

На правах рукописи



Старожилец Всеволод Михайлович

**Мезоскопическое моделирование транспортных
потоков и управление въездами на основе данных из
разнородных источников**

Специальность 2.3.8 —
«Информатика и информационные процессы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Чехович Юрий Викторович

Официальные оппоненты: **Акопов Андраник Сумбатович**,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Центральный экономико-
математический институт РАН,
главный научный сотрудник

Таташев Александр Геннадьевич,
доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное об-
разовательное учреждение высшего образо-
вания «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
(МАДИ)»,
профессор

Ведущая организация: Автономная некоммерческая организация
высшего образования «Университет Иннопо-
лис»

Защита состоится «___» _____ 2026 г. в ____:____ на заседании
диссертационного совета 24.1.224.03 при Федеральном исследовательском
центре «Информатика и управление» Российской академии наук по адре-
су: 119333, Москва, ул. Вавилова, д.42.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального исследо-
вательского центра «Информатика и управление» Российской академии
наук и на сайте www.frccsc.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.224.03,
кандидат технических наук



Рейер И.А.

Общая характеристика работы

Работа посвящена мезоскопическому моделированию транспортных потоков в большой автомобильной сети с использованием данных из разнородных источников и групп автомобильно-транспортных средств (АТС).

Актуальность темы. Развитие современных технологий сбора и хранения данных, удешевление аппаратуры по видеофиксации, развитие технологий автоматизированного обнаружения нарушений правил дорожного движения (ПДД), а также сбор больших объемов данных о движении транспортных средств по автомобильно-транспортным сетям с помощью GPS и ГЛОНАСС навигаторов привело к значительному увеличению объёмов разнородных данных о движении автомобилей в транспортных сетях. Данная ситуация не только открыла для исследователей возможности по моделированию более крупных транспортных сетей, но и поставила новые задачи связанные с оптимизацией вычислительной сложности моделей.

Задача оптимизации транспортного потока становится всё более актуальной от года к году. Например, в отчётах¹ показана статистика по времени проводимому в пробках автомобилистами в разных странах/городах. Более того, в большинстве случаев данное время стабильно растёт каждый год, с просадкой во время карантина из-за эпидемии COVID19 в 2020 году, причём статистика, в некоторых случаях, ведётся более чем за 40 лет. Важно отметить, что в рамках существующей застройки расширение уже построенных дорог затруднительно, таким образом для уменьшения числа пробок остаются только методы локальной перестройки перекрестков, а также оптимизация работы светофоров. Также важным направлением моделирования является прогнозирование эффекта от строительства новых крупных торговых точек и жилых районов, вызывающее существенное перераспределение транспортных потоков в сети.

Статистика по числу собственных легковых автомобилей на 1000 человек населения по данным Росстата² показывает, что с начала 2000 года по конец 2024 данный показатель в России вырос более чем в 2,5 раза с 130,4 до 340, что естественным образом ухудшает ситуацию на дорогах страны. Для Москвы ситуация чуть лучше — рост с 189,1 до 276,2 автомобилей. Исследования Московской транспортной сети³ показывают относительно стабильные показатели средней загруженности по

¹INRIX. Global traffic scorecard. [Электронный ресурс]. URL: <https://inrix.com/scorecard/#city-ranking-list> (visited on 02/14/2026); TAMU. Congestion urban mobility report. [Электронный ресурс]. URL: <https://mobility.tamu.edu/umr/congestion-data/> (visited on 02/14/2026).

²Федеральная служба государственной статистики. Число собственных легковых автомобилей. [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Obesp_legk_avto_2024.xlsx (дата обр. 14.02.2026).

³Яндекс. Пробки в Москве: 2013–2017. [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/company/researches/2017/moscow_traffic_2017 (дата обр. 14.02.2026).

Москве за 2013-2017 год, однако, ситуация для различных автомагистралей города разнится. Приведённые данные косвенно подтверждают эффективность масштабной модернизации транспортных развязок на МКАДе, проводившийся в период с 2011 по 2016 год, а также работ по улучшению транспортной сети в целом, в том числе развития сетей общественного транспорта.

Эффективность моделирования транспортных сетей с целью оптимизации светофорного управления явно продемонстрирована в отчёте о проведении такой работы в городе Линкольн, Англия⁴. Приведены статистически данные о снижении потерь времени в пробках, а также рассчитаны финансовые показатели, в том числе соотношение выгоды и затрат реализованного решения.

Классические работы по моделированию транспортных потоков восходят к 50-ым годам прошлого века, когда наблюдалось бурное развитие газовой динамики. В модели Лайтхилла – Уизема – Ричардса (LWR)⁵ транспортный поток уподобляется потоку сжимаемой жидкости и описывается законом сохранения количества автомобилей. При этом в модели постулируется существование однозначной функциональной зависимости между величиной интенсивности транспортного потока автомобилей и его плотностью. Эту зависимость называют фундаментальной диаграммой.

Другим подходом к моделированию транспортных потоков является микроскопический подход в котором моделируется движение каждого транспортного средства в системе. Классическим примером такой модели является модель следования за лидером, где скорость каждого автомобиля рассчитывается в зависимости от характеристик впереди идущего АТС (лидера)⁶. В современных исследованиях также пытаются учесть разнородность транспортных средств в потоке АТС.

Работ по мезоскопическому подходу в моделировании транспортных потоков мало, и они достаточно различны чтобы выделить какое-либо направление развития в них. Из относительно современных подходов в мезоскопическом моделировании можно выделить⁷, где рассматривается

⁴Green Light Lincoln. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lincoln.ne.gov/files/sharedassets/public/v/1/ltu/transportation/traffic-engineering/green-light-lincoln/phase4-final-report.pdf> (visited on 02/14/2026).

⁵*Lighthill M. J., Whitham G. B.* On kinematic waves. II. A theory of traffic flow on long crowded roads [Текст] // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Т. 229. The Royal Society. 1955. С. 281–345.

