравнить их напрямую невозможно из-за различий анализируемых данных и отсутствия в открытом доступе применяемых алгоритмов, но возможно провести сравнение по косвенным признакам. Сервисы рекомендуют наиболее быстрый маршрут, который не всегда является кратчайшим. Разработанная когнитивная модель также рекомендует наиболее быстрый маршрут, что говорит о сходстве алгоритма поиска альтернатив с остальными сервисами. Модель поиска рационального маршрута ранжирует альтернативы на основе субъективного мнения ЛПР и рекомендует более безопасный маршрут, но с большим расстоянием и временем в пути.

Таблица 2 – Сравнительный анализ сервисов

| Параметр                            | Сервис            |                 |                   |                                      |                                                  |
|-------------------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                                     | Яндекс.Карты      | 2ГИС            | Google Maps       | VK Карты                             | VK Карты                                         |
| Модель поиска альтернатив           | Нет данных        | Нет данных      | Нет данных        | Модель поиска рационального маршрута | Когнитивная модель поиска рационального маршрута |
| Количество найденных маршрутов      | 6                 | 3               | 3                 | 4                                    |                                                  |
| Минимальное расстояние, км          | 11,3              | 13              | 12,7              | 12,7                                 |                                                  |
| Минимальное время в пути, мин       | 22                | 24              | 22                | 28                                   |                                                  |
| Предложенный маршрут                | 12,4 км<br>22 мин | 13 км<br>24 мин | 12,7 км<br>22 мин | 15,9 км<br>30 мин                    | 12,7 км<br>28 мин                                |
| Загруженность маршрута, в процентах | 14                | 11              | 17                | 18                                   | 23                                               |

Источник: составлено автором.

По результатам проведенного закрытого тестирования комплекса программ более 70% респондентов положительно оценили его возможности.

### III Заключение

Итогом диссертационной работы является разработка и апробация комплекса программ поиска рациональных маршрутов в транспортной сети в режиме, приближенному к реальному времени, на основе предпочтений ЛПР.

Разработан метод многокритериальной оценки сетевых структур на основе следующего комплекса моделей:

- модель многокритериальной оценки эффективности маршрута;
- модель загруженности сетевой структуры;
- модель безопасности маршрута;
- когнитивная модель расчета показателей оценки маршрута на основе фреймово-факторного графа экспертных оценок.

Разработан численный метод поиска альтернативных маршрутов, ускоряющий поиск на 30% по сравнению с классическим алгоритмом A\*.

Разработан комплекс программ для оценки и выбора маршрута, использующий большие данные от навигационных приемников. По результатам тестирования более 70% респондентов удовлетворены построенным маршрутом.

### IV Список работ, опубликованных по теме диссертации

*Публикации в рецензируемых научных изданиях,  
определенных ВАК при Минобрнауки России:*

1. Ехлаков, Р.С. Модель оценки и прогнозирования загруженности транспортной сети в режиме, приближенном к реальному времени / Р.С. Ехлаков // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2024. – № 6. Том 26. – С. 126-134. – ISSN 1999-8554.

2. Ехлаков, Р.С. Модель влияния неблагоприятных погодных условий на загруженность транспортной сети / Р.С. Ехлаков, В.А. Судаков // Нелинейный мир. – 2024. – № 4. Том 22. – С. 122-128. – ISSN 2070-0970.

3. Ехлаков, Р.С. Современные методы моделирования транспортных потоков. Модель многокритериальной оценки рациональности маршрута / Р.С. Ехлаков // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 11. – С. 70-73. – ISSN 2079-5920.

*Публикации в международной  
цитатно-аналитической базе данных «Scopus»:*

4. Ехлаков, Р. Multicriteria Assessment Method for Network Structure Congestion Based on Traffic Data Using Advanced Computer Vision = Метод многокритериальной оценки перегруженности сетевой структуры на основе

данных о трафике с использованием расширенного компьютерного зрения / Р. Ехлаков, Н. Андриянов // Mathematics. – 2024. – № 4. Volume 12. – ISSN 2227-7390. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/math12040555. – URL: <https://www.mdpi.com/2675506> (дата обращения: 15.05.2024).

5. Ехлаков, Р. Modern Methods of Traffic Flow Modeling: A Graph Load Calculation Model Based on Real-Time Data = Современные методы моделирования транспортных потоков: графовая модель расчета нагрузки на основе данных реального времени / Р. Ехлаков // Intelligent Decision Technologies : proceedings of the 15th KES-IDT 2023 Conference. – Singapore : Springer, 2023. – P. 302-309. – 324 p. – ISBN 978-981-99-2968-9. – Текст : электронный. – DOI 10.1007/978-981-99-2969-6. – URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-2969-6\\_27](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-2969-6_27) (дата обращения: 09.12.2024).

6. Ехлаков, Р.С. Development and Application of Step-By-Step Addition Algorithm for Modelling the Surface of Radioactive Contamination of the Area = Разработка и применение алгоритма пошагового сложения для моделирования поверхности радиоактивного загрязнения территории / Р.С. Ехлаков, В.В. Татаринцов, А.С. Дутов // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Issue 1. Volume 2195. – ISSN 1551-7616. – Текст : электронный. – DOI 10.1063/1.5140138. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2195/1/020038/851841/Development-and-application-of-step-by-step> (дата обращения: 09.12.2024).

7. Ехлаков, Р.С. Investigation of the Application of Fractal Geometry Methods for the Construction of Radioactive Contamination Zones = Исследование применения методов фрактальной геометрии для построения зон радиоактивного загрязнения / Р.С. Ехлаков, В.В. Татаринцов, А.С. Дутов // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Issue 1. Volume 2195. – ISSN 1551-7616. – Текст : электронный. – DOI 10.1063/1.5140162. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2195/1/020062/852096/Investigation-of-the-application-of-fractal> (дата обращения: 09.12.2024).

*Публикации в других научных изданиях:*

8. Ехлаков, Р.С. Модель многокритериальной оценки маршрутов транспортной сети / Р.С. Ехлаков, А.О. Жуков, В.А. Судаков // Научные технологии. – 2024. – № 4. Том 25. – С. 28-39. – ISSN 1999-8465.

9. Ехлаков, Р.С. Многокритериальная оценка безопасности транспортной сети / Т.В. Сивакова, В.А. Судаков // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2024. – № 38. – ISSN 2071-2901. – Текст : электронный. – DOI 10.20948/prepr-2024-38. – ISSN 2071-2901. – URL: <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2024-38> (дата обращения: 09.12.2024).



*Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ:*

10. Ехлаков, Р.С. Программа поддержки принятия финансовых решений на основе сетевых структур / Р.С. Ехлаков // Программы для ЭВМ. Свидетельство о регистрации Роспатента № 2024615278 (05.03.2024).