

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 Иннополис»

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](http://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 отчётах<sup>1</sup> 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 Росстата<sup>2</sup> 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 сети<sup>3</sup> показывают относительно стабильные показатели средней загруженности по

---

<sup>1</sup>INRIX. 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).

<sup>2</sup>Федеральная служба государственной статистики. Число собственных легковых автомобилей. [Электронный ресурс]. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Obesp\\_legk\\_avto\\_2024.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Obesp_legk_avto_2024.xlsx) (дата обр. 14.02.2026).

<sup>3</sup>Яндекс. Пробки в Москве: 2013–2017. [Электронный ресурс]. URL: [https://yandex.ru/company/researches/2017/moscow\\_traffic\\_2017](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, Англия<sup>4</sup>. 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)<sup>5</sup> 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 впередиидущего АТС (лидера)<sup>6</sup>. 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 выделить<sup>7</sup>, где рассматривается

---

<sup>4</sup>Green 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).

<sup>5</sup>*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.

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

<sup>7</sup>*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 также<sup>8</sup>, 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 равноправными<sup>9</sup>. В<sup>10</sup> рассматривается задача управления въезда на автомагистраль с транспортными средствами с автоматическим управлением (Connected and Automated Vehicles) в качестве катализаторов движения. В работе<sup>11</sup> — 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 авто-ра в отдельности так как всё зависит от принципов построения изложенной модели.

---

<sup>8</sup> 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.

<sup>9</sup> 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.

<sup>10</sup> 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.

<sup>11</sup> 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 в<sup>12</sup> 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 сети<sup>13</sup> 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 загруженности 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;

---

<sup>12</sup>Asano 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.

<sup>13</sup>Ratrouf 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.

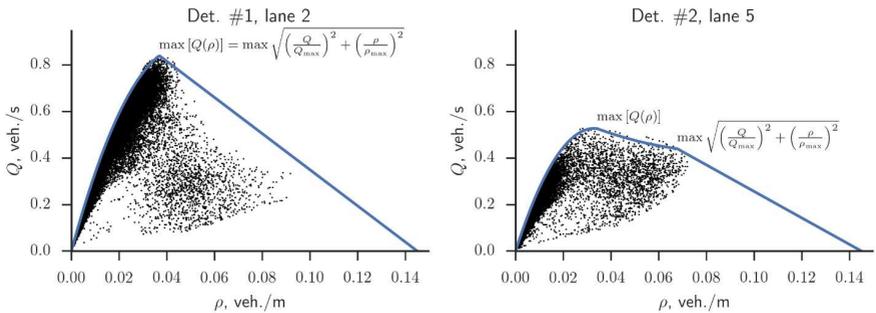


Рис. 1 — Фундаментальные диаграммы для двух разных участков МКАД. Слева для данных со второй полосы (детектор № 1), справа с пятой полосы (детектор №2)

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  $\rho$ , для получения одинакового порядка величин. Затем, по результирующим точкам строится альфа-оболочка<sup>14</sup>, и удаляются точки, попавшие на оболочку<sup>15</sup>. 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  $\rho_1$ , 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  $\rho_2$ .
6. Используя знания геометрии дороги, определяется максимально возможная плотность  $\rho_*$ , 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. Синхронизированный 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,

<sup>14</sup>Edelsbrunner 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.

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

в виде:

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

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].

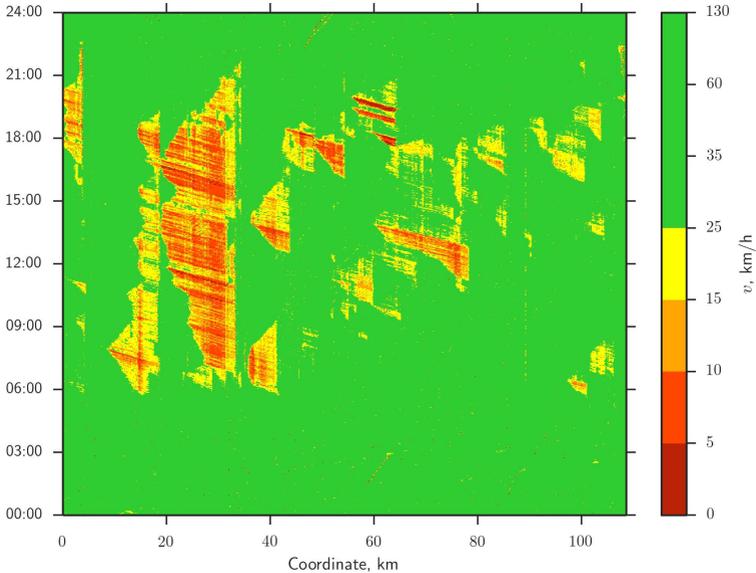


Рис. 2 — Пространственно-временная структура значений скорости транспортного потока на внешней стороне МКАД за один день.