⁶*Гасников А.* [и др.]. Введение в математическое моделирование транспортных потоков [Текст]. Litres, 2017.

⁷*Oskarbski J., Kaszubowski D.* Applying a mesoscopic transport model to analyse the effects of urban freight regulatory measures on transport emissions—an assessment [Текст] // Sustainability. 2018. Т. 10, № 7. С. 2515.

комбинация микро-, мезо- и макроскопических моделей для расчета выделения углекислого газа в атмосферу в транспортной сети, а также⁸, где мезоскопическая модель используется для моделирования пешеходного движения, однако в ней проводятся расчеты вычислительной сложности полученной модели и проводится сравнение зависимости вычислительных затрат относительно плотности потока пешеходов для рассматриваемой мезоскопической модели и выбранных микро- и макро- моделей.

Оптимизация пропускной способности именно выделенной автомагистрали на основе светофорного управления [1] не столь распространенная тема в моделировании транспортных потоков. Чаще рассматриваются задачи оптимального управления перекрестком где все дороги считаются равноправными⁹. В¹⁰ рассматривается задача управления въезда на автомагистраль с транспортными средствами с автоматическим управлением (Connected and Automated Vehicles) в качестве катализаторов движения. В работе¹¹ — задача адаптивного управления светофорами с целью увеличения эффективности управления по сравнению со стандартным и уменьшению времени, проведенного водителями в пути.

Отметим достоинства и недостатки вышеизложенных типов моделей. Микроскопические модели более вычислительно сложны ввиду необходимости расчётов движения каждого отдельного транспортного средства, однако позволяют более детально просчитывать перекрестки и проводить эксперименты с светофорным управлением въездами. Макроскопические модели, основанные на гидродинамике, наследуют их проблемы с существенно разрывными потоками, возникающими при моделировании светофорного управления в транспортных сетях, однако более вычислительно мощные и позволяют моделировать поведение автомобилей на магистралях большой протяженности при любой плотности АТС на ней. В мезоскопических моделях необходимо рассматривать подход каждого автора в отдельности так как всё зависит от принципов построения изложенной модели.

⁸ Tordeux A., Lämmel G., Hänseler F. S., Steffen B. A mesoscopic model for large-scale simulation of pedestrian dynamics [Текст] // Transportation research part C: emerging technologies. 2018. Т. 93. С. 128—147.

⁹ Mannion P., Duggan J., Howley E. An experimental review of reinforcement learning algorithms for adaptive traffic signal control [Текст] // Autonomic road transport support systems. Springer. 2016. С. 47—66.

¹⁰ Pang M., Huang J. Cooperative Control of Highway On-Ramp with Connected and Automated Vehicles as Platoons Based on Improved Variable Time Headway [Текст] // Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems. 2022. Т. 148, № 7. С. 04022034.

¹¹ Huang W., Hu Y., Zhang X. Enhancing Model-Based Anticipatory Traffic Signal Control with Metamodeling and Adaptive Optimization [Текст] // Mathematics. 2022. Т. 10, № 15. С. 2640.

Моделирование же крупных транспортных сетей на сегодняшний день представлено в¹² в виде примеров применения существующих программных пакетов, таких как SUMO (Simulation of Urban Mobility), iTETRIS (An Integrated Wireless and Traffic Platform for Real-Time Road Traffic Management Solutions) и др. Хотя детальное описание подхода к моделированию автомагистрали в данных пакетах зачастую отсутствует, большая часть таких программных пакетов использует микроскопический подход к моделированию транспортной сети¹³ ввиду простоты программной реализации таких подходов и необходимости в моделирования городской транспортной сети с большим числом перекрестков и светофоров.

В данной работе предлагается новый мезоскопический подход к моделированию транспортных потоков в транспортной сети высокой загрузки основанный на моделировании движения не каждого отдельного автомобиля, а движения групп автомобильно-транспортных средств. Для расчёта скорости каждой группы в каждый момент времени предлагается использовать фундаментальную диаграмму поток-плотность [4]. Построение фундаментальной диаграммы на каждом сегменте транспортной сети производится на основе комплексирования данных с дорожных датчиков и GPS-треков. Восстановление данных с GPS-треков с помощью имеющихся данных с дорожных датчиков необходимо ввиду того, что данные с GPS-треков фиксируют только долю от реального числа проезжающих автомобилей.

Целью данной работы является разработка мезоскопической модели транспортных потоков на основе комплексированных данных с дорожных датчиков и GPS-треков пригодной для моделирования транспортной сети, а также проверка гипотез о сценариях увеличения пропускной способности транспортных сетей большого масштаба.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Идентификация модели с использованием данных с GPS-треков и дорожных датчиков;
2. Построение фундаментальных диаграмм поток-плотность для всех сегментов транспортной сети на основе данных с дорожных датчиков и GPS-треков;
3. Разработка мезоскопической модели транспортных потоков и показать ее состоятельность;

¹²Asano Y., Ito N., Inaoka H., Imai T., Uchitane T. Traffic simulation of Kobe-city [Текст] // Proceedings of the international conference on social modeling and simulation, plus Econophysics Colloquium 2014. Springer, Cham. 2015. С. 255–264.

¹³Ratrouf N. T., Rahman S. M. A comparative analysis of currently used microscopic and macroscopic traffic simulation software [Текст] // The Arabian Journal for Science and Engineering. 2009. Т. 34, 1В. С. 121–133.

4. Проведение моделирования существующей автомагистрали и показать теоретическую возможность повышения ее пропускной способности с помощью адаптивного управления;
5. Проведение сравнения с классической моделью транспортных потоков.

Научная новизна:

1. Впервые была построена мезоскопическая модель на основе групп АТС с использованием фундаментальной диаграммы поток-плотность на основе комплексированных данных;
2. Проведено исследование на адекватность моделирования на модельных и реальных данных;
3. Было выполнено оригинальное исследование о применимости предложенной модели к адаптивному управлению выделенной автомагистрали с целью потенциального увеличения её пропускной способности.

