

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ITMO University

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
GRADUATION THESIS

Разработка подхода к прогнозированию загруженности автомобильных дорог общего
пользования на основе сетевых свойств улично-дорожной сети
(тема ВКР / Thesis topic)

Обучающийся / Student Шеховцов Виктор Владимирович

Факультет/институт/кластер/ Faculty/Institute/Cluster Институт дизайна и урбанистики

Группа/Group С4202

Направление подготовки/ Subject area 27.04.07 Наукоемкие технологии и экономика

Инноваций

Образовательная программа / Educational program Цифровая урбанистика

Язык реализации ОП / Language of the educational program Русский, Английский

Квалификация/ Degree level Магистр

Руководитель ВКР/ Thesis supervisor (ФИО, должность) Митягин Сергей Александрович,
кандидат технических наук, Университет ИТМО, Институт дизайна и урбанистики,
директор

Санкт-Петербург
2025

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ITMO University**

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ /
OBJECTIVES FOR A GRADUATION THESIS**

Обучающийся / Student Шеховцов Виктор Владимирович

Факультет/институт/кластер/ Faculty/Institute/Cluster Институт дизайна и урбанистики
Группа/Group C4202

Направление подготовки/ Subject area 27.04.07 Наукоемкие технологии и экономика инноваций

Образовательная программа / Educational program Цифровая урбанистика / Digital Urban Studies 2023

Язык реализации ОП / Language of the educational program Русский, Английский

Квалификация/ Degree level Магистр

Тема ВКР/ Thesis topic Разработка подхода к прогнозированию загруженности автомобильных дорог общего пользования на основе сетевых свойств улично-дорожной сети

Руководитель ВКР/ Thesis supervisor Митягин Сергей Александрович, кандидат технических наук, Университет ИТМО, Институт дизайна и урбанистики, директор

Консультант/ Consultant Натыкин Максим Викторович, НЦКР, инженер, осн., ИДУ, ассистент (квалификационная категория "ассистент"), в/в совм.

Характеристика темы ВКР / Description of thesis subject (topic)

Тема в области фундаментальных исследований / Subject of fundamental research: нет / not

Тема в области прикладных исследований / Subject of applied research: да / yes

Основные вопросы, подлежащие разработке / Key issues to be analyzed

Цель работы: разработать метод прогнозирования загруженности автомобильных дорог общего пользования на основе сетевых свойств улично-дорожной сети.

Задачи работы:

- 1 Исследовать предметную область прогнозирования загруженности автомобильных дорог общего пользования;
- 2 Исследовать существующие методы и выявить их достоинства и недостатки;
- 3 Разработать метод прогнозирования загруженности автомобильных дорог общего пользования на основе сетевых свойств улично-дорожной сети;
- 4 Провести апробацию метода на данных графа улично-дорожной сети и выявить достоинства и недостатки метода;
- 5 Сформировать рекомендации по внедрению разработанного метода.

Исходные данные представляют из себя граф улично-дорожной сети города.

Содержание работы:

Введение;

1 Анализ предметной области прогнозирования загруженности автомобильных дорог общего пользования;

2 Разработка метода прогнозирования загруженности автомобильных дорог общего пользования на основе сетевых свойств улично-дорожной сети;

3 Экспериментальное исследование метода прогнозирования загруженности автомобильных дорог общего пользования на основе их сетевых свойств;

4 Рекомендации по внедрению метода прогнозирования загруженности автомобильных дорог общего пользования на основе сетевых свойств улично-дорожной сети;

Заключение;

Список использованных источников.

Форма представления материалов ВКР / Format(s) of thesis materials:

Магистерская диссертация, оформленная в соответствии с требованиями ИТМО.
Презентация.

Дата выдачи задания / Assignment issued on: 28.02.2025

Срок представления готовой ВКР / Deadline for final edition of the thesis 15.05.2025

СОГЛАСОВАНО / AGREED:

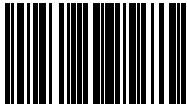
Руководитель ВКР/
Thesis supervisor

Документ подписан	
Митягин Сергей Александрович	
03.03.2025	

(эл. подпись)

Митягин
Сергей
Александрович

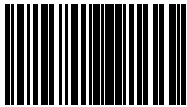
Задание принял к
исполнению/ Objectives
assumed BY

Документ подписан	
Шеховцов Виктор Владимирович	
03.03.2025	

(эл. подпись)

Шеховцов
Виктор
Владимирович

Руководитель ОП/ Head
of educational program

Документ подписан	
Митягин Сергей Александрович	
17.04.2025	

(эл. подпись)

Митягин
Сергей
Александрович

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	2
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1 Анализ предметной области	6
1.1 Причины необходимости прогнозирования загруженности дорог	6
1.2 Моделирование транспортных потоков	8
1.2.1 Существующие модели	8
1.2.2 Существующая проблема с данными	11
1.3 Топология сетевых моделей.....	13
1.3.1 Граф дорожной сети	13
1.3.2 Построение матрицы смежности	15
1.4 Различные модели сетевого трафика	18
2 Разработка метода	22
2.1 Методология моделирования загруженности дорог	22
2.2 Описание метода	25
2.2.1 Общее описание метода	25
2.2.2 Требование к входным данным	25
2.2.3 Пошаговое описание работы метода	26
2.2.4 Форма представления результата	29
3 Экспериментальное исследование.....	30
3.1 Описание экспериментальных сценариев	30
3.2 Реализация метода.....	35
3.3 Представление сценариев применения метода на сценарных и реальных данных работы метода.....	40
4 Рекомендации по внедрению метода.....	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	48
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Листинг	51

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о выпускной квалификационной работе применяют следующие сокращения и обозначения.

ВКР – выпускная квалификационная работа.

ГО – городской округ.

СП – свод правил.

ТЗ – техническое задание.

УДС – улично-дорожная сеть.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчете о ВКР применяют следующие термины с соответствующими определениями.

Улица – территория общего пользования, ограниченная красными линиями улично-дорожной сети населённого пункта [1].

Улично-дорожная сеть – система объектов капитального строительства, включая улицы и дороги различных категорий и входящие в их состав объекты дорожно-мостового строительства (путепроводы, мосты, туннели, эстакады и другие подобные сооружения), предназначенные для движения транспортных средств и пешеходов, проектируемые с учётом перспективного роста интенсивности движения транспорта и обеспечения возможности прокладки инженерных коммуникаций. Границы УДС закрепляются красными линиями. Территория, занимаемая УДС, относится к землям общего пользования транспортного назначения [1].

Дорога – обустроенная или приспособленная и используемая для движения транспортных средств полоса земли либо поверхность искусственного сооружения. Дорога включает в себя одну или несколько проезжих частей, а также трамвайные пути, тротуары, обочины и разделительные полосы при их наличии [2].

Уровень загрузки – отношение фактической интенсивности движения по автомобильной дороге, приведенной к легковому автомобилю, к пропускной способности за заданный промежуток времени [3].

Прогнозирование – это способ научного предвидения, в котором используется как накопленный в прошлом опыт, так и текущие допущения насчет будущего с целью его определения. Результатом является прогноз, т. е. научно обоснованное суждение о возможных состояниях объекта в будущем, об альтернативных путях и сроках его существования. Прогноз неоднозначен, носит многовариантный, вероятностный характер [4].

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире крайне важно прогнозирование загруженности дорог. Оно используется при построении маршрутов, при учёте экологии и планировании и организации инфраструктуры. Например, моделирование загруженности автомобильных дорог используется проектными организациями в процессах исследования текущей дорожной ситуации и проектирования новой инфраструктуры.

Существует более двухсот методов прогнозирования дорожного трафика. Некоторые методы опираются на заранее собранную статистическую информацию о реальной дорожной обстановке, другие моделируют теоретическое поведение дорожной сети в зависимости от её физических свойств. Проблема многих современных методов состоит в том, что они требуют наличия реальных данных с улиц и не подходят для быстрого исследования только что построенных или ещё проектируемых улиц.

Для качественного анализа требуется сбор большого количества данных, таких как замеры интенсивности движения и соцопросы активности пользователей территории моделирования. Сбор таких данных занимает продолжительное время и требует материальных и человеческих ресурсов. Помимо этого, зачастую требуется постобработка собранных данных, которая требует дополнительной затраты ресурсов.

Исходя из этого можно предположить, что прогнозировать загруженность дорог можно, основываясь только на сетевых свойствах улично-дорожной сети. Такой метод позволит избежать дополнительного сбора данных и сэкономить ресурсы.

В существующей мировой практике методы моделирования загруженности дорог делятся на микромоделирование и макромоделирование. Микромодели предназначены для исследования небольших территорий, в один или несколько перекрёстков. Такие модели позволяют моделировать каждого агента модели по отдельности, но они требуют больших вычислительных мощностей. Макромодели используются для моделирования больших территорий. Разрабатываемый метод можно отнести к макромоделям, так как предполагается применение на больших территориях, а параметр оценивания будет уровень загрузки, вычисляемый как отношение интенсивности движения к пропускной способности на каждом участке графа.

Для испытания метода создаются сценарии с экспериментальными данными по городскому округу город Выкса. Они включают различные конфигурации улично-дорожной сети: существующее положение, увеличение пропускной способности центральной улицы и строительство новой объездной дороги. Сравнение результатов работы метода будет с результатами макромоделей, основанной на MATSim.

Разрабатываемый метод может пригодиться для экспресс-анализа решений профильными и непрофильными организациями для скорого формирования выводов и планирования дальнейшей работы по решению.

Цель данной работы – разработать метод прогнозирования загруженности автомобильных дорог общего пользования на основе сетевых свойств улично-дорожной сети исследования.

Для достижения поставленной цели требуется выполнить следующие задачи:

- Исследовать предметную область прогнозирования загруженности автомобильных дорог общего пользования;
- Исследовать существующие методы и выявить их достоинства и недостатки;
- Разработать метод прогнозирования загруженности автомобильных дорог общего пользования на основе сетевых свойств улично-дорожной сети;
- Провести апробацию метода на данных графа улично-дорожной сети и выявить достоинства и недостатки метода;
- Сформировать рекомендации по внедрению разработанного метода.

Выполненное исследование и полученные результаты соответствуют направлению подготовки 27.04.07 Научно-технические технологии и экономика инноваций.

1 Анализ предметной области

1.1 Причины необходимости прогнозирования загруженности дорог

Транспорт является важной системой любого города, региона, страны. Без работы транспорта невозможна никакая хозяйственная деятельность, невозможен обмен ресурсами, материальными благами и продуктами производства. Наибольший вклад в грузо- и пассажирооборот страны вносит автомобильный транспорт.

Развитие экономики неразрывно связано с развитием её транспортной составляющей. Чем более развито производство и выше благосостояние граждан страны, тем большая нагрузка ложится на транспортную систему государства. Самый простой способ увеличения количества перевозимого груза и пассажиров – увеличение количества транспортных средств. Данные Федеральной службы государственной статистики о количестве автомобилей во владении россиян, представленные на рисунке 1, подтверждают, что количество автомобилей на дорогах страны ежегодно увеличивается [5].



Рисунок 1 – Наличие транспортных средств в РФ на конец года

Однако, простое увеличение количества транспорта на дорогах может привести ухудшению дорожного движения. Рано или поздно пропускная способность транспортной сети не выдерживает возрастающей нагрузки, и скорость передвижения транспортных средств резко падает. А скорость движения – это второй важнейший фактор, влияющий на эффективность работы транспортной системы.

Расчёт и прогнозирование загруженности дорог на сегодняшний день является первостепенной задачей как при эксплуатации существующей инфраструктуры, так и при планировании развития дорожной сети. Грамотное прогнозирование позволяет избежать

возникновения локальных заторов, лавинообразно распространяющихся на всю сеть и парализующих её работу, а также способствует достижению наибольшей эффективности работы транспорта за счёт организации и перераспределения транспортных потоков.

В современных городах до 75 % загрязнений вызывает автомобильный транспорт [6]. Корреляция скорости движения и уровня выбросов вредных веществ в окружающую среду заключается в увеличении количества выбросов при снижении скорости и частом торможении транспортных средств. При снижении скорости от 100 до 60 км/ч выброс окиси углерода увеличивается на 30 %, углеводородов – на 50 %, на холостом ходу выброс этих веществ соответственно возрастает в 2,5 и 2,3 раза [7]. Прогнозирование интенсивности движения транспортных средств также позволяет спрогнозировать уровень загрязнения, а соответственно и сдержать его.

Одной из самых распространённых областей применения прогнозирования загруженности дорог является маршрутизация. Такие системы используются как крупными компаниями, так и на бытовом уровне, при личном использовании навигаторов в автомобилях. Для построения оптимального маршрута в системах маршрутизации учитывается текущая загруженность и прогнозируемая. Построение оптимального маршрута позволяет существенно сэкономить такие ресурсы как время, топливо, расходы на обслуживание автотранспорта и оплату работы водителей. А так как на оптимальность маршрута влияет не только топология сетевой инфраструктуры, но и зачастую скорость проезда по нему, необходимость информации по текущей и прогнозируемой загруженности дорожных сегментов становится первостепенной.