**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:

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

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%.

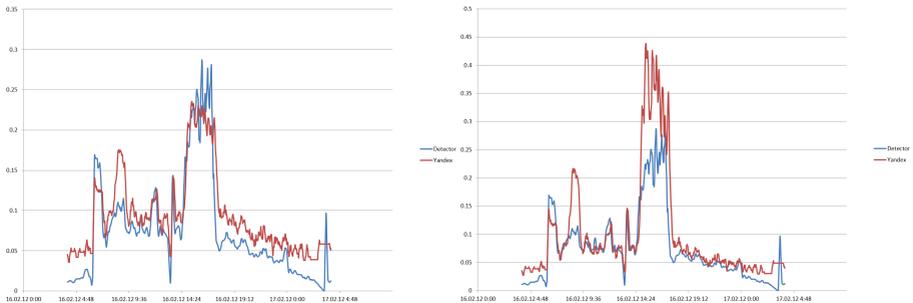


Рис. 3 — Графики полученных с помощью моделей плотностей в случае с использованием модели для скорости (слева) и без (справа).

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.  $\text{Pos}_k$  — 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  $\mathbf{A}^t = \{\mathbf{A}_{i,j}^t\} \cup \{A_{\text{out},i,j}^t\}$ , т.е. положение, скорость, размер и тип всех автомобильных групп на всех ребрах дорожно-транспортной сети. Группы АТС  $\{A_{\text{out},i,j}^t\}$  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  $\tau$  — 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,  $\tau$  — 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,  $\tau$  – 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,  $\tau$  – 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.  $N_{\text{total}}$  — 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 автомагистрали 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.

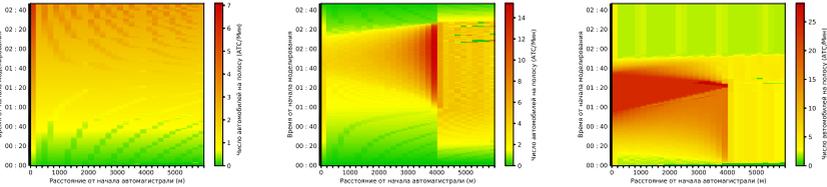


Рис. 4 — Слева-направо: эксперимент с простой дорогой без въездов и съездов, эксперимент с сужающейся дорогой и синусоидальным потоком АТС на въезде, эксперимент с пропадающим сужением.

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.

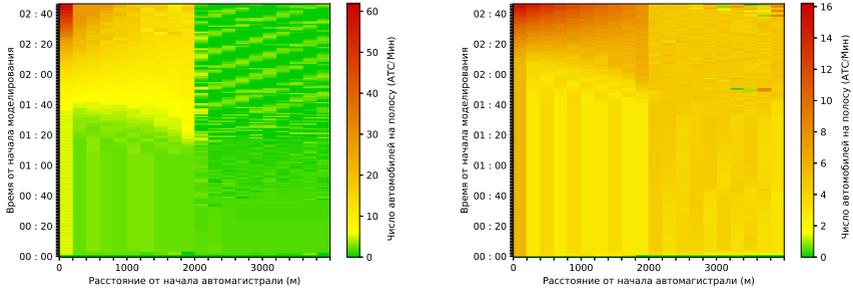


Рис. 5 — Слева-направо: эксперимент со съездом и нарастающим потоком на него, эксперимент с въездом на автомагистраль с нарастающим потоком АТС на нём.