Практическая значимость Разработанная модель позволяет проводить сценарное моделирование масштабных транспортных сетей с использованием разнородных источников данных.

Методология и методы исследования. Экспериментальное исследование проводилось с использованием программно-алгоритмического комплекса, разработанного автором.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Мезоскопическая математическая модель транспортных потоков на основе групп АТС с использованием фундаментальных диаграмм поток-плотность для расчёта скорости автомобилей;
2. Методика идентификации модели на основе комплексирования разнородных данных;
3. Подтверждение работоспособности модели путём моделирования всевозможных базовых конфигураций дорожной сети;
4. Подтверждение вычислительной эффективности модели для моделирования движения автомобилей по транспортным сетям большого масштаба.

Достоверность полученных результатов обеспечивается математической точностью изложенных алгоритмов и описаниями проведённых экспериментов, допускающими их воспроизводимость. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. 11-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации», 2016
2. 18-я Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов», 2017

3. 19-я Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов», 2019
4. XXVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», 2020
5. 13-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации», 2020
6. XXVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», 2021
7. 20-я Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов», 2021
8. 21-я Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов», 2023

Личный вклад. Личный вклад диссертанта в работы [1; 4], выполненные с соавторами заключался в разработке алгоритмов автоматического построения фундаментальной диаграммы потока на основе данных с дорожных датчиков и GPS-треков.

В работах [13; 14; 2; 3] личный вклад диссертанта является ключевым, и заключался в постановке задач, разработке подходов к их решению и конкретной реализации данных подходов. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Личный вклад автора состоял в разработке методов и алгоритмов, проведении вычислительных экспериментов, сборе и обработке необходимых исходных данных в т.ч. собранных посредством видео-фиксации транспортного потока.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 8 — в тезисах докладов.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. В последующих главах сначала приводятся общие сведения о математических моделях транспортных потоков, потом описываются процедуры необходимые для построения фундаментальной диаграммы поток-плотность $Q(\rho)$ необходимой для предлагаемой автором модели, а также процедура восстановления числа проехавших по автомагистрали автомобильно-транспортных средств (АТС) на основе данных с GPS-треков и дорожных датчиков. В дальнейшем приводится полное математическое описание разработанной мезоскопической модели транспортных потоков, а также вычислительные эксперименты с её

использованием как на небольших участках автомагистрали, так и при моделировании целого МКАД. Отдельно проводится сравнение результатов и скорости моделирования МКАД предложенной мезоскопической моделью и классической моделью разумного водителя.

Первая глава посвящена истории развития моделирования транспортных потоков, а также краткой сводке о современных подходах к моделированию. Описываются два основных подхода к моделированию: микроскопические и макроскопические модели. Показано различие между ними. Приведены примеры мезоскопических моделей, к которым также относится предлагаемая автором модель, показано отличие мезоскопических моделей от двух основных направлений моделирования. Кратко описана теория трёх фаз Кернера.

Вторая глава посвящена процедуре построения фундаментальной диаграммы поток-плотность $Q(\rho)$ на основе комплексированных данных с дорожных датчиков и GPS-треков. Приведённый алгоритм предполагает минимальное вмешательство специалиста по анализу данных, позволяя, таким образом, в автоматизированном режиме получить фундаментальные диаграммы для произвольных сегментов транспортной сети с высокой скоростью, что необходимо для инициализации рассмотренной в работе мезоскопической модели.

Искомая функциональная зависимость $Q(\rho)$ изображена синей огибающей кривой на рис. 1, где облако точек — исходные реальные данные.

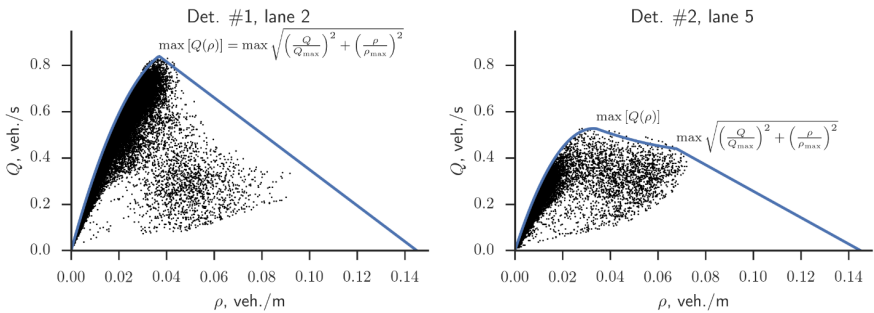


Рис. 1 — Фундаментальные диаграммы для двух разных участков МКАД. Слева для данных со второй полосы (детектор № 1), справа с пятой полосы (детектор №2)

Алгоритм автоматизированного поиска функциональной зависимости сводится к следующим шагам:

1. Для каждого участка автомагистрали извлекаются данные измерений плотности и потока за наблюдаемый период времени.

Каждая точка на диаграмме определяется парой значений плотность-поток, на плоскости.

2. Отбрасываются экстремальные значения с использованием алгоритма построения альфа-оболочек. Сначала, данные масштабируются вдоль осей Q и ρ , для получения одинакового порядка величин. Затем, по результирующим точкам строится альфа-оболочка¹⁴, и удаляются точки, попавшие на оболочку¹⁵. Процесс повторяется до тех пор, пока разница в площади оболочек между соседними итерациями составит менее 5%, либо пока не останется менее 90% начальных точек.
3. Среди измерений вычисляется максимальный поток $Q_1(\rho_1) = \max_{\rho}[Q(\rho)]$ и его плотность ρ_1 , которая является критической, поскольку при её прохождении обычно интенсивность транспортного потока заметно падает.
4. Рассчитывается максимальное значение интенсивности $Q_0(\rho_0) = \max_Q[Q(\rho_1/2)]$ для значения плотности $\rho_0 = \rho_1/2$.
5. Проводится поиск среди измерений точки, максимально удалённой от начала координат на плоскости $Q(\rho)$: $\max \sqrt{(Q/Q_{max})^2 + (\rho/\rho_{max})^2}$ и соответствующей ей плотности ρ_2 .
6. Используя знания геометрии дороги, определяется максимально возможная плотность ρ_* , как произведение количества линий на дороге на значение 0.15 АТС/м, исходя из известной оценки, что при количестве АТС больше 150 на один километр движение транспорта становится невозможным.
7. На основе полученных данных строится функциональная зависимость $Q(\rho)$.