Транспортная модель используется при анализе проектных решений, таких как развитие улично-дорожной сети, развитие общественного транспорта, развитие жилых кварталов и бизнеса. На результатах моделирования можно узнать о качестве и влиянии текущей ситуации, предлагаемых решений и развитии их в будущем. Для разработки такой модели компания-заказчик обращается в специализированную транспортную компанию. Часто, анализ может делиться на два этапа: экспресс-анализ и полноценный. Вначале проводится быстрый анализ для получения быстрых и дешёвых результатов. Он позволяет быстро оценить проектное решение и принять дальнейшие шаги по углублению анализа, чтобы предотвратить избыточное расходование материальных средств и ресурсов. Полноценная модель более долгая по разработке. Для неё требуется собрать более точные и разного типа данные. Часть из них требует проведения отдельных мероприятий, таких как замеры интенсивности дорожного движения, замеры пассажирских потоков в общественном транспорте, проведение социологического опроса. Всё это значительно

увеличивает расходы и время на разработку, но и качество получаемой модели в разы лучше. На такой модели можно лучше спрогнозировать эффекты от предлагаемых решений и соответственно и улучшить их. Но из-за дороговизны полноценной модели, она может не подойти всем по карману. Для этого и существует экспресс модель, на результатах которой можно увидеть, стоит ли разрабатывать полноценную модель. Диаграмма активностей процесса работы ты транспортными моделями представлена на рисунке 2.

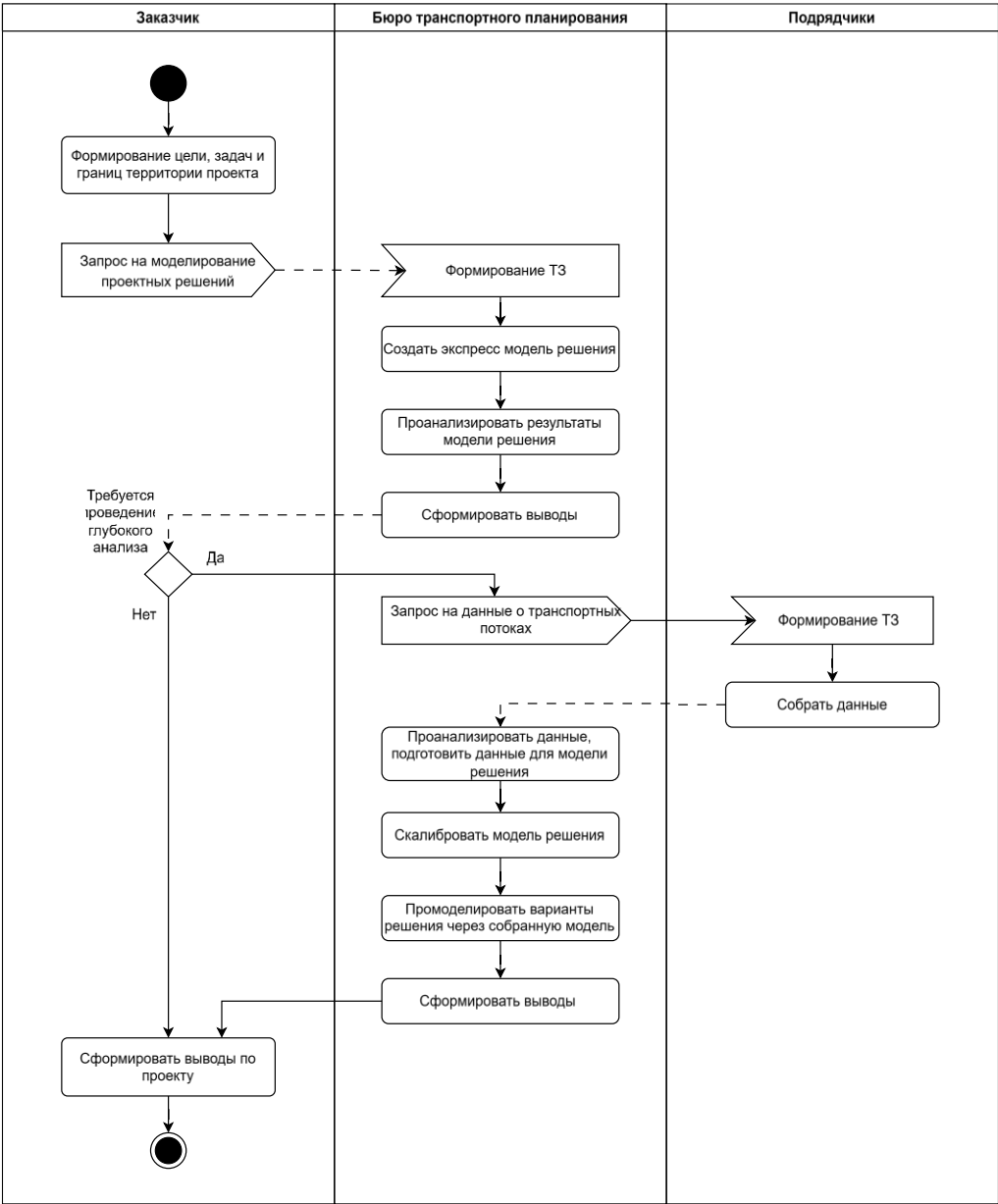


Рисунок 2 – Диаграмма активностей при работе с транспортными проектами

1.2 Моделирование транспортных потоков

1.2.1 Существующие модели

С точки зрения математики задача прогнозирования транспортного движения может быть поставлена как задача прогнозирования некоторой наблюдаемой величины, чаще всего скорости или интенсивности потока (которые взаимосвязаны друг с другом), в

каждом либо в определённых узлах транспортной сети. Горизонт прогнозирования (время, в течение которого рассчитанные значения рассматриваются как достоверные) чаще всего выбирается небольшим – не более 1 часа. Это связано с одной стороны с лавинообразным нарастанием степени неопределённости модели, а с другой – необходимостью знать загруженность дорог в рамках предполагаемого маршрута, характерное время прохождения которого в подавляющем количестве случаев составляет около 1 часа. Дорожная ситуация в области, находящейся в часе езды от текущего местоположения, в момент начала движения практически не влияет на выбор маршрута. По мере приближения к этой области часовой прогноз устаревает и выгоднее создать новый прогноз по уточнённым онлайн-данным.

Современные методы компьютерного моделирования уже давно используются для организации беспрепятственного и эффективного движения транспортных средств [8]. На данный момент этих методов существует более 200. Их можно разделить на две группы по принципу работы с информацией. Фактографические или формализованные модели базируются на фактически имеющейся информации об объекте исследования, а экспертные или интуитивные применяются когда невозможно формализовать изучаемые процессы или имеет место неопределённость развития хозяйственной системы [7].

Первые математические модели потока трафика появились в 1950-х годах (Richards, 1956; Lighthill, Whitham, 1955). Идея этих моделей – симуляция трафика с использованием метода кинематических волн. В то время такой подход (математическое построение модели в явном виде) был единственно доступным, учитывая ограниченные вычислительные возможности компьютерной техники.

Рост вычислительной мощности современных компьютеров позволил использовать количественную обработку данных трафика. Основываясь на наблюдениях предыдущего периода, можно предсказать поведение системы в ближайшем будущем. Представителями такого подхода являются, в том числе, методы «Интегрированная модель авторегрессии — скользящего среднего» (ARIMA), Метод k-ближайших соседей (KNN), Метод опорных векторов.

Модели семейства ARMA (Модель авторегрессии — скользящего среднего) сыграли ключевую роль в развитии данной области исследования. Для прогноза использовались одномерные модели ARIMA [9], а также Seasonal ARIMA [10] которая является усовершенствованием ARIMA: в ней дополнительно используется зависимость данных от времени года. Несмотря на то, что данные модели показывают хорошие результаты, они

имеют существенный недостаток: каждый датчик рассматривается независимо, а корреляции между соседними сенсорами игнорируются.

Благодаря своей простоте, в многомерном случае самой используемой моделью является векторная авторегрессия (Vector autoregression, VAR). Пространственные зависимости в этой модели уже учитываются. Однако, так как модель рассматривает зависимости датчиков «всех со всеми», то с увеличением размера анализируемой сети, сложность моделей VAR растёт квадратично. Это накладывает существенные ограничения и затрудняет их применение в крупных транспортных сетях.

Следует отметить, что общим ограничением авторегрессивных моделей является моделирование только линейных зависимостей.

С учётом стохастической и нелинейной природы первичных данных исследователями было предпринято много попыток использования непараметрических методов. В работе Дэвис Г. А. и Нихан Н. Л. «Непараметрическая регрессия и краткосрочное прогнозирование движения на автомагистралях» был использован k-NN-метод [11]. При прогнозировании трафика были достигнуты результаты, сопоставимые с результатами линейных моделей, но не лучше их.

Для расчёта времени в пути в транспортной сети в работе была применена модель Online Support Vector Regression (Online SVR) [12]. В ней веса функции предсказания обновляются в режиме реального времени при помощи пошагового обучения. Результаты этого метода показали себя немного лучше, чем предыдущие модели, особенно при нетипичных, единичных и неповторяющихся дорожных ситуациях.

Общая проблема всех упомянутых выше моделей заключается в том, что у них нет хорошего понимания структуры дорожной сети. Они не учитывают тот факт, что данные трафика имеют пространственные особенности и взаимосвязи. Каждая дорога влияет на соседние, а упомянутые выше подходы (традиционное машинное обучение и модели глубокого обучения) не способны обрабатывать данные с графической структурой.

В области анализа трафика в реальном мире точное представление данных о дорогах в сетевых структурах вызывает сложности из-за их сложной природы. В результате более эффективным методом является использование данных с графической структурой. Для этих целей перед началом построения модели необходимо описать пространственную структуру существующей дорожной сети.

Наибольшим прогрессом по сравнению с традиционными линейными и нелинейными методами прогнозирования трафика обладают графовые нейронные сети (GNNs). Эти модели совмещают с одной стороны возможности машинного обучения на

предопределённом наборе данных, с другой стороны возможности классических нейронных сетей. При этом GNNs работают непосредственно с графовыми структурами, что позволяет им улавливать сложные взаимосвязи между объектами и делать выводы на основе данных, представленных в виде графа. Доказав свою эффективность в различных задачах прогнозирования на уровне узла, ребра и графа, GNNs в настоящее время считаются передовыми в области прогнозирования движения.

1.2.2 Существующая проблема с данными

В любой системе прогнозирования трафика в качестве источника накопления первичной информации используются данные с устройств, фиксирующих факт передвижения автотранспортных средств. Несмотря на то, что такие устройства могут быть установлены на дорогах и магистралях стационарно, в нашей стране основной поток информации поступает от онлайн-устройств с обратной связью: портативных навигаторов, смартфонов с установленной навигационной программой, а также встроенных в автомобиль устройств. Эти датчики, используя системы глобального позиционирования, такие как NAVSTAR и ГЛОНАСС, фиксируют моменты прохождения автомобилем некоторых опорных точек. Чаще всего это проезд начала и конца сегмента дороги. На основании этих данных можно рассчитать скорость проезда сегмента автомобилем, а также количество автомобилей, проехавших по сегменту за определённый период времени.

Большинство данных, получаемых от таких устройств, безусловно могут быть использованы для задач анализа и моделирования трафика. Однако, у этих данных есть значительные недостатки: их зашумлённость и неполнота.

Зашумлённость обусловлена ошибками определения местоположения автомобиля, а значит, и его скорости. Системы глобального геопозиционирования в их гражданском исполнении при статическом измерении позволяют определить свои координаты с точностью не лучше 3 метров. Однако, для движущегося объекта точность измерения падает. Например, при движении со скоростью 90 км/ч точность составит около 35 метров. И это в условиях идеального приёма спутникового сигнала. А если учесть, что анализ движения в основном интересен в городах, где существует многоэтажная застройка, экранирующая сигнал от навигационных спутников и добавляющая эффект «многолучевого распространения», а также работает огромное число радиопередатчиков, создающих помехи, точность может снизиться значительно сильнее.

Существуют методы повышения точности, использующие дифференциальное определение координат относительно неподвижной опорной станции, которая ведёт непрерывные спутниковые наблюдения и транслирует по каналам связи поправки,

позволяющие достичь сантиметровой точности определения координат (режим Real Time Kinematic, RTK). Однако, данный метод не используется в массовых бытовых навигационных приборах [13].