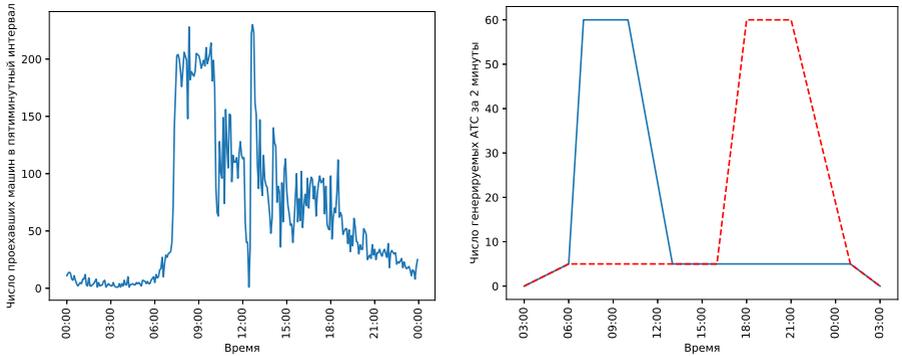
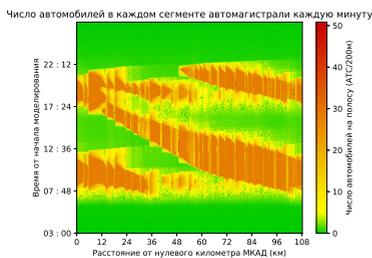


Рис. 6 — Данные с дорожного датчика (слева) с пиковой нагрузкой 45 АТС/мин в 8:20 и графики загрузки двух типов въездов — с утренней и вечерней пиковыми нагрузками (справа)

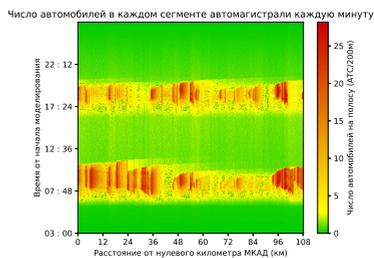
Проведены расчеты числа проезжающих по МКАД в рамках моделирования автомобилях за день с и без управления въездами. Пример результатов данных расчётов виден на рис. 7.

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.

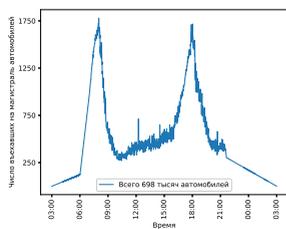


а) Без управления въездами

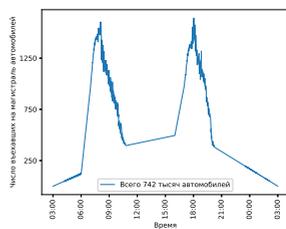


б) С управлением въездами

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.

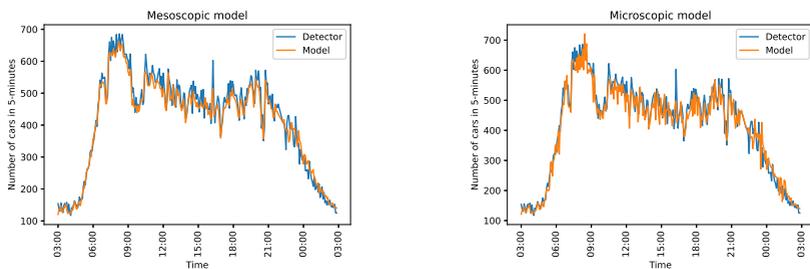


Рис. 9 — Результаты моделирования участка автомагистрали мезоскопической моделью (слева) и моделью разумного водителя (справа)

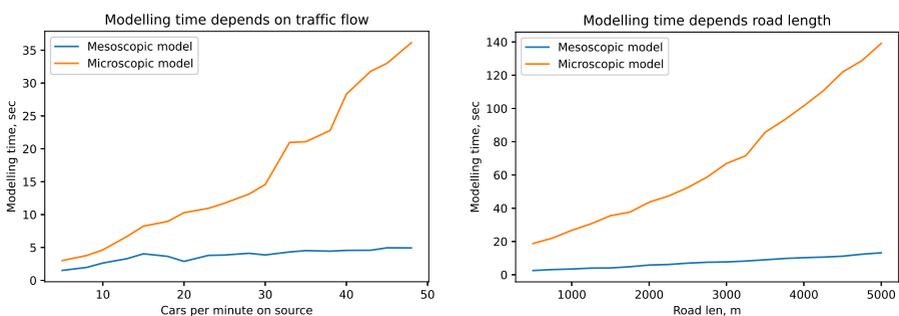


Рис. 10 — Исследование времени моделирования в зависимости от потока АТС на въезде с длиной дороги 2.5 километра (слева) и в зависимости от длины моделируемого участка при входном потоке 45 АТС/мин (справа)

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 **заклучении** 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. — (ВАК, 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. — (ВАК, 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. — (ВАК).

## 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](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](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.