Искомую функциональную зависимость ищем как кусочно-гладкую функцию, где свободному и синхронизированному потоку соответствует квадратичная функция, заторному — линейная.

1. Свободный поток $Q(\rho) = \alpha_2 \rho^2 + \alpha_1 \rho$, $0 \leq \rho \leq \rho_1$
2. Синхронизованный поток $Q(\rho) = \beta_2 \rho^2 + \beta_1 \rho + \beta_0$, $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$
3. Заторный поток $Q(\rho) = c_*(\rho_* - \rho)$, $\rho_2 \leq \rho \leq \rho_*$

Подставляя известные значения из алгоритма выше, получаем систему уравнений на неизвестные члены искомой кусочно-гладкой зависимости,

¹⁴Edelsbrunner H., Kirkpatrick D. G., Seidel R. On the shape of a set of points in the plane [Текст] // Information Theory, IEEE Transactions on. 1983. Т. 29, № 4. С. 551—559.

¹⁵Eddy W., Convex Hull Peeling C. 5th Symposium held at Toulouse 1982 [Текст] // Physica-Verlag. 1982. С. 42—47.

В виде:

$$\begin{cases} \alpha_2 \rho_0^2 + \alpha_1 \rho_0 = Q(\rho_0) \\ \alpha_2 \rho_1^2 + \alpha_1 \rho_1 = Q(\rho_1) \\ \beta_2 \rho_1^2 + \beta_1 \rho_1 + \beta_0 = Q(\rho_1) \\ \beta_2 \rho_2^2 + \beta_1 \rho_2 + \beta_0 = Q(\rho_2) \\ 2\beta_2 \rho_1 + \beta_1 = c_1 = \left. \frac{\partial Q(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_1} \\ c_*(\rho_* - \rho_2) = Q(\rho_2) \end{cases}$$

В приведённой выше системе уравнений неизвестно значение производной функции после прохождения критической точки: $\left. \frac{\partial Q(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_1} = c_1 = ?$. Данное значение равно скорости волны торможения, и рассчитывается на основе реальных данных. На рисунке 2 хорошо видно распространение волны торможения в виде красных наклонных линий. Искомая скорость волны торможения для МКАД: -15.8 [км/ч], что очень близко к скорости приводимой Кернером в его работах как скорость «заднего фронта широко движущегося кластера»: $v_g \approx -15$ [км/ч].

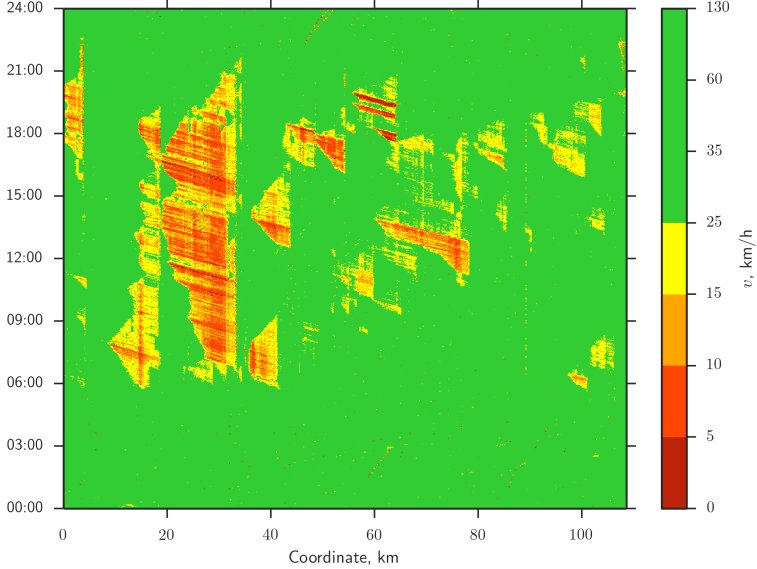


Рис. 2 — Пространственно-временная структура значений скорости транспортного потока на внешней стороне МКАД за один день.

Третья глава посвящена восстановлению числа проехавших по магистрали АТС на основе данных с GPS-треков. Поскольку GPS-треки фиксируют только малую часть автомобилей проехавших по рассматриваемому сегменту автомагистрали, то необходим алгоритм получения реального числа автомобилей и их скорости в каждый момент времени на основе этих данных. В данной главе поставлена задача восстановления данных в двух вариантах — на самой автомагистрали и на въездах и съездах с нее, приведены варианты алгоритмов для её решения, а также поставлены вычислительные эксперименты, показывающие применимость предложенных алгоритмов к поставленной задаче.

Окончательно, число проехавших по автомагистрали автомобилей ищется в виде:

$$f(a|N_{\text{track},i}, V_{\text{est},i}) = a_0 + a_1 N_{\text{track},i} + a_2 \log(N_{\text{track},i}) + a_3 V_{\text{est},i} + a_4 N_{\text{track},i}/V_{\text{est},i} \quad (1)$$

Причём скорость движения трековых автомобилей также не соответствует реальной средней скорости потока, что приводит к необходимости восстановления и её тоже в виде:

$$V_{\text{est}} = b_1 + b_2 V_{\text{track}},$$

Пример восстановленных данных приведен на рис. 3, визуально видно, что восстановление реальной скорости потока уменьшает ошибку при большой плотности АТС, среднеквадратичная ошибка без использования преобразования скорости: 4.2%, с использованием: 3%.