Кроме того, измерения положения движущегося транспортного средства производятся через определённые интервалы времени, обычно с шагом в 1 или 2 секунды. За это время транспортное средство, движущееся, к примеру, со скоростью 60 км/ч, проезжает от 16 до 34 м, что также вносит существенные искажения в получаемую картину.

Неполнота спутниковых данных обусловлена тем, что судить о степени загруженности конкретной дороги возможно только в том случае, если по ней передвигаются автомобили. Дороги с маленьким или эпизодическим трафиком имеют незначительный объем накопленной информации, на основании которого сложно делать выводы об особенностях движения в этом месте.

Помимо этого, в случае незагруженного движения скорость автомобиля чаще всего зависит не столько от состояния трафика, сколько от личных предпочтений водителя, его навыков, манеры езды, типа и технического состояния транспортного средства. То есть, чем менее плотное движение на выбранном сегменте дороги, тем больший разброс в фиксируемой скорости проезда можно наблюдать.

Наконец, цель, с которой водитель перемещается по городу, а также причины его остановок, неизвестны. Возможно, он останавливается подобрать пассажира или сходить в магазин, а не из-за образовавшегося на пути затора. Такие события необходимо идентифицировать и помечать как недостоверные.

Ещё одна проблема, с которой можно столкнуться при обработке первичных данных – зависимость скорости движения транспортных средств от направления их движения после перекрёстка. Для примера возьмём дорогу, имеющую в рассматриваемом направлении две полосы. Левая полоса используется для поворота налево, а правая – для движения прямо. В таком случае может возникнуть ситуация, когда в очереди на левый поворот собирается очередь, в то время как правый ряд остаётся свободным. При этом в один и тот же период времени будут получены противоречивые данные: одни датчики покажут затор и низкую скорость движения транспортных средств, а другие – дорогу со свободным движением с максимальной разрешённой скоростью.

В более сложных случаях затор может формироваться даже за несколько сегментов до разделения потоков. Таким образом для анализа дорожной ситуации нужно учитывать направление, в котором автомобиль выезжает с перекрёстка, а не просто брать среднюю

скорость транспортных средств за период. Получить такие данные для анализа гораздо сложнее.

Отдельно следует отметить, что разговор о первичных данных имеет смысл только в отношении уже существующих дорог, по которым возможно накопить статистику движения. Если необходимо спрогнозировать движение по проектируемой трассе, а также учесть её влияние на существующую дорожную сеть, подход с применением анализа статистики за предыдущий период не сработает, так как такой статистики быть не может. И здесь на первое место выходят методы моделирования на основе свойств системы, а не на основе реальных статистических данных.

1.3 Топология сетевых моделей

1.3.1 Граф дорожной сети

Фундаментальной структурой, используемой в системах прогнозирования трафика, является граф. Формально его можно записать как $G = (V, E, A)$, где V – это набор вершин или узлов, E представляет собой набор рёбер, соединяющих узлы, а A – это матрица смежности. В различных моделях у узлов и рёбер могут быть те или иные атрибуты. Элемент a_{ij} матрицы A задаёт «вес ребра» между узлами i и j . В случае бинарной матрицы смежности a_{ij} равно 1, если ребро между узлами i и j существует (находится в множестве E), и 0 в противном случае. Если A симметрична, то граф G считается ненаправленным. То есть, если есть путь из узла i в узел j , то существует такой же обратный путь из узла j в узел i . В противном случае граф направлен, что означает невозможность движения между некоторыми узлами одновременно в противоположных направлениях.

Для упрощения матрица смежности задаётся для узлов графа, хотя её возможно задать и для рёбер. В реальных моделях состояние движения измеряется и фиксируется в дискретные моменты времени, например, каждые пять минут или один час, в зависимости от конкретной задачи. Для определённого момента времени t состояние дорожного движения описывается в виде набора характеристик узлов $\chi_t \in \mathbb{R}^{N \times d}$, где N – количество узлов, а d – количество различных характеристик узла, описывающих состояние дорожного движения.

Прогнозирование движения на основе графа (без внешних факторов) определяется как нахождение функции f , генерирующей прогнозируемое состояние дорожного движения $y = f(\chi; G)$, основываясь на предыдущих состояниях движения $\chi = \{\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_T\}$, определённых на графе G , где y – набор характеристик прогнозируемого состояния дорожного движения, а T представляет собой количество временных шагов в предшествующем временном интервале.

При одношаговом прогнозировании задача определяется как нахождение состояния движения в следующем временном шаге. Если же рассматривается многошаговое прогнозирование, то оно направлено на предсказание состояния движения на несколько временных шагов вперёд.

На условия движения влияют не только свойства дорожной сети, но и различные внешние факторы, такие как погода, праздники и т.д. С учётом этих факторов задача прогнозирования формулируется как нахождение $y = f(\chi, \varepsilon; G)$, где ε представляет собой внешние факторы.

В зависимости от конкретной задачи и имеющихся данных о движении в задачах прогнозирования могут использоваться графы различных структур. Они могут быть заранее определёнными статическими графами, либо динамическими графами, которые изменяются по мере появления новых данных. Статические графы можно дополнительно разделить на два типа: естественные графы и графы сходства. Естественные графы строятся на основе структуры реальной транспортной системы, такой как дорожная сеть или метрополитен. Графы сходства создаются на основе схожести различных атрибутов узлов, которые могут являться, например, виртуальными станциями или регионами.

Для прогнозирования заторов используются графы так называемого «дорожного уровня». К таким графам относятся графы датчиков, графы дорожных сегментов, графы перекрёстков и графы дорожных полос.

Графы датчиков создаются с использованием данных от датчиков движения, где узлами являются датчики, а рёбрами - дорожные соединения.

Три оставшихся графа (графы дорожных сегментов, графы перекрёстков и графы дорожных полос) строятся на основе реальных дорожных сетей. В них узлами являются сегменты дорог, перекрёстки и дорожные полосы соответственно. На рисунке 3 представлена типов

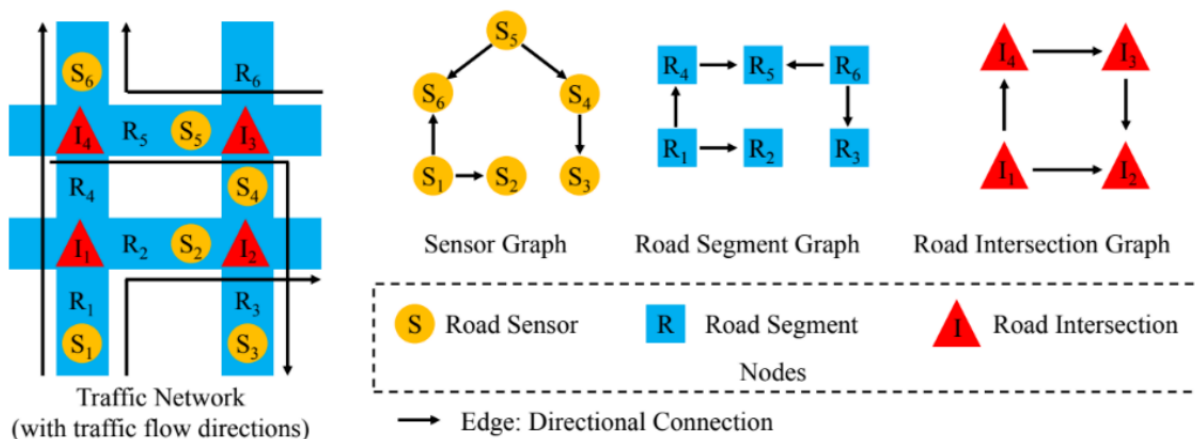


Рисунок 3 – Типы дорожных графов

Во многих случаях графы «дорожного уровня» являются наиболее подходящими, особенно когда имеются транспортные средства, передвижение которых ограничено определёнными дорогами.

1.3.2 Построение матрицы смежности

Матрица смежности является ключевым элементом, определяющим характеристики дорожного графа, и необходима для учёта пространственной зависимости между узлами.

По способу построения матриц их можно разделить несколько типов: матрицы дорог, матрицы, основанные на расстоянии, матрицы сходства и динамические матрицы. На рисунке 4 представлена классификация матриц смежности по способу построения.



Рисунок 4 – Матрицы смежности, разделённые по способу построения

Матрицы дорог опираются на топологию существующей дорожной сети и бывают следующих видов: матрица соединений, матрица транспортной связности и матрица направлений.

Матрица соединений – широко используемый метод представления взаимосвязи между узлами. Она имеет бинарный формат, и её элементы равны 1, если соответствующие узлы соединены, и 0 для обозначения отсутствия соединения.

Матрица транспортной связности используется в ситуациях, когда две области географически удалены, но их можно удобно достичь по автомагистрали, шоссе или в метро. Эта матрица также включает случаи, когда соединение определяется временем в пути между различными узлами. Например, если транспортное средство может

перемещаться между двумя перекрёстками менее чем за 5 минут, создаётся ребро между двумя перекрёстками.

Менее часто используемая матрица направлений учитывает угол между дорожными связями.

Матрицы, основанные на расстоянии – широко используемые матрицы, описывающие близость узлов в пространственном отношении. Существует два типа этих матриц: матрица соседства и матрица расстояний. В матрицах соседства значения определяются тем, имеют ли две области общую границу. Если они граничат, значение устанавливается равным 1 (или 1/4 для топологий с квадратными ячейками) и 0 в обратном случае. В матрицах расстояний значения определяются геометрическим расстоянием между узлами. Это расстояние можно вычислить разными способами, например, как предпочитаемый маршрут для водителя или кратчайший путь по дорогам. Другой подход - расчёт близости между местоположениями с использованием алгоритма случайного блуждания с перезапуском. Однако, такие матрицы обладают существенным недостатком: они не учитывают сходство условий движения между удалёнными узлами. Кроме того, построенная матрица смежности, основанная на расстоянии, в большинстве случаев является статичной.

Матрицы сходства можно разделить на две подкатегории: матрицы похожести трафиковых паттернов и матрицы функционального сходства. Матрицы похожести трафиковых паттернов описывают взаимосвязи между условиями движения: схожесть в паттернах движения, взаимозависимость между различными участками сети и корреляция интенсивности трафика в различных регионах. Матрицы функционального сходства отражают распределение различных точек интереса (Points of Interest, PoIs) в регионах.

Динамическая матрица используется в ситуациях, когда не используются заранее рассчитанные статические матрицы. В ряде исследовательских проектов использование динамических матриц продемонстрировало определённые преимущества по сравнению с заранее определёнными матрицами смежности, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Список матриц смежности

Тип матрицы смежности	Формула для элемента
Матрица соединений	$a_{ij} = 1$ если узлы i и j соединены, в противном случае $a_{ij} = 0$
Матрица транспортной связности	$a_{ij} = 1$ если возможно добраться из узла i в узел j , в противном случае $a_{ij} = 0$
Матрица направлений	a_{ij} = углу между сегментами дорог
Матрица расстояний	$a_{ij} = d_{ij}$, где d_{ij} – некоторое расстояние между узлами i и j
Матрица похожести трафиковых паттернов	a_{ij} – коэффициент корреляции состояния дорожного движения в прошлом в узлах i и j
Матрица функционального сходства	a_{ij} – коэффициент корреляции распределения точек интереса (POI) в областях i и j
Динамические матрицы	–

1.4 Различные модели сетевого трафика

По уровню детализации и методу моделирования все модели можно разделить на два класса: макроскопические и микроскопические.

В макроскопических моделях транспортный поток рассматривается в целом, а его характеристики, такие как плотность, средняя скорость, интенсивность, изучаются усреднённо. Транспортные средства как отдельные единицы не рассматриваются. Такие модели могут быть непрерывными, описанными дифференциальными уравнениями в частных производных, либо дискретными.

К макроскопическим моделям относится, например, одна из первых моделей – метод Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR) [14], основанная на уравнениях гидродинамики и выполнении закона сохранения массы. Под массой подразумевается количество автомобилей, участвующих в движении. Эта модель имеет ряд ограничений, в частности, она не работает при очень низких и очень высоких плотностях транспортного потока и показывает некорректные результаты вблизи «узких мест» и регулируемых перекрёстков.

Другие методы расчёта транспортной загруженности – матричные методы межрайонных корреспонденций, например, гравитационная модель или метод равновесного распределения потоков.

Идею построения гравитационной модели дал всемирный закон тяготения, утверждающий, что все тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению масс этих тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. В транспортной системе телами являются пункты, порождающие или поглощающие

потоки, за массу тела принимается суммарный объем выезжающего/въезжающего потока, расстояние меняется на затраты, связанные с перемещением из истока в сток. Таким образом модель рассчитывает распределение потоков, участники которых выбирают такой путь, стоимость поездки по которому минимальна.

В модели равновесного распределения считается, что все участники движения выбирают такие пути следования, где индивидуальная цена поездки минимальна. В результате на всех элементах сети в результате индивидуальных выборов складываются значения интенсивности потока. Значения интенсивности, в свою очередь, влияют на обобщённую цену элементов, а следовательно, на индивидуальный выбор участников.