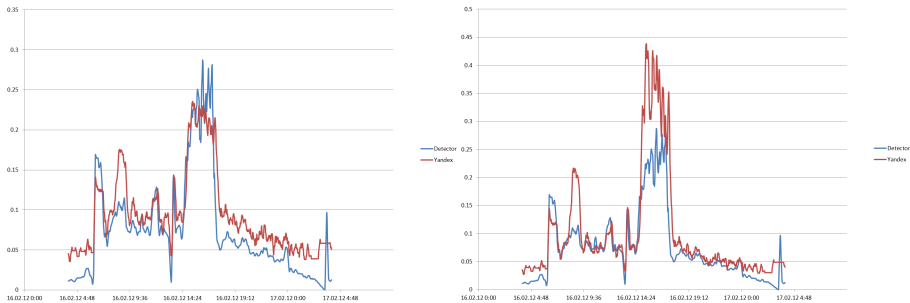


Рис. 3 — Графики полученных с помощью моделей плотностей в случае с использованием модели для скорости (слева) и без (справа).

Процедура восстановления числа АТС на въездах и съездах показывает недостаточность исходных данных для такой задачи, ввиду крайне низкого числа трековых АТС.

В **четвертой главе** приведено описание предложенной автором мезоскопической модели транспортных потоков пригодной к моделированию

транспортных сетей большого масштаба с сильно разрывными потоками. Приведены внешние и внутренние свойства модели, а также все необходимые алгоритмы расчётов для перехода между состояниями системы в моменты времени t и $t + 1$.

Транспортная сеть в предлагаемой модели представляет собой связанный ориентированный граф $\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$, где $\mathbf{V}$ — множество вершин, $\mathbf{E} = \{(i, j)\}$ — множество рёбер графа.

Причём на степень вершин графа $d(i)$ накладываются следующие ограничения:

- $\min(d(i)) = 1$,
- $\max(d(i)) = 3$,
- $\forall i : d(i) > 1 \rightarrow \exists j, l \in \mathbf{V} : (j, i), (i, l) \in \mathbf{E}$;

Вводится понятие группы автомобильно-транспортных средств (АТС). Свойства группы АТС на ребре $(i, j) : \mathbf{A}_k^t = \{\text{Pos}_k, V_k, N_k\}$:

1. Pos_k — позиция начала группы относительно начала ребра, на котором она расположена,
2. V_k — скорость группы АТС, рассчитывается на основе плотности АТС на ребре автомагистрали и соответствующей фундаментальной диаграммы поток-плотность,
3. N_k — размер группы АТС из $\mathbb{R}_{\geq 0} = \mathbb{R}_+$;

Пусть теперь $\mathbf{A}_{i,j}^t = \{\mathbf{A}_k^t\}$ — упорядоченное множество автомобильных групп на ребре (i, j) . Причем $\forall l, m : l < m \rightarrow \text{Pos}_l > \text{Pos}_m$ — группы не могут обгонять друг друга.

Таким образом, вводится состояние системы в момент времени t как $\mathbf{A}^t = \{\mathbf{A}_{i,j}^t\} \cup \{\mathbf{A}_{\text{out},i,j}^t\}$, т.е. положение, скорость, размер и тип всех автомобильных групп на всех ребрах дорожно-транспортной сети. Группы АТС $\{\mathbf{A}_{\text{out},i,j}^t\}$ представляют собой специальные группы-буферы транспортных средств съезжающих с автомагистрали.

Перечислим все внешние параметры модели для каждого ребра $(i, j) \in \mathbf{E}$ графа $\mathbf{G}$:

1. Длина ребра $l_{i,j}$.
2. Число полос, по которым разрешено движение автомобилей по данному ребру $n_{i,j}$.
3. $I_{i,j} = \{0, 1\}$ — идентификатор того, является ребро съездом или нет. Если является, то $I_{i,j} = 1$.
4. Функция скорости для данного ребра $V = f_{i,j}(\rho)$, $f_{i,j} : \mathbb{Q}_+ \rightarrow \mathbb{Q}_+$, где $\rho \in \mathbb{R}_+$ — плотность АТС. В данной работе рассматриваются только ограниченные, непрерывные, монотонно убывающие функции скорости.
5. Матрица перемешивания в узле j в момент времени t , задаваемая функцией $M_j(t)$.

6. Интенсивность источника в узле i в момент времени t , задаваемая функцией $F_i(t)$. Для всех i не являющихся узлами-источниками: $\forall t : F_i(t) = 0$.

Размер группы АТС рассчитывается в соответствии с динамическими размерами автомобилей, входящих в группу: $L = L_{\text{avg}} + a \cdot V$. В данной формуле могут быть также квадратичные члены которые соответствуют различным неблагоприятным погодным условиям и в данной работе не рассматриваются. Таким образом $L_{\text{group}} = \frac{N_k * L}{n_{i,j}}$.

Для перехода от состояния системы $\mathbf{A}^t$ к состоянию $\mathbf{A}^{t+1}$ необходимы следующие алгоритмы:

- Движения групп АТС по ребру;
- Объединения двух групп АТС;
- Перемещения групп АТС между рёбрами;
- Расчёта потенциала трансфера между рёбрами.

Где потенциал трансфера — величина, для каждой пары рёбер (i, j) , (j, k) задающая максимальное возможное число автомобилей, которые могут между ними переехать за время τ — временной шаг моделирования.

Приведённый в работе расчётный цикл для перехода от состояния системы $\mathbf{A}^t$ к состоянию $\mathbf{A}^{t+1}$ сводится к следующим шагам:

1. Генерация АТС всеми источниками в модели;
2. Движение групп АТС на всех сегментах автомагистрали в порядке удалённости от конца магистрали, в рамках которого используются все вышеперечисленные алгоритмы;
3. Очистка всех ребер-стоков в модели от транспортных средств.

Где рёбра-стоки представляют из себя рёбра, инцидентные вершинам-стокам, задаваемым на этапе инициализации модели. Далее приведено краткое описание работы всех необходимых алгоритмов.

Алгоритмы. Движение групп АТС по ребру.

Входные данные: $\mathbf{A}_{i,j}^t$ — множество характеристик автомобильных групп на ребре, k — индекс рассматриваемой автомобильной группы, (i, j) — рассматриваемое ребро графа, τ — временной шаг, t — текущий момент времени.

1. Для выбранной группы АТС $\mathbf{A}_k^t$ на ребре (i, j) рассчитывается её скорость V'_k на основе плотности автомобилей на участке автодороги перед ней;
2. Рассчитывается новое положение группы АТС;
3. Если группа оказалась в конце ребра, то:
 - рассчитывается сколько времени она ехала до конца ребра;
 - в соответствии с матрицей перемешивания часть группы добавляется в буфер-группу $A_{\text{out},i,j}^t$;
 - оставшаяся часть группы $\mathbf{A}_k^t$ переезжает на следующее для неё ребро с $I_{j,m_1} = 0$;

- группа-буфер $A_{\text{out},i,j}^t$ переезжает на следующее для неё ребро с $I_{j,m_1} = 1$.

Алгоритмы. Объединение двух групп АТС.

Require: $\mathbf{A}_{i,j}^t$ — множество характеристик автомобильных групп на ребре;

k — индекс рассматриваемой автомобильной группы;

(i,j) — рассматриваемое ребро графа;

t — текущий момент времени;

if $k = 0$ **then**

Группу не с чем объединять так как она самая первая

else

if $\text{Pos}_{k-1} - \text{Pos}_k \leq L_{\text{car}}(V_{k-1}) \cdot N_{k-1}$ и $N_{k-1} + N_k \leq N_{\text{max}}$ **then**

Группы объединяются в одну

if $k - 1 = 0$ и $\text{Pos}(k - 1) = l_{i,j}$ **then**

$$N_{\text{exit}}^j + = N_k \cdot M_j(t)$$

$$N_{k-1} + = N_k \cdot (1 - M_j(t))$$

else

$$N_{k-1} + = N_k$$

del $\mathbf{A}_k^t$ — группа k удаляется

Алгоритмы. Перемещение групп АТС между рёбрами.

Входные данные: $\mathbf{A}_{i,j}^t$ — состояние системы в текущий момент времени, $\mathbf{A}^{t-1}$ — состояние системы в предыдущий момент времени, k — индекс рассматриваемой автомобильной группы, (i,j) — ребро с которого съезжает группа АТС, (j,j') — ребро на которое съезжает группа АТС, τ — временной шаг, t — текущий момент времени.

1. Определяется индекс новой группы АТС на ребре (j,j') .
2. Определяется, может ли группа переехать на новое ребро полностью. Если да:
 - Создается новая группа АТС в конце ребра (j,j') с $N_{k'} = N_k$.
 - Удаляется группа k из $\mathbf{A}_{i,j}^t$.
3. Если нет:
 - Создается новая группа АТС в конце ребра (j,j') с $N_{k'} = N'$, где N' — число АТС которые могут переехать.
 - Размер группы k уменьшается на величину N' .
4. Вызывается функция для перемещения новой группы по ребру (j,j') .

Алгоритмы. Расчёт потенциала трансфера между рёбрами.

Входные данные: $\mathbf{A}^t$ — состояние системы в текущий момент времени, $\mathbf{A}^{t-1}$ — состояние системы в предыдущий момент времени, (j,k) — ребро для которой проводится расчет, τ — временной шаг.

Алгоритм рассчитывает все потенциалы трансфера $\forall i : (i, j) \in \mathbf{E} \rightarrow \text{Tr}_{i,j}^k$. То есть, для ребра (j, k) рассчитываются всевозможные $\text{Tr}_{i,j}^k$.

В процессе расчёта также используются величины $Q_{i,j} = \max(\rho \cdot f_{i,j}(\rho))$ — максимальный поток АТС на ребре (i, j) , $N_{\max}^{i,j}$ — максимальное число АТС на ребре (i, j) и $N_{i,j}^t = \sum_{m=0}^{\text{len}(\mathbf{A}_{i,j}^t)} N_m$ — текущее число АТС на ребре (i, j) .

Процедура расчета сводится к определению следующих величин:

1. P_i — потенциальное количество АТС, которые могут доехать до конца ребра (i, j) предшествующей (j, k) ;
2. N_{total} — сколько всего АТС может переехать на ребро (j, k) на основании его вместимости и максимального потока на нём.

Число АТС, которые могут переехать с ребра (i, j) на ребро (j, k) , определяется формулой: $N_{\text{total}} \cdot \frac{P_i}{\sum P_i}$.

В пятой главе проведены вычислительные эксперименты на элементарных сегментах автомагистралей с целью проверки работоспособности модели и адекватности полученных расчётов. Проверяется способность модели моделировать волну торможения, а также адекватность поведения модели при моделировании всевозможных допустимых конфигураций транспортной сети. Ниже, на рис. 4 и рис. 5, приведены полученные в рамках экспериментов тепловые карты, где по оси x — положение относительно начала автомагистрали, по оси y — время, цвет соответствует числу АТС на рассматриваемом сегменте дороги.

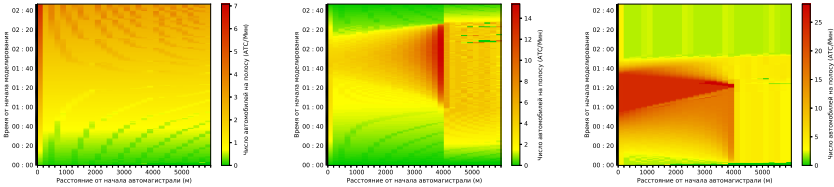


Рис. 4 — Слева-направо: эксперимент с простой дорогой без въездов и съездов, эксперимент с сужающейся дорогой и синусоидальным потоком АТС на въезде, эксперимент с пропадающим сужением.