В результате процесса «проб и ошибок» в системе устанавливается такое распределение потоков, когда ни один из участников движения не может изменить свой путь так, чтобы уменьшить свою индивидуальную цену поездки.

Широкое развитие высокопроизводительных систем, выполняющих массивные параллельные вычисления, позволило применить ряд других методов, называемых «микроскопическими». В них поведение дорожной сети моделируется таким образом, что каждый движущийся элемент (автомобиль) рассматривается отдельно. Одним из таких методов является моделирование при помощи сетей Петри [15]. Модель позволяет симулировать сеть, основываясь на реальной геометрии местности, в которой осуществляется движение транспорта.

Суть этого метода заключается в преобразовании исходного графа дорог в сеть Петри. При этом каждый сегмент дороги разбивается на участке длиной 3–5 метров. Подразумевается, что каждый из участков может занимать только один автомобиль, либо же участок может быть пустым. За логику передвижения машин отвечают переходы, которые в модели могут быть разных типов: переходы-источники, переходы-развилки, переходы-стоки, простые переходы. Моделируя перемещение множества автомобилей по ячейкам, можно симулировать работу всей дорожной сети.

Сложностью при реализации данной модели является автоматическое определение и разрешение конфликтных ситуаций, когда две машины стремятся занять одну ячейку сети. Разрешение этих конфликтов строится на использовании Правил дорожного движения [2], а также на организации реального движения на местности при помощи знаков приоритетов. Таким образом, для моделирования необходимо изначально знать не только структуру дорожной сети, но и правила проезда перекрёстков, установленных дорожными службами, что не всегда возможно.

Кроме того, несмотря на то, что данный метод позволяет сравнительно без затруднений масштабировать процессы на большое количество параллельных потоков, преобразование дорожного графа даже для не очень большого фрагмента местности порождает огромную сеть Петри, поэтому моделирование этим методом чаще применяется для отдельных перекрёстков, развязок или небольших участков.

Отказаться от использования сети Петри позволяет метод расчёта характера движения автомобилей под названием «Модель разумного водителя» [16]. В ней предполагается, что машины едут по одной полосе друг за другом, при этом каждый водитель является добросовестным и следует за идущей впереди машиной, которая для него является «лидером». Он, в свою очередь, также является лидером для автомобиля, следующим за ним. Уравнение, описывающее движение автомобиля, включает слагаемые, отвечающие за ускорение машины на свободной дороге, и её торможение при сокращении дистанции до лидера. Модель позволяет задать собственную желаемую скорость каждого автомобиля на свободной дороге, а также допустимую дистанцию до лидера. Имея выражения для движения каждой машины, можно рассчитать параметры потока автотранспорта в установившемся режиме.

В качестве недостатков данного метода можно указать неспособность модели обрабатывать столкновения. С точки зрения модели автомобиль может остановиться на заданной дистанции от внезапно возникшего препятствия вне зависимости от того, насколько неожиданным оно оказалось. Это происходит за счёт больших отрицательных ускорений, которые допустимы в модели. В реальной жизни это приводит к столкновению.

Вторым существенным недостатком является то, что модель не учитывает время реакции водителя в явном виде. Например, если цепочка автомобилей стоит перед красным сигналом светофора, и загорается зелёный свет, согласно модели, все автомобили в цепочке начинают движение одновременно. Однако, в жизни такого не бывает: водители начинают движение по очереди, растягивая колонну.

Некоторые исследователи попытались модифицировать модель, чтобы поведение водителя стало более приближенным к реальности [17]. Однако, для построения полноценной модели в таком случае необходимо изучить распределение водителей и транспортных средств по качествам и характеристикам, что является отдельной непростой задачей.

Ещё одним микроскопическим симулятором транспортных сетей, имеющим значительную популярность, является решение SUMO (Simulation of Urban MObility –

«симуляция городской мобильности»). Разработчик – Институт исследования транспорта (Institute of Transportation Systems, Германия).

Данный фреймворк имеет открытый исходный код и позволяет строить модели непрерывных потоков транспортных сетей. Так как SUMO – это моделирование на микроскопическом уровне, свойства каждого участника дорожного движения описываются отдельно. Модель SUMO также учитывает взаимное влияние автомобилей и других участников дорожного движения. При этом рассчитываются такие параметры модели дорожного движения, которые обеспечивают максимальную пропускную способность без создания аварийных ситуаций. В модели можно детально задавать свойства элементов дорожных сетей и участников дорожного движения, в том числе смену полос дорожного движения, циклы светофорного регулирования перекрёстков. Отдельно можно учитывать поведение пешеходов, которые оказывают влияние на поведение автомобилей.

Несмотря на большую детализацию микроскопических моделей движения, у них присутствует один и тот же глобальный недостаток: они очень требовательны к вычислительным ресурсам. Поэтому эти модели целесообразно использовать при моделировании ограниченной территории и не в реальном времени.

Для решения задачи загруженности дорожной сети логично использовать имеющуюся информацию о топологии сети для обозначения истоков, стоков и затрат в макроскопических моделях, а также задания свойств элементов в микроскопических моделях. При этом всю рассматриваемую территорию можно разбить на макроэлементы и применять к ним ту или иную модель по отдельности, используя входные и выходные потоки трафика, полученные в результате моделирования соседних связанных областей.

2 Разработка метода

2.1 Методология моделирования загруженности дорог

Существует большое количество методов моделирования транспортных потоков (а значит, и загруженности дорог). Однако до сих пор нет устоявшейся и исчерпывающей классификации этих методов. В зависимости от критерия, по которому оценивается метод, он может быть отнесён к той или иной группе [18].

Чаще всего методы классифицируются по уровню детализации. На рисунке 5 представлена система классификации методов.



Рисунок 5 – Классификация методов

Существуют макроскопические, мезоскопические и микроскопические модели. В макроскопическом методе транспортный поток рассматривается как жидкость, обладающая определёнными параметрами: скорость, плотность, интенсивность и т. п. При этом движение отдельных транспортных средств не рассматривается.

Одна из наиболее распространённых макроскопических моделей – модель Лайтхилла и Уизема. Её относят к моделям-аналогам, так как в ней движение транспортных средств подчиняется законам гидродинамики, в частности выполняется закон сохранения массы. Под «массой» тут понимается количество автомобилей, которое сохраняется неизменным.

Недостатками данной модели являются следующие особенности:

- плохая работа при высоких и низких плотностях транспортного потока;
- неадекватность на светофорах и «узких» местах.

Преимуществами модели является её относительная простота и нетребовательность к вычислительным мощностям.

Мезоскопические методы – модели, в которых уже учитывается взаимодействие элементов друг с другом, но при этом это взаимодействие рассматривается на макроуровне.

Примером мезоскопической модели является гравитационная модель [19]. В данной модели транспортные потоки рассчитываются с опорой на тезис, что вся рассматриваемая территория состоит из районов, которые можно отнести к районам-«истокам» и районам-«стокам» [20]. Между районами возникают транспортные потоки (корреспонденции). По

аналогии с законом всемирного тяготения корреспонденция из одного района в другой будет зависеть от ёмкости районов истока и стока (аналог массы), и от расстояния между этими районами.

Недостатки метода:

- для разных категорий участников движения «притягательность» районов различна, и зачастую её трудно определить;
- не учитывается влияние близости районов друг к другу на их привлекательность.

Преимущества метода:

- компактность и нетребовательность к вычислительным ресурсам;
- расчёт транспортных потоков, более приближенных к реальной жизни, так как он основан на информации о реальных потребностях участников дорожного движения.

В модели равновесного распределения потоков каждой поездке по тому или иному маршруту назначается соответствующая «цена», и участники движения выбирают маршрут, исходя из требования минимизации затрат. В результате вычислений методом «проб и ошибок» достигается равновесное состояние, которое и является результатом расчёта [21].

Преимущества:

- средняя вычислительная сложность.

Недостатки:

- дискуссионный вопрос способа расчёта «цены» поездки;
- неспособность адекватно описывать изменения транспортной картины.

Микроскопические модели рассматривают каждый объект движения по отдельности. Применяются в основном для моделирования небольших территорий, таких как перекрёстки. Такие модели требуют значительных вычислительных мощностей.

Основным тезисом модели следования за лидером является предположение, что движение каждого транспортного средства определяется его водителем как баланс между желаемой скоростью и расстоянием до «лидера», которое не должно быть меньше установленного интервала. Модификация данного метода получила название «Метод разумного водителя». В нём движение описывается как комбинация двух стратегий: ускорения и торможения». Выбор стратегии в каждый определённый момент времени определяется расстоянием до впереди идущего автомобиля.

Недостатки:

- большая вычислительная сложность;
- не учитываются столкновения;

- неработоспособность модели в случае отсутствия «лидера».

Преимущества:

- реалистичное моделирование транспортных потоков;
- учёт влияния психофизического состояния водителей.

Модель клеточного автомата разбивает дорогу на клетки–ячейки. Каждая ячейка описывается состоянием, которое зависит от состояния соседних ячеек. Движение автомобилей в таком случае описывается последовательным изменением состояний ячеек в дискретные моменты времени.

Преимущества:

- высокая степень детализации поведения транспортных средств;
- высокая эффективность при оптимизации работы регулируемых перекрёстков.

Недостатки:

- необходимость больших вычислительных мощностей;
- необходимость тонкой калибровки параметров модели;
- высокая чувствительность к ошибкам в начальных данных.

Предлагаемый метод безусловно можно отнести к мезоскопической категории. Метод не предполагает расчёт характера движения каждого транспортного средства в отдельности, и не учитывает никакие индивидуальные характеристики транспортных средств. Однако, в его основе лежит учёт индивидуальных характеристик дорог, влияющих на их теоретическую максимальную пропускную способность, а также на взаимное расположение дорог по отношению друг к другу. Под «взаимным расположением» подразумевается способы соединений дорог в узлах дорожного графа, а не географическое положение проезжих частей на местности.

2.2 Описание метода

2.2.1 Общее описание метода

Данная работа заключается в оценке расчёта уровня загруженности, определяемого как отношение интенсивности движения на участке к его пропускной способности. Для расчёта интенсивности на связи графа строится N маршрутов между узлами графа. Число N – это количество пользователей УДС исследуемой территории. Маршрут строится между двумя узлами графа, выбранными случайным образом. Для симулирования плотности распределения точек активности пользователей на графе каждому узлу выставляются вероятностные веса, вычисляемые от плотности скопления узлов вокруг. Количество проходящих через связь маршрутов и является интенсивностью. Для расчёта пропускной способности дорог используется параметр количества полос.

Работа метода разделена на 5 этапов, представленных на рисунке 6.

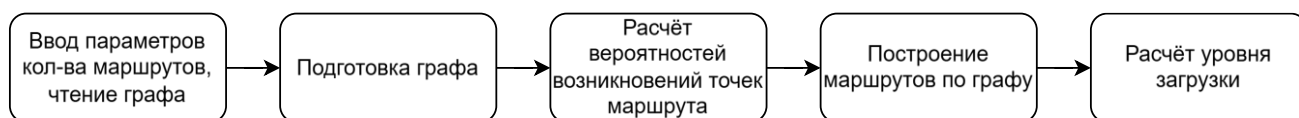


Рисунок 6 – Общая схема метода

Первый этап – ввод параметров модели и графа дорог. Во втором этапе граф подготавливается к вычислениям. В четвёртом этапе каждому узлу рассчитывается вероятность возникновения точки начала или конца маршрута, от которой в следующем шаге будут генерироваться маршруты. В заключительном этапе рассчитывается уровень загрузки каждого узла и генерация картограмм и результирующих файлов. Уровень загрузки является относительной величиной, рассчитываемой как отношение спроса пользования дороги к предложению. В данном методе это отношение интенсивности к пропускной способности.

2.2.2 Требование к входным данным

Входные данные для работы метода состоят из ориентированного графа дорог исследуемой территории и количества пользователей УДС. Все элементы графа, а именно узлы и связи должны содержать информацию об их геопозиции и уникальные ID. Связи должны содержать информацию о начальном и конечном узлах и количестве полос. Все связи должны быть направленными и односторонними. При двустороннем движении на участке в графе должно существовать две связи, по одной в каждую сторону. Все требуемые атрибуты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Требуемые атрибуты

Требуемые атрибуты узлов	Требуемые атрибуты связей
Геопозиция ID узла	ID связи Геопозиция ID начального узла ID конечного узла Количество полос

2.2.3 Пошаговое описание работы метода

После получения графа и количества пользователей начинается предварительная подготовка графа. Для каждой связи добавляются два атрибута: «Пропускная способность» и «Интенсивность». Атрибут «Пропускная способность» рассчитывается согласно своду правил №396 (далее СП-396) [22]: произведение пропускной способности одной полосы, коэффициент изменения пропускной способности и количества полос, показанное в уравнении 1.