В шестой главе изложены результаты полного моделирования одной стороны МКАД в течении одного дня на синтетических данных. Ввиду отсутствия реальных данных на всех въездах на автомагистраль, было принято решение моделировать МКАД с помощью модельных данных, основанных на реальной информации с имеющихся дорожных датчиков на въездах, а также информации от ЦОДД о числе проезжающих по рассматриваемой магистрали автомобилях за день. Данные с реального датчика, а также синтетические данные приведены на рис. 6.

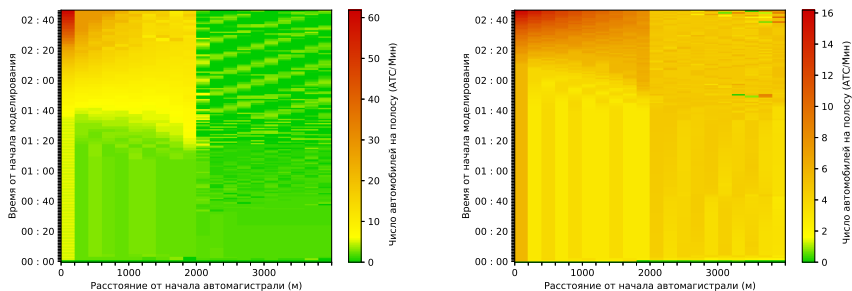


Рис. 5 — Слева-направо: эксперимент со съездом и нарастающим потоком на него, эксперимент с въездом на автомагистраль с нарастающим потоком АТС на нём.

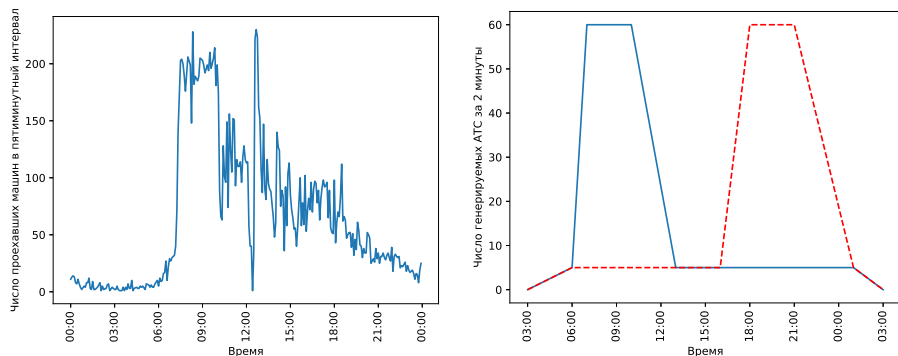


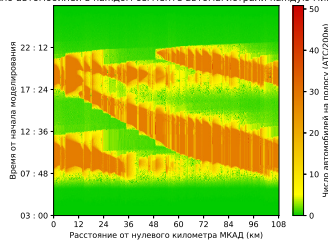
Рис. 6 — Данные с дорожного датчика (слева) с пиковой нагрузкой 45 АТС/мин в 8:20 и графики загрузки двух типов въездов — с утренней и вечерней пиковыми нагрузками (справа)

Проведены расчеты числа проезжающих по МКАД в рамках моделирования автомобилей за день с и без управления въездами. Пример результатов данных расчётов виден на рис. 7.

Также показана эффективность управления въездами с точки зрения времени проезда и числа проезжающих автомобилей по выделенной автомагистрали. Графики суммарно въехавших на МКАД автомобилей без и с управлением въездами приведены на рис. 8. В данном вычислительном эксперименте управление въездами увеличивает число проехавших по МКАД автомобилей за день на 44 тысячи.

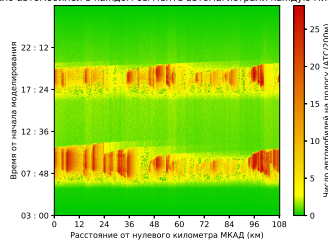
Отдельно проведено сравнение результатов моделирования при расчёте всех фундаментальных диаграмм поток-плотность для всех сегментов автомагистрали и при использовании одной диаграммы для всего МКАД.

Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту



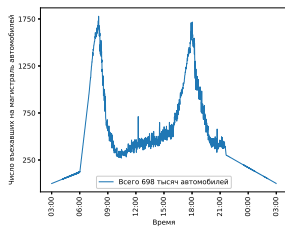
а) Без управления въездами

Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту

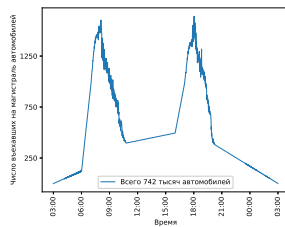


б) С управлением въездами

Рис. 7 — Количество автомобилей на 200 метров в модели транспортной сети МКАД за день



а) Без управления въездами



б) С управлением въездами

Рис. 8 — Графики суммарно въехавшего на МКАД со всех въездов числа автомобилей

Седьмая глава посвящена сравнению результатов предложенной мезоскопической модели с классической микроскопической моделью разумного водителя. Сравнение проводится в первую очередь с точки зрения точности определения режима автомагистрали (свободный, синхронизированный или плотный поток), а также времени, затраченного на вычисления.

Приведем пример результатов моделирования небольшого (2.5 км) участка автомагистрали между двумя дорожными датчиками на рис. 9. Ошибка предложенной модели 5.35%, ошибка модели разумного водителя 5.6%.

На рис. 10 приведены результаты экспериментов по времени моделирования различными моделями. В обоих экспериментах моделируется выделенный сегмент автомагистрали в течении одного дня. На изображении слева проведено моделирование при различных значениях АТС на въезде в диапазоне от 5 до 48 АТС/мин. На изображении справа поток АТС фиксированный, а длина моделируемого сегмента автомагистрали принимает значения от 500 до 5000 метров.

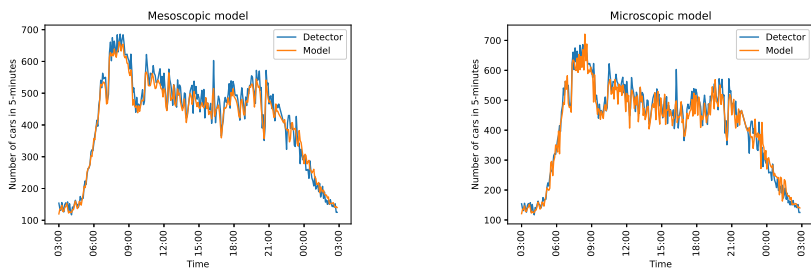


Рис. 9 — Результаты моделирования участка автомагистрали мезоскопической моделью (слева) и моделью разумного водителя (справа)

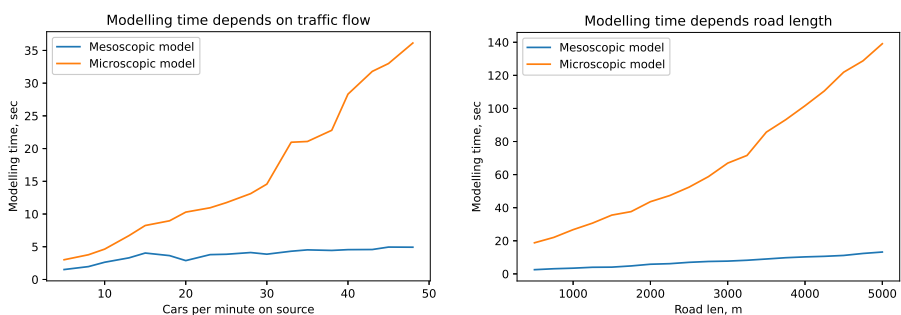


Рис. 10 — Исследование времени моделирования в зависимости от потока АТС на въезде с длиной дороги 2.5 километра (слева) и в зависимости от длины моделируемого участка при входном потоке 45 АТС/мин (справа)

Явно видно, что время затрачиваемое на расчёты предлагаемой мезоскопической моделью растёт незначительно как при увеличении размеров моделируемого участка, так и при повышении числа АТС.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработана мезоскопическая модель транспортных потоков на основе групп АТС с идентификацией с использованием комплексированных данных с GPS-треков и дорожных датчиков;
2. Проведены вычислительные эксперименты подтверждающие адекватность и работоспособность изложенной модели;
3. Проведены эксперименты по адаптивному управлению въездами на МКАД с помощью построенной модели, рассмотрены различные варианты идентификации модели — с использованием одной фундаментальной диаграммы поток-плотность для всей автомагистрали, и с использованием всех необходимых фундаментальных диаграмм, показана эффективность светофорного управления выделенной автомагистрали;
4. Подтверждена вычислительная эффективность модели, проведено сравнение с моделью разумного водителя по критериям точности и времени моделирования.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

1. *Alekseenko A., Kholodov Y., Kholodov A., Starozhilets V., Chekhovich Y.* Adaptive traffic light control on highway entrances [Текст] // Proceedings of the 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). — 2017. — (Scopus).
2. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Об одном подходе к статистическому моделированию транспортных потоков [Текст] // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2021. — Т. 61, № 7. — С. 1220—1232. — (БАК, Scopus).
3. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Об одном подходе к статистическому моделированию транспортных потоков на МКАД и управлению въездами [Текст] // Автоматика и телемеханика. — 2021. — № 11. — С. 114—134. — (БАК, Scopus).

В изданиях из списка ВАК РФ

4. *Алексеев А. Е., Холодов Я. А., Холодов А. С., Горева А. И., Васильев М. О., Чехович Ю. В., Мишин В. Д., Старожилец В. М.* Разработка, калибровка и верификация модели движения трафика в городских условиях. Часть I [Текст] // Компьютерные исследования и моделирование. — 2015. — Т. 7, № 6. — С. 1185—1203. — (БАК).

В сборниках трудов конференций

5. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Влияние управления въездами на автомагистраль на примере статистического моделирования транспортных потоков на МКАД [Электронный ресурс]. — 2021. — URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/index_2.htm.
6. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Использование мезоскопической модели для моделирования транспортных потоков на МКАД и управления въездами [Текст] // Математические методы распознавания образов. 20-я Всероссийская конференция с международным участием. — 2021. — С. 389—392.
7. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Комплексирование данных из разнородных источников в задачах моделирования транспортных потоков [Текст] // Интеллектуализация обработки информации ИОИ-2016. Тезисы докладов 11-й Международной конференции. — 2016. — С. 206—207.
8. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Об идентификации статистической модели транспортных потоков с использованием групп АТС [Текст] // Математические методы распознавания образов ММРО-2017. Тезисы докладов 18-й Всероссийской конференции с международным участием. — 2017. — С. 72—73.
9. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Об одном подходе к статистическому моделированию транспортных потоков на МКАД и управлению въездами [Текст] // Интеллектуализация обработки информации. 13-я Международная конференция. — 2020. — С. 277—280.
10. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Об одном подходе к статистическому моделированию транспортных потоков [Текст] // Математические методы распознавания образов. 19-я Всероссийская конференция с международным участием. — 2019. — С. 321—324.
11. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Статистическое моделирование движения транспортных средств по магистрали с управляемым въездом [Электронный ресурс]. — 2020. — URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2020/index.htm.
12. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Экспериментальная проверка вычислительной эффективности одной модели транспортных потоков [Текст] // Математические методы распознавания образов. 21-я Всероссийская конференция с международным участием. — 2023. — С. 60—62.

В прочих изданиях

13. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Комплексирование данных из разнородных источников в задачах моделирования транспортных потоков [Текст] // Машинное обучение и анализ данных. — 2016. — Т. 2, № 3. — С. 260—275.
14. *Старожилец В. М., Чехович Ю. В.* Об идентификации статистической модели транспортных потоков с использованием групп автомобильно-транспортных средств [Текст] // Машинное обучение и анализ данных. — 2017. — Т. 3, № 3. — С. 193—202.