Уравнение 1:

$$C_l = C_1 \cdot k_l \cdot l,$$

где C_l – пропускная способность для l числа полос, C_1 – пропускная способность для одной полосы, k_l – коэффициент изменения пропускной способности при l числа полос, l – число полос. Коэффициент изменения пропускной способности, согласно СП-396, берётся согласно таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициент изменения пропускной способности

Наименование показателя	Значение показателя				
Кол-во полос движения в одном направлении (l)	1	2	3	4	5
Коэффициент изменения пропускной способности одной полосы движения (k_l)	1	0,95	0,90	0,86	0,84

Записывается значение пропускной способности согласно классу дороги для каждого линка. В процессе работы метода в поле интенсивность будет записываться количество проходящих через связь маршрутов.

После первичной обработки графа высчитываются вероятности возникновения точки начала или конца маршрута для каждого узла. Причём чем больше плотность узлов вокруг рассматриваемого узла, тем больше вероятность. Таким образом воспроизводится

плотность активностей жителей и пользователей УДС. Для расчёта вероятности для каждого узла считается количество соседних узлов в радиусе 1 километра. Для узлов, у которых нет «соседей» устанавливается минимальное значение 0,1. Вероятность считается как отношение количества соседей в радиусе километра к сумме всех соседей у каждого узла. Получилось искомое значение «Вероятность».

Для построения маршрута в методе случайным образом, основываясь на атрибуте «Вероятность», в узлах генерируются пары точек начала и конца для каждого маршрута. Затем поочерёдно строятся сами маршруты по кратчайшим путям между этими парами. После построения каждого маршрута рассчитывается промежуточный уровень загрузки как отношения количества проходящих через линк маршрутов к пропускной способности линка. При уровне загрузки больше или равном 1.0 линк исключается из графа для построения следующих маршрутов.

Таким образом после построениях всех маршрутов получается граф дорог с атрибутами интенсивности и пропускной способности на каждой связи. Из них можно рассчитать уровень загрузки LL каждого узла как показано в уравнении 2.

Уравнение 2:

$$LL = \frac{I}{C},$$

где I – интенсивность, C – пропускная способность.

По получившемуся значению можно оценить дорожную ситуацию как 0 – движения по дороге нет, 1 – дорога полностью загружена. В таблице 4 представлены значения уровня загрузки.

Таблица 4 – Описание уровня загрузки дороги

Значение	Описание
От 0 до 0,2	Дорога свободна, движение без задержек
От 0,2 до 0,4	Умеренная загрузка, возможны незначительные замедления
От 0,4 до 0,6	Средняя загрузка, движение стабильное, скорость может снижаться
От 0,6 до 0,8	Высокая загрузка, чаще замедления, возможны пробки
От 0,8 до 1	Значительные задержки, движение с перебоями
От 1 и выше	Дорога полностью заполнена

Полная схема работы метода представлена на рисунке 7.



Рисунок 7 – Полная схема метода

2.2.4 Форма представления результата

Результат может быть представлен как объект–граф с полями «Уровень загрузки» и «Интенсивность» у связей и впоследствии использоваться для дальнейших автоматических анализов, так и в графическом виде как на рисунке 8. В этом случае цветная градиентная кодировка от зелёного до красного обозначает загрузку связей: зелёный – дорога не загружена, уровень загрузки равен 0; красный – дорог полностью загружена, уровень равен 0.

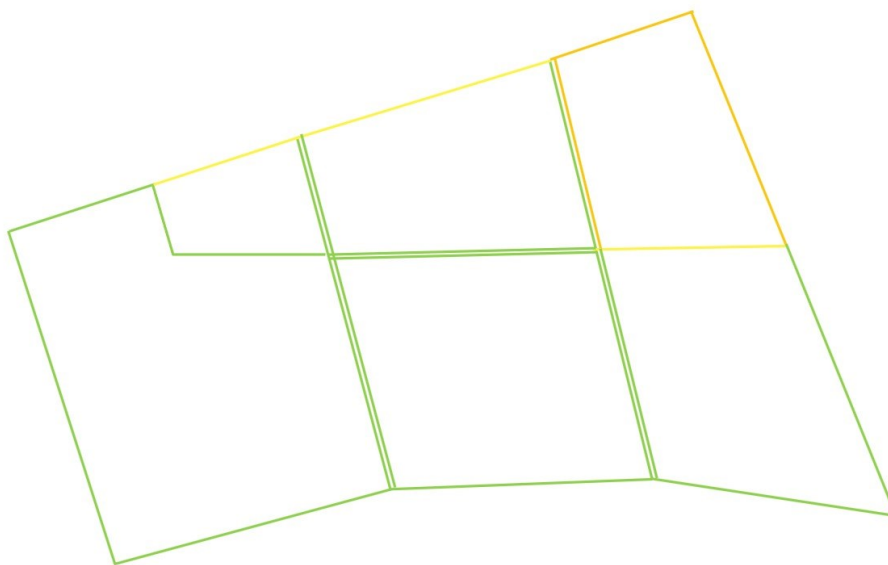


Рисунок 8 – Визуальное представление результата работы метода

3 Экспериментальное исследование

3.1 Описание экспериментальных сценариев

На вход в алгоритм необходим направленный граф улично-дорожной сети. Схема данных представлена на рисунке 9.



Рисунок 9 – Схема входных данных

Геометрия рёбер типа «LineString». Ребра графа должны иметь следующие атрибуты:

- osmid – ID ребра в OSM;
- «start_node» и «end_node» – ID узлов откуда начинается и где заканчивается ребро;
- lanes – целочисленное поле с количеством полос на ребре;
- one_way – булевский флаг, обозначающий одностороннее движение;
- reversed – булевский флаг, обозначающий направление движения;
- Узлы должны иметь геометрию «Point» и иметь поле ID.

Для проведения исследования метода, была выбрана территория городского округа город Выкса Нижегородской области (далее – ГО г. Выкса), показанная на рисунке 10. Были созданы следующие экспериментальные сценарии:

- сценарий 0, содержащий граф дорог существующего положения;
- сценарий 1, содержащий граф с увеличением количества полос на магистральной улице;
- сценарий 2, содержащий граф с добавлением западного обхода города.

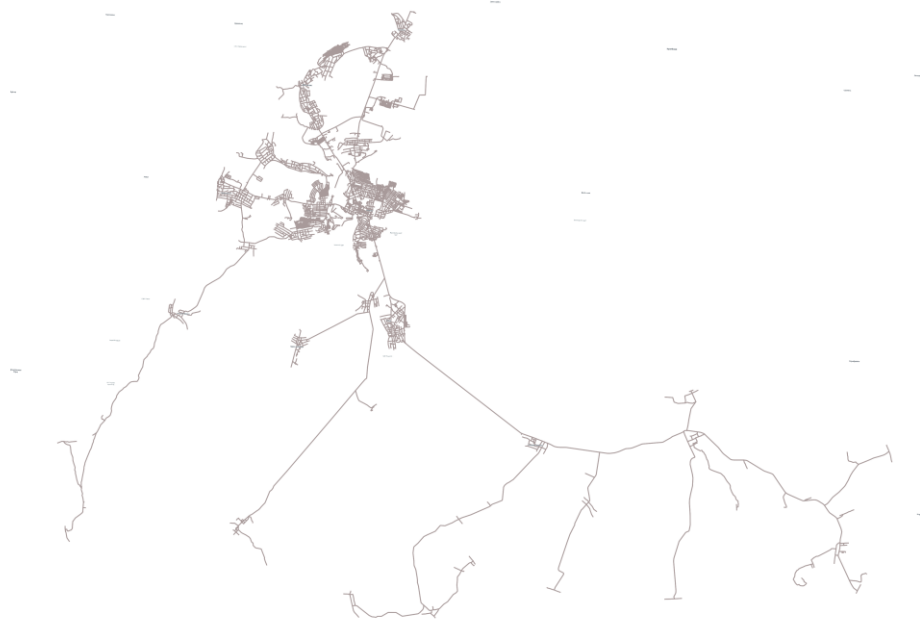


Рисунок 10 – Граф дорог территории ГО г. Выкса

Сценарий 0 предполагает содержание графа автомобильных дорог существующего положения. Рёбра графа должны содержать поле «количество полос». Сам граф представляет из себя улично-дорожную сеть ГО г. Выкса. Граф дорог представлен на рисунке 11.



Ожидается, что в результирующем графе будет наблюдаться высокий уровень загрузки на участки улицы Ленина от перекрёстка Борковского проезда до улицы Братьев Барташевых. Расположение улиц показано на рисунке 12.

Сценарий 1 содержит граф из сценария 0, но центральный участок на улице Ленина от Борковского проезда до улицы Почтовой будет расширен с 1 до 2 полос в каждом направлении. Ожидается, что в этом случае результат работы метода покажет меньшую загрузку данного участка и прилегающего к нему улицам, чем в сценарии 0. Граф представлен на рисунке 13.



Рисунок 13 – Сценарий 1 с низкими пропускными способностями осевых дорог

В сценарии 2 будет основан на сценарии 1, но с добавлением новой дороги – Западный обход города, показанной на рисунке 14. Данная дорога запланирована в генеральном план ГО к реализации в будущем. Западный обход будет иметь по одной полосе в каждую сторону. Ожидается уменьшение уровня загрузки в центре города, относительно сценария 1.



Рисунок 14 – Сценарий 2 с высокими пропускными способностями осевых дорог

Исследование и апробация результатов метода будет проходить на результатах макромоделей ГО г. Выкса, собранной на базе фреймворка MATSim.

3.2 Реализация метода

Для реализации метода используется язык Python с библиотеками «networkx», «pandas», «geopandas», «osmnx». Исходный граф автомобильных дорог может быть скачан с сервиса открытых геоданных OpenStreetMap (OSM) или быть прочитан с файла формата geojson. Атрибуты графа помимо геометрии имеют количество полос – «lanes», класс дороги – «highway», флаг одностороннего движения «oneway», флаг направление движения «reversed».

На вход в алгоритм должны поступать граф и количество агентов для построения маршрутов. Для скачивания графа дорог с OSM методу требуется уникальный идентификатор OSM объекта. Для загрузки же графа из файлов требуется файл узлов графа и файл связей графа. Схема данных таких файлов представлена на рисунке 9.

Перед выполнением основного блока алгоритма происходит первичная обработка полученных данных. В самом начале алгоритм восполняет поле «lanes» - количество полос, так как не для всех линков оно заполнено. По умолчанию значение восполнения 1 для односторонней связи. Также в методе упрощается количество полос до одного, минимального значения, если их переменное значение.

После этого в атрибуты связей графа добавляются поля «intensity» со значениями 0 и «capacity», обозначающие интенсивность и пропускную способность соответственно. По умолчанию они заполняются значением количества полос в ребре. Пропускная способность рассчитывается как произведение пропускной способности одной полосы, коэффициент изменения пропускной способности и количества полос. Функция расчёта пропускной способности представлена в листинге 1.

```

ONE_CAPACITY = 1000
LANES_COEF = {
    1: 1.0,
    2: 0.95,
    3: 0.90,
    4: 0.86,
    5: 0.84,
}

def get_capacity_by_lanes(lanes):
    capacity = ONE_CAPACITY * LANES_COEF[lanes] * lanes
    return capacity

```

Листинг 1 – Код расчёта пропускной способности

Значение вероятности появления точки начала или конца маршрута в текущем узле зависит от количества соседствующих узлов этому узлу в радиусе 1 км. Для расчёта вероятности строится K-d-дерево из узлов с помощью метода «KDTree» из библиотеки «sklearn.neighbors» и по нему находится количество узлов в радиусе 1 км. Для того чтобы у узлов, у которых нет соседних узлов в заданном радиусе, не была вероятность 0, добавляется минимальная вероятность 0,001, получается значение веса ребра. Вероятность в узле вычисляется как отношение веса ребра к сумме всех весов рёбер графа. Функция вычисления массива вероятностей представлена в листинге 2.

```

def calculate_density_probabilities(coords, radius=0.01, min_prob=0.001):
    points = np.array(coords)
    tree = KDTree(points)
    counts = np.array([len(tree.query_radius([point], r=radius)[0]) for point
in points])
    weights = counts + min_prob * len(coords)
    probabilities = weights / weights.sum()
    return probabilities

```

Листинг 2 – Код функции расчёта массива вероятностей узлов

Полученные вероятности используются для создания пар точек начала и конца маршрута. Для генерации точек используется библиотека «numpy». Предварительно перед генерацией перепроверяется сходимость всех вероятностей в 1. После прохождения функции получается лист пар координат начала и конца маршрутов. Код генерации точек представлен в листинге 3.

```

def generate_random_points(original_points, probabilities, total_points):
    if len(original_points) != len(probabilities):
        raise ValueError("Количество точек и вероятностей должно совпадать")
    if not np.isclose(sum(probabilities), 1.0):
        raise ValueError("Сумма вероятностей должна быть равна 1")

    chosen_indices = np.random.choice(len(original_points),
size=total_points, p=probabilities)
    new_points = [original_points[i] for i in chosen_indices]

    return new_points

random_points_start = generate_random_points(nodes_id_list, probabilities,
AGENTS_COUNT)
random_points_end = generate_random_points(nodes_id_list, probabilities,
AGENTS_COUNT)
travels = [(random_points_start[node_i], random_points_end[node_i]) for
node_i in range(AGENTS_COUNT)]

```

Листинг 3 – Код функции генерации точек маршрутов

Далее начинается построение маршрута. Трассировка маршрута происходит на копии оригинального графа. Все маршруты строятся последовательно для каждой пары точек начала и конца маршрута. Цикл начинается с нахождения узлов по координатам точек, от которых и до которых строить маршрут. Для трассировки маршрута используется функция «shortest_path» библиотеки «networkx». Построенный маршрут обрабатывается с помощью метода: для каждой связи графа увеличивается счётчик интенсивности на 1. Затем рассчитывается уровень загрузки каждой связи как отношение интенсивности к пропускной способности. При достижении связи уровня загрузки 1,0 – связь удаляется из временного графа, чтобы избежать построения маршрутов по загруженной по максимуму связи. Цикл повторяется пока не будут построены все маршруты. Код генератора маршрутов представлен в листинге 4. Результатом данного этапа является граф дорог с заполненными полями интенсивности связей.


```

def get_route(G, origin_point, destination_point):
    origin_node = ox.distance.nearest_nodes(G, origin_point['x'],
origin_point['y'])
    destination_node = ox.distance.nearest_nodes(G, destination_point['x'],
destination_point['y'])
    route = nx.shortest_path(G, origin_node, destination_node,
weight='length')
    return route

count = 0
G_routing = oneway_routes_graph.copy()
for points in travels:
    #Построение маршрута
    route = get_route(G_routing, G_routing.nodes[points[0]],
G_routing.nodes[points[1]])

    for end_node_i in range(1, len(route)):
        u = route[end_node_i - 1]
        v = route[end_node_i]
        G_routing[u][v] [0]['intensity'] += 1
        oneway_routes_graph[u][v] [0]['intensity'] += 1

        load_level = 1.0 * G_routing[u][v] [0]["intensity"] / G_routing[u][v]
[0]["capacity"]
        if load_level > 1:
            G_routing.remove_edge(u,v)
        print ()
    count += 1

print(f"{count}/{AGENTS_COUNT}")

```

Листинг 4 – Код построения маршрутов

В конце рассчитывается финальный уровень загрузки для каждого узла, генерируются картограммы по этому параметру и геослой в формате geojson. Пример картограммы представлен на рисунке 15. Толщина линии отображает интенсивность движения, а цвет уровень загрузки, где зелёный – 0,0, красный 1,0.

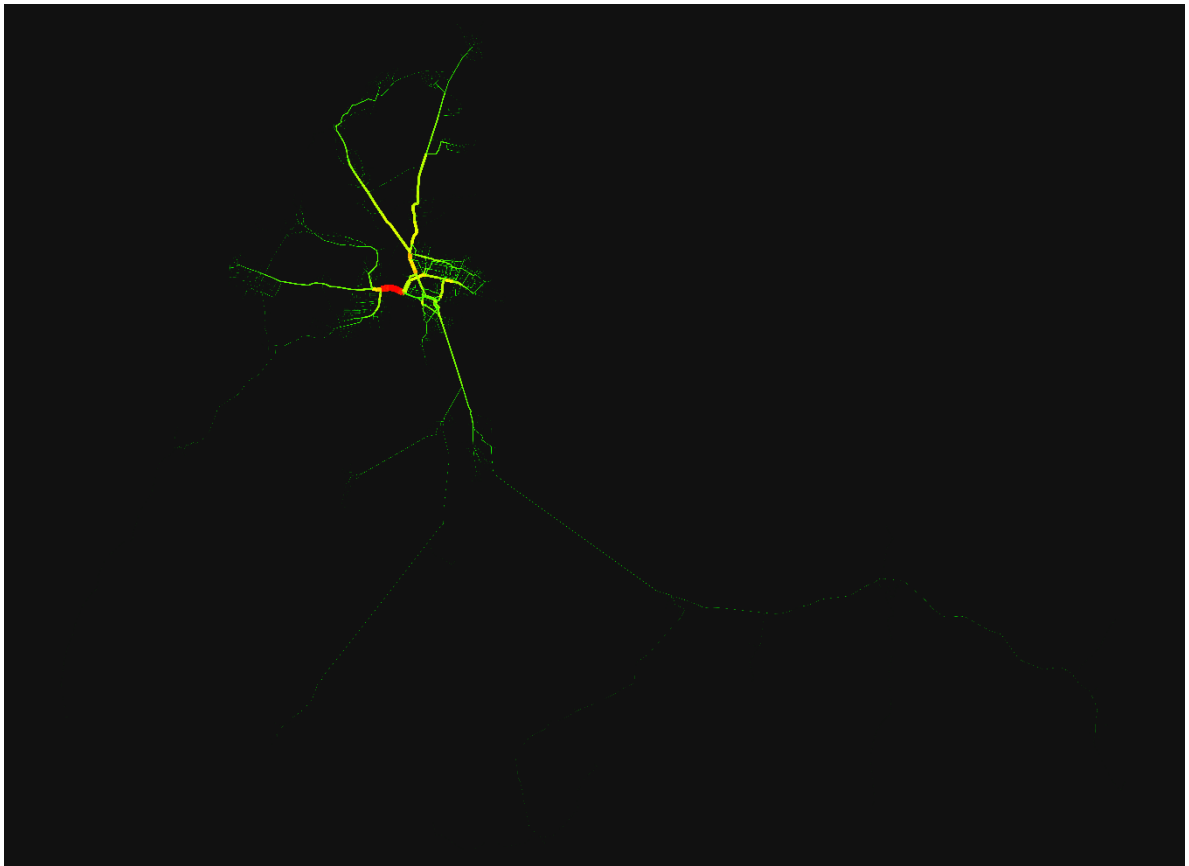


Рисунок 15 – Пример результата работы метода в виде картограммы

Результатом работы алгоритма является новый граф дорог с новым атрибутом рёбер «load_level», характеризующий уровень загрузки. Также в результирующий граф добавлены поля интенсивности «intensity» и пропускной способности «capacity» рёбер. На рисунке 16 представлена схема данных, получаемых в результате работы метода.

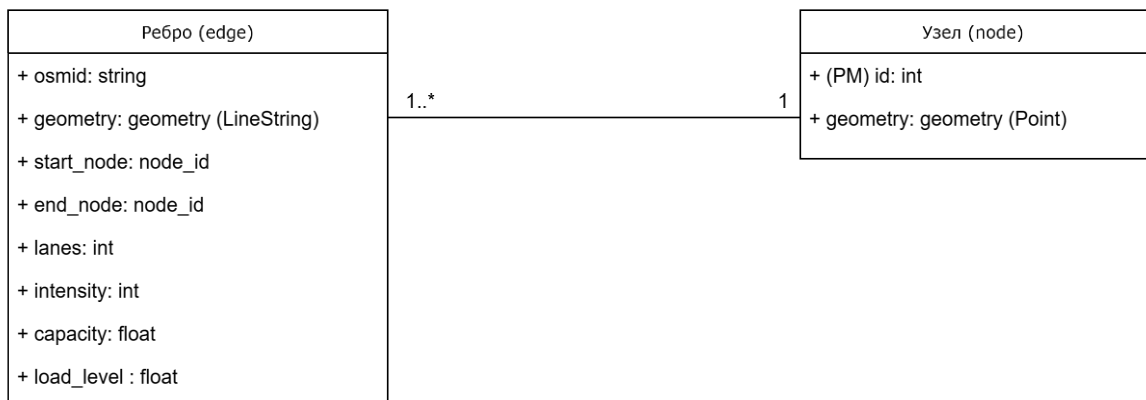


Рисунок 16 – Схема данных, полученных в результате выполнения метода

3.3 Представление сценариев применения метода на сценарных и реальных данных работы метода

В результате использования метода на представленных трёх сценариях получены три графа дорог с новыми атрибутами «Уровень загрузки» и «Интенсивность» на рёбрах этих графов. Для отображения результатов используется приложение QGIS с наложенным на геослой цветовым градиентом, где при значении уровня загрузки 0 – ребро зелёное, а при 1 – красное. Толщина ребра указывает на уровень интенсивность.

На нулевом сценарии, показанном на рисунке 17, можно увидеть максимальный уровень загрузки улицы Ленина на участке от Борковского шоссе до улицы Братьев Барташевых. Улица Братьев Барташевых тоже имеет высокий уровень загрузки вблизи улицы Ленина. Высокий уровень наблюдается и на выезде из города по улице Красных Зорь.

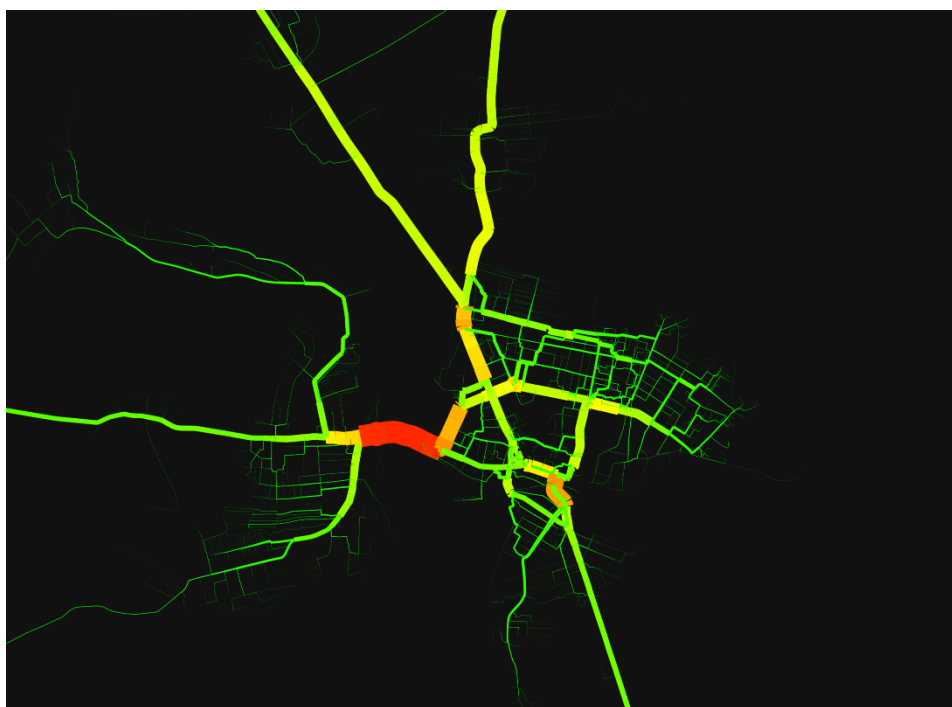


Рисунок 17 – Результат работы метода на сценарии №0

В макромодели, построенной на базе MATSim, можно наблюдать схожую ситуацию. На рисунке 18 можно заметить ту же высокую загрузку по улице Ленина и Красных зорь. Улица Ленина является центральной улицей города и связывает не только две крупных части города, но городского округа. Поэтому ожидаемо, что в часы пик будет высокая загрузка участка. Так же можно заметить совпадение по высокому уровню загрузки прилегающих улиц к перекрёстку улиц Ленина и Почтовой.



Рисунок 18 – Макромодель MATSim сценария №0

Сценарий 1 на рисунке 19, с увеличенным пропускным способностями улицы Ленина, можно заметить, что уровень загрузки упал на всём участке. Это же можно заметить на модели MATSim на рисунке 20.

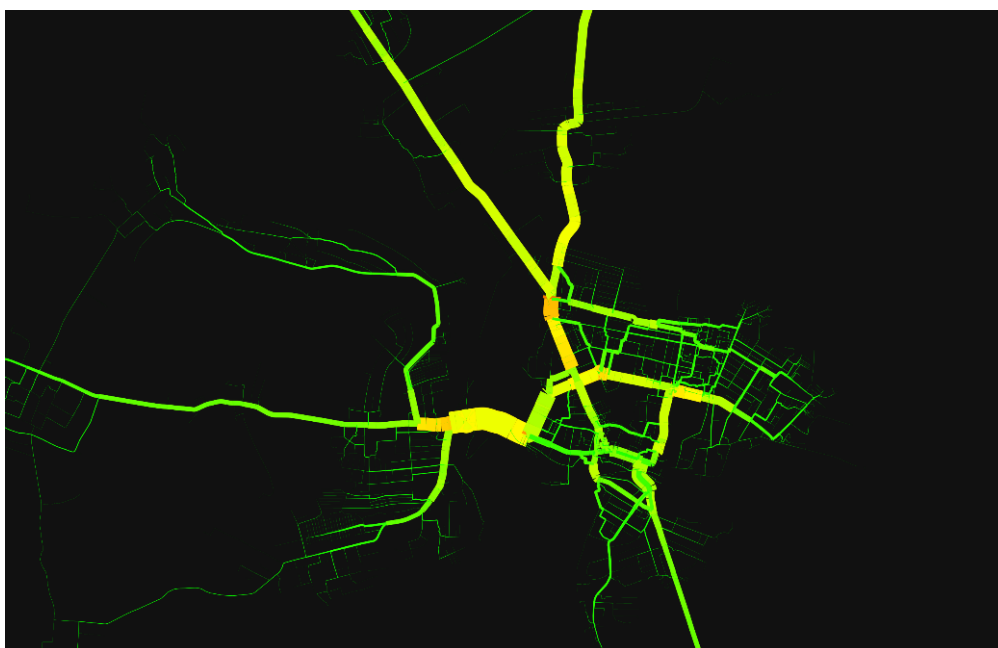


Рисунок 19 – Результат выполнения метода на сценарии №1



Рисунок 20 – Макромодель MATSim сценария №1

На рисунке 21 показан сценарий 2, где был добавлен Западный обход города. Можно наблюдать его средний уровень загрузки, а также значительное уменьшение уровня загрузки по улице Ленина, что свидетельствует о перераспределении трафика на обход. В свою очередь это привело к увеличению уровня на Досчатинском шоссе. В макромодели MATSim на рисунке 22 не наблюдается уменьшения уровня загрузки улицы Ленина, так же, как и увеличения на Досчатинском шоссе. Причины этому скорее всего в том, что в разработанном методе агенты предпочитают ехать по более короткому пути через объезд центру города, а в модели MATSim по привычным маршрутам через центр.



Рисунок 21 – Результат выполнения метода на сценарии №2



Рисунок 22 – Макромодель MATSim сценария №2

На основе результатов работы метода можно увидеть, что метод достаточно хорошо справляется моделированием уровня загрузки, не требует сбора и обработки данных. Метод можно использовать для быстрого анализа. Он позволит быстро оценить текущее и

скорректировать проектное решение, сформировать и оптимизировать техническое задание для разработки углублённой транспортной модели.

4 Рекомендации по внедрению метода

Разработанный метод можно интегрировать в некоторые процессы транспортного планирования. Его можно использовать для создания экспресс-модели на начальных этапах анализа проектных решений. Благодаря простоте и нетребовательности к данным он позволит сократить время анализа, формулирование выводов и принятия решения по последующим этапам разработки решения. На рисунке 23 выделен блок, где в текущих процессах может применяться метод.

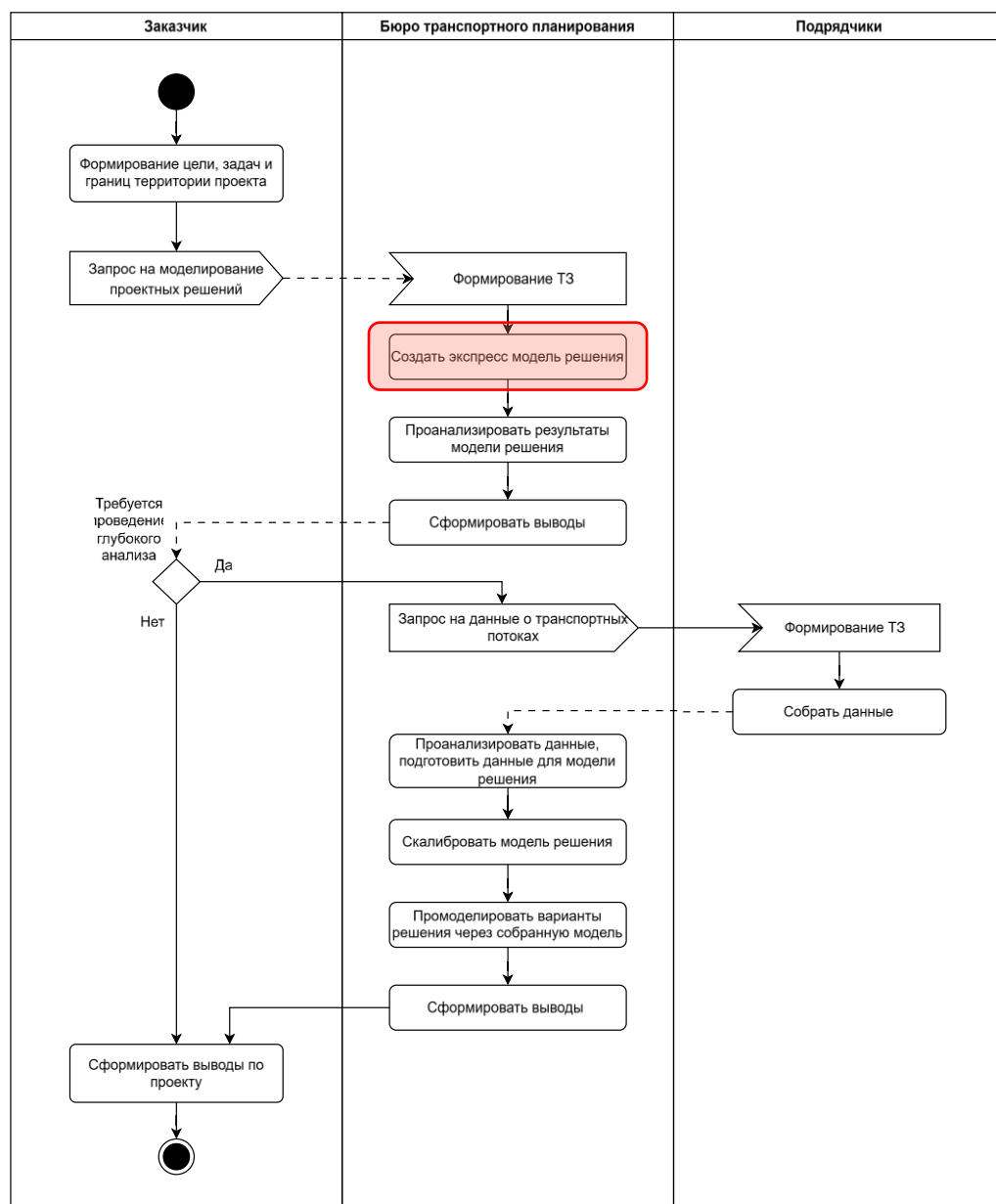


Рисунок 23 – Диаграмма активностей при работе с транспортными проектами и указание места разработанного метода

Так же благодаря своей простоте и не требовательности к программному обеспечению и вычислительным мощностям, его легко развернуть и использовать вне

профессиональных отделов моделирования, например отделами аналитики и транспортного инжиниринга. По этим же причинам его могут использовать не только компании транспортного планирования, но и проектные организации, девелоперы и муниципальные органы. В таком случае этапы разработки и анализа экспресс-модели могут проходить непосредственно у заказчика, как представлено на рисунке 24.

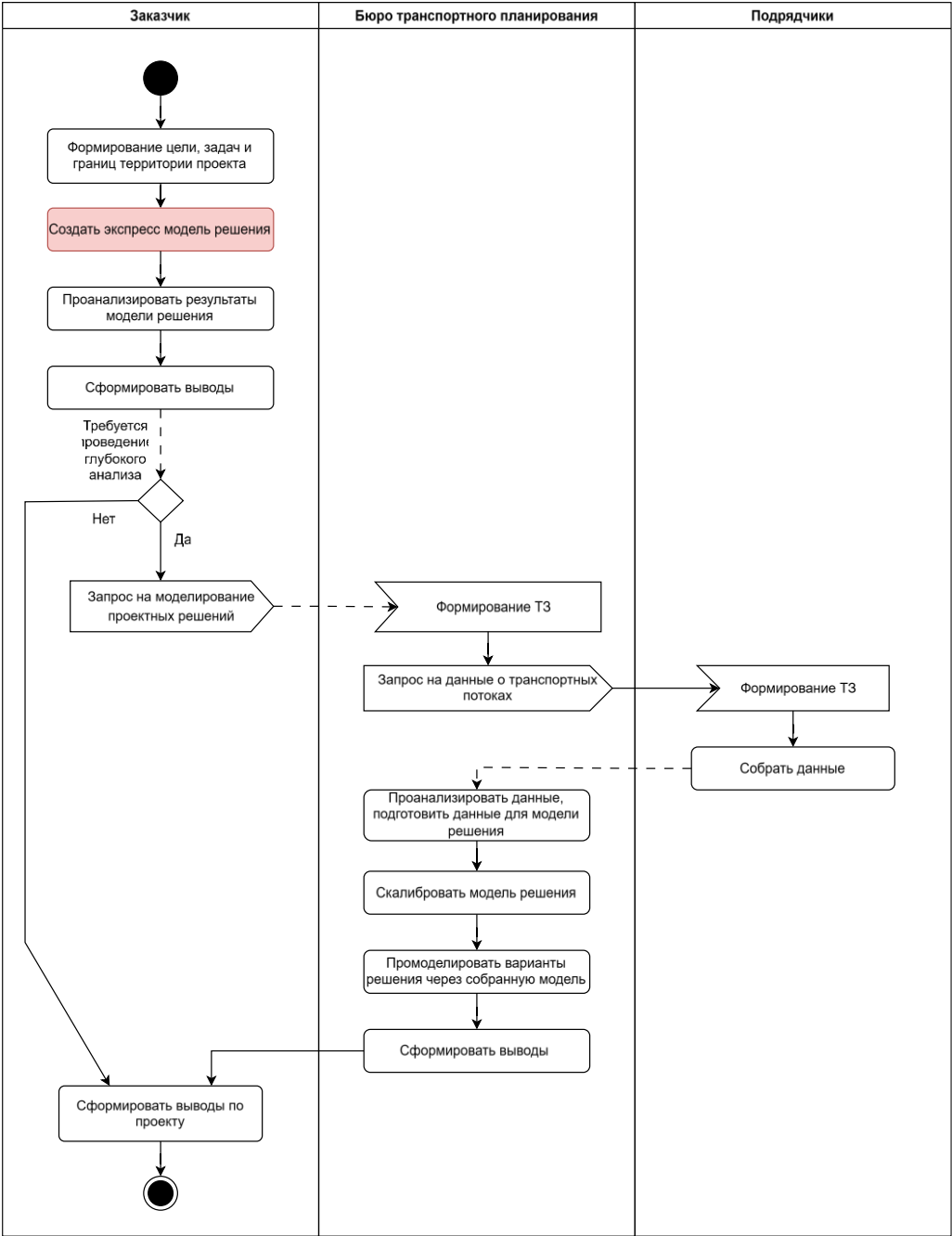


Рисунок 24 – Скорректированная диаграмма активностей при работе с транспортными проектами при использовании разработанного метода заказчиком с указанием его места в процессе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения научно–исследовательской работы была исследована существующая методология прогнозирования загруженности дорог. Были рассмотрены различные методы макро и микро моделирования, такие как гравитационная модель, модель Лайтхилла и Уизема, модель следования за лидером. Разработана модель прогнозирования загруженности дорог, базирующаяся на сетевых свойствах дорог. Модель позволяет прогнозировать, основываясь лишь на графе дорог и его атрибутах. Была продемонстрирована работа метода на муляжных данных.

Было разработано несколько сценариев с экспериментальными данными для исследования поведения метода. На языке Python был реализован метод, способный брать данные из сервиса открытых карт OpenStreetMap и из файлов формата geojson, и проведена демонстрация работы метода на примере городского округа город Выкса. Проведения экспериментальных данных через метод показало, что с помощью метода можно определить точки высокой загрузки сети с высокой скоростью. Несомненным плюсом является быстрота работы метода: на примере ГО г. Выкса метод выполнялся около 10 минут.

Благодаря хранению данных в машиночитаемом виде, результаты работы метода можно использовать в последующем анализе. Примерами использования можно назвать различные подсчёты доступности объектов, качества среды. Для планирования и исследования дорожной инфраструктуры, быстрота выдачи и работы с методом позволяет провести быстрый анализ ситуации и точки дальнейшей работы. Поэтому данный метод может быть использован для экспресс-анализа профильными и непрофильными организациями.

Выполненное исследование и полученные результаты соответствуют направлению подготовки 27.04.07 Научноёмкие технологии и экономика инноваций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СП 42.13330.2016. ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. Планировка и застройка городских и сельских поселений. 2017. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14465/> (дата обращения: 28.12.2023).
2. Правила дорожного движения Российской Федерации. 2024. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/ (дата обращения: 25.12.2023)
3. Федеральное дорожное агентство ОДМ 218.2.020-2012: Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог / Федеральное дорожное агентство. URL: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/22-odm-2182020-2012.pdf?ysclid=ma170z8rqq96745923> (дата обращения: 28.02.2025).
4. Кандаурова Г.А. Прогнозирование и планирование экономики [текст]. Минск: Современная школа, 2005. 480 стр.
5. Ростат - Транспорт [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики: [сайт]. [2022]. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 22.12.2023).
6. Автотранспортное загрязнение придорожных территорий / В. П. Подольский, В. Г. Артюхов, В. С. Турбин, А. Н. Канищев. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 1999. – 264 стр. – ISBN 5-7455-1085-4. – EDN ZCFGGF.
7. Захаров, Н. С. Закономерности формирования количества легковых автомобилей на улично-дорожной сети города / Н. С. Захаров, Е. Ф. Бояркина. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2011. – 160 стр. – ISBN 978-5-9961-0468-0. – EDN SBVVHL.
8. Коляда М. Г., Бугаева Т. И. Педагогическое прогнозирование в компьютерных интеллектуальных системах. Учебное пособие. М.: ООО «Русайнс», 2015. 379 стр.
9. Ahmed M. S., Cook A. R. Analysis of freeway traffic time-series data by using Box – Jenkins techniques // Transportation Research Record. — 1979. — No. 722. — 116 стр.
10. Williams B. M., Hoel L. A. Modeling and Forecasting Vehicular Traffic Flow as a Seasonal ARIMA Process: Theoretical Basis and Empirical Results // Journal of Transportation Engineering. — 2003. — Vol. 129, No. 6. — стр. 664–672.
11. Davis G. A., Nihan N. L. Nonparametric regression and short-term freeway traffic forecasting. — 1991. — Vol. 117, No. 2. — стр. 178–188..

12. Castro-Neto M., Jeong Y. S., Jeong M. K. et al. Online-SVR for short-term traffic flow prediction under typical and atypical traffic conditions // Expert Systems with Applications. — 2009. — Vol. 36, No.3. — Part2. — стр. 6164 – 6173
13. Худяков, Г. Использование GPS-приемников в современных технологиях управления автотранспортом / Г. Худяков, К. Подушников // Беспроводные технологии. — 2014. — № 1(34). — стр. 74-76. — EDN RWWSRN.
14. Ligthill M.J. W.F.R.S. On kinetic waves II. A theory of traffic flow on crowded roads // Proc.of the Royal Society Ser.A., Vol. 229, No. 1178, 1995. стр. 317-345.
15. Мартынова И. В.Имитационное моделирование дорожного трафика с помощью сетей Петри / Мартынова И. В., Ершов, Н. М // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия «Естественные и инженерные науки». 34. 2. стр. 25-30.
16. Treiber, M. Explanation of observed features of self-organization in traffic flow [Текст] / M. Treiber, D. Helbing // Preprint cond-mat/9901239. — 1999.
17. Курц, В. В. Новые микроскопические модели автомобильного трафика / В. В. Курц, И. Е. Ануфриев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. — 2012. — № 4(158). — стр. 50-56. — EDN QAGCYB.
18. Потапова И. А., Бояршинова И. Н., Исмагилов Т. Р. Методы моделирования транспортного потока //Фундаментальные исследования. — 2016. — №. 10–2. — С. 338–342.
19. Буканов, Д. Ф. Моделирование и анализ транспортных потоков мегаполиса / Д. Ф. Буканов, Ю. В. Тышковская // Математическое моделирование и краевые задачи : Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием, Самара, 29–31 мая 2008 года / Редколлегия: В. П. Радченко (отв. редактор), О. А. Репин, Э. Я. Рапопорт, М. Н. Саушкин (отв. секретарь). Том Часть 2. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2008. — стр. 19–22. — EDN VSDZUR.
20. Швецов В. И. Математическое моделирование транспортных потоков //Автоматика и телемеханика. — 2003. — №. 11. — стр. 3–46
21. Двухстадийная модель равновесного распределения транспортных потоков / Т. С. Бабичева, А. В. Гасников, А. А. Лагуновская, М. А. Мендель // ТРУДЫ МФТИ. Труды Московского физико–технического института (национального исследовательского университета). — 2015. — Т. 7, № 3(27). — стр. 31–41. — EDN UNWYAF.

22. СП 396.1325800.2018. Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования. 2018. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/17951/> (дата обращения: 15.02.2025).

23. Федеральное дорожное агентство ОДМ 218.2.020-2012: Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог / Федеральное дорожное агентство. URL: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/22-odm-2182020-2012.pdf?ysclid=ma170z8rqq96745923> (дата обращения: 28.02.2025).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Листинг

```
import osm2geojson
import pandas as pd
import geopandas as gpd
import networkx as nx
import osmnx as ox
from shapely import from_wkt, Point, wkt, LineString, geometry
import momepy
import numpy as np
import random
from sklearn.neighbors import KDTree
from datetime import datetime
import json

#запись графа дорог в файл
def write_to_gdf(G, name, folder="scenario results/geolayers/", time=""):
    gdf_nodes, gdf_edges = ox.convert.graph_to_gdfs(G)
    if time != "":
        today_str = f"_{time}"
    gdf_edges.to_file(f"{folder}e_{name}{today_str}.geojson",
driver='GeoJSON')
    gdf_nodes.to_file(f"{folder}n_{name}{today_str}.geojson",
driver='GeoJSON')

# чтение из geojson файлов
def get_graph_from_gjson(filename):
    # загрузка GeoDataFrames из GeoJSON-файлов
    gdf_nodes = gpd.read_file(f'data/n_{filename}.geojson')
    gdf_edges = gpd.read_file(f'data/e_{filename}.geojson')

    # проверка и подготовка индексов (если нужно)
    if not isinstance(gdf_nodes.index.name, str) or gdf_nodes.index.name !=
'osmid':
        gdf_nodes = gdf_nodes.set_index('osmid')

    if not isinstance(gdf_edges.index, pd.MultiIndex):
        gdf_edges = gdf_edges.set_index(['u', 'v', 'key'])
```

```

# преобразование в граф
G = ox.convert.graph_from_gdfs(gdf_nodes, gdf_edges)

return G

# чтение из графа OSM
def get_graph_from_osm(city_osm_id):
    osm_id = "R" + city_osm_id
    territory = ox.geocode_to_gdf([osm_id], by_osmid=True)
    return ox.graph_from_polygon(territory.unary_union,
network_type='drive_service')

#расчёт пропускной способности относительно кол-ва полос
def get_capacity_by_lanes(lanes):
    capacity = ONE_CAPACITY * LANES_COEF[lanes] * lanes
    return capacity

def calculate_density_probabilities(coords, radius=0.01, min_prob=0.001):
    # Преобразуем координаты в numpy массив
    points = np.array(coords)

    # Построение KD-дерево для эффективного поиска соседей
    tree = KDTree(points)

    # Для каждой точки находится количество соседей в заданном радиусе
    counts = np.array([len(tree.query_radius([point], r=radius)[0]) for point
in points])

    # Добавление минимальную вероятность, чтобы избежать нулевых значений
    weights = counts + min_prob * len(coords)

    # Нормализация веса в вероятности (сумма = 1)
    probabilities = weights / weights.sum()

    return probabilities

```

```

def generate_random_points(original_points, probabilities, total_points):
    # Проверка входных данных
    if len(original_points) != len(probabilities):
        raise ValueError("Количество точек и вероятностей должно совпадать")
    if not np.isclose(sum(probabilities), 1.0):
        raise ValueError("Сумма вероятностей должна быть равна 1")

    # Генерация индексов исходных точек согласно вероятностям
    chosen_indices = np.random.choice(len(original_points),
size=total_points, p=probabilities)

    # Создание листа точек путешествий
    new_points = [original_points[i] for i in chosen_indices]

    return new_points

def get_route(G, origin_point, destination_point):
    # Нахождение ближайших узлов (nodes) к начальной и конечной точкам
    origin_node = ox.distance.nearest_nodes(G, origin_point['x'],
origin_point['y'])
    destination_node = ox.distance.nearest_nodes(G, destination_point['x'],
destination_point['y'])

    # Нахождение кратчайшего пути
    route = nx.shortest_path(G, origin_node, destination_node,
weight='length')
    return route

is_read_from_osm = False #флаг, указывающий на чтение из OSM по osm_id, иначе
из файлов связей и узлов в папке presets/{filename}.geojson
graph_name = "1111192" #Выкса из OSM
graph_name = "1_Base" #Выкса из файла (название файлов без n_e_ и .geojson).
Чтение из папки net

```



```

#кол-во маршрутов для генерации
AGENTS_COUNT = 6000

#значение пропускной способности для одной полосы движения
ONE_CAPACITY = 1000

#коэффициент изменения пропускной способности полосы, при общем кол-ве полос
в ребре
LANES_COEF = {
    1: 1.0,
    2: 0.95,
    3: 0.90,
    4: 0.86,
    5: 0.84,
}

today = datetime.now()
today = f"{today.day} {today.month} {today.year} - {today.hour}
{today.minute} {today.second}"
ox.plot_graph(routes_graph, edge_color='r', dpi=300, save=True,
filepath=f"{graph_name}-{today}.png", node_size=2)

# Добавление полей lanes
for u, v, data in routes_graph.edges(data=True):
    if 'lanes' in data:
        lanes = int(data['lanes'])
        data['lanes'] = lanes
        if lanes is None:
            data["lanes"] = 1
            print("denoning")
    else:
        lanes = 1
        data["lanes"] = lanes
        print ("add lanes")

oneway_routes_graph = routes_graph.copy()

```

```

rid = 0
for u, v, data in oneway_routes_graph.edges(data=True):
    #при наличии нескольких полос в ребре выбирает наименьшее
    lanes = data["lanes"]
    if isinstance(lanes, list):
        print ("list:", lanes)
        lanes = min(lanes)
        print ("one:", lanes)
    lanes = float(lanes)
    print (lanes)

    #добавление новых полей
    data["intensity"] = 0
    capacity = get_capacity_by_lanes(data["lanes"])
    data["capacity"] = capacity

#создание и заполнение массивов для id узлов и для координат узлов
nodes_id_list = []
nodes_coordinate_list = []
for _, data in oneway_routes_graph.nodes(data=True):
    nodes_id_list.append(_)
    nodes_coordinate_list.append((data['x'], data['y']))

probabilities = calculate_density_probabilities(nodes_coordinate_list)
print(f"Кол-во узлов: {len(nodes_id_list)}. Кол-во значений вероятностей {len(probabilities)}")

#генерация массивов начальных и конечных точек маршрутов
random_points_start = generate_random_points(nodes_id_list, probabilities,
AGENTS_COUNT)
random_points_end = generate_random_points(nodes_id_list, probabilities,
AGENTS_COUNT)

#соединение начальной и конечной точки маршрутов в пары

```

```

travels = [(random_points_start[node_i], random_points_end[node_i]) for
node_i in range(AGENTS_COUNT)]
count = 0

#создание временного графа для построения маршрута
G_routing = oneway_routes_graph.copy()
for points in travels:
    #построение маршрута по графу
    route = get_route(G_routing, G_routing.nodes[points[0]],
G_routing.nodes[points[1]])

    #перебор всех узлов, встречающихся на маршруте
    for end_node_i in range(1, len(route)):
        #узлы текущего ребра
        u = route[end_node_i - 1]
        v = route[end_node_i]

        #увеличение счётчика интенсивности
        G_routing[u][v][0]['intensity'] += 1
        oneway_routes_graph[u][v][0]['intensity'] += 1

        #расчёт LL текущего ребра
        load_level = 1.0 * G_routing[u][v][0]["intensity"] / G_routing[u][v]
[0]["capacity"]

        #удаление перегруженных ребёр из временно графа
        if load_level > 1:
            G_routing.remove_edge(u,v)
count += 1

#обработано маршрутов:
print(f"{count}/{AGENTS_COUNT}")

#генерации даты и времени создания файла
today = datetime.now()

```

```

today_str = f"{today.year}{today.month}{today.day}-{today.hour}-
{today.minute}-{today.second}"

#генерация картограммы
ox.plot_graph(oneway_routes_graph, edge_linewidth= [1.0 * data['intensity'] /
400 for u, v, data in oneway_routes_graph.edges(data=True)],
edge_color=[data['ll_color'] for u, v, data in
oneway_routes_graph.edges(data=True)], dpi=1800, save=True,
filepath=f"results/{graph_name}-load_level_{today_str}.png", node_size=0)

#генерация геослоёв
write_to_gdf(oneway_routes_graph, graph_name, "results/geo/", today_str)

```

Листинг 5 – Код разработанного метода