

Вычислительный центр им. А.А. Дородницына
Федерального исследовательского центра «Информатика и управление»
Российской академии наук

Представление на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 05.13.17 Теоретические
основы информатики

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

Выступающий: В. М. Старожилец
Руководитель: к. ф., м. н. Ю. В. Чехович

Москва, 2022

- Мезоскопическая математическая модель транспортных потоков на основе групп АТС с использованием фундаментальной диаграммы поток-плотность для расчёта скорости групп на основе комплексированных данных
- Алгоритм комплексирования данных
- Результаты вычислительного эксперимента по адаптивному управлению въездами на МКАД на основе созданной мезоскопической модели

1 Введение

- Актуальность задач моделирования транспортных потоков
- Моделирование транспортных потоков
- Мотивация

2 Математическая модель

- Транспортная сеть
- Свойства группы АТС
- Процедура расчёта

3 Фундаментальная диаграмма потока

4 Комплексирование данных

- Комплексирование данных
- Необходимость комплексирования данных
- Функциональная зависимость реального числа АТС от трекового
- Преобразование скорости

5 Вычислительные эксперименты

- Проверка работоспособности модели
- Моделирование МКАД
 - Обычные въезды
 - Длинные въезды
- Моделирование МКАД с вычислением всех фундаментальных

Актуальность задач моделирования транспортных потоков

Задачи решаемые с помощью моделирования:

- 1 Принятие решений о необходимости прокладывания дополнительных дорог, изменения структуры дорожных перекрестков.
- 2 Настройка работы светофоров в том числе координированное управлением ими.
- 3 Адаптивное управление въездами на автомагистраль с целью недопустить возникновения пробок на ней.
- 4 Оптимизация работы светофоров с целью минимизации выхлопов в окружающую среду.

Два подхода к моделированию:

- ① Макроскопические модели — нелинейные системы гиперболических уравнений для плотности и скорости потока.
- ② Микроскопические модели — ускорение каждого автомобиля это функция скорости, расстояния до впереди идущего автомобиля (лидера) и скорости лидера.

Типичные пробки на МКАД

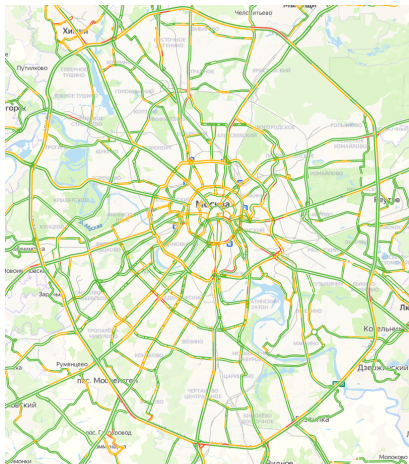


Рис.: Типичные пробки по понедельникам в 18:15 на основе статистики сервиса «Яндекс-пробки» транспортной сети Москвы и МКАД, в частности по состоянию на 16.05.21.

- Планы ЦОДД по управляемому въезду на МКАД,
- Микроскопические модели вычислительно тяжёлые,
- Макроскопическим моделям возможно не хватает точности;

Компромисс — рассматривать вместо движения каждого отдельного автомобильно-транспортного средства (АТС) движение их групп.

Математическая модель

Транспортная сеть представляет собой связный ориентированный граф $G = (V, E)$, где V - множество вершин, $E = \{(i, j)\}$ - множество ветвей графа.

Ограничения накладываемые на граф:

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

Свойства группы АТС на ветви (i, j) : $\mathbf{A}_k^t = \{\text{Pos}_k, V_k, N_k\}$:

- 1 Pos_k — позиция начала группы относительно начала ветви на которой она расположена,
- 2 V_k — скорость группы АТС,
- 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 ветви (i, j) .

Состояние системы в момент времени t

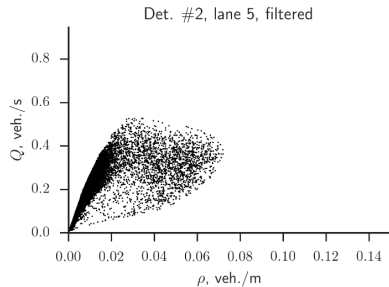
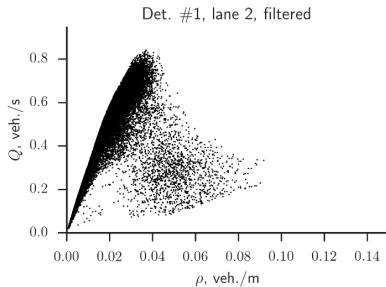
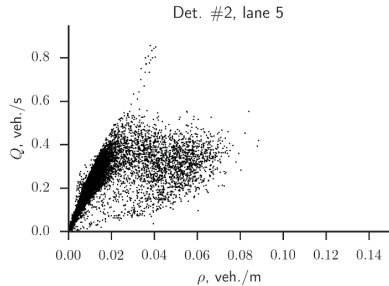
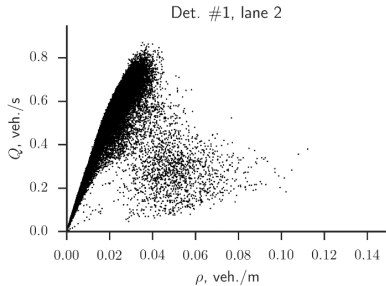
$$\mathbf{A}^t = \{\mathbf{A}_{i,j}^t\} \cup \{A_{\text{out},i,j}^t\}$$

- ① Скорость группы рассчитывается на основе плотности автомобилей на ветви автомагистрали и фундаментальной диаграммы поток-плотность.
- ② Длина группы АТС считается линейно зависящей от ее скорости по формуле $L = L_{avg} + a \cdot V$.

- Движение групп АТС по ветви,
- Объединение двух групп АТС,
- Перемещение групп АТС между ветвями,
- Расчёта потенциала трансфера между ветвями;

- ① Генерируем АТС всеми источниками в модели.
- ② Движение групп АТС на всех сегментах автомагистрали в порядке удалённости от конца магистрали.
- ③ Очистка всех сегментов-стоков в модели от транспортных средств. Возврат к п.1.

Фундаментальная диаграмма потока



- 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 $Q(\rho) = c_*(\rho_* - \rho)$, $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_*$;

Kerner, B. S. Introduction to modern traffic flow theory and control [Текст]. Т. 700 / B. S. Kerner. — Springer, 2009.

Пример фундаментальных диаграмм

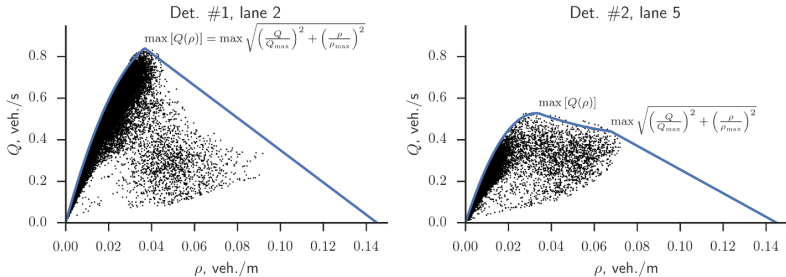


Рис.: Фундаментальные диаграммы для двух разных участков МКАД. Слева для данных со второй полосы (детектор № 1), справа с пятой полосы (детектор №2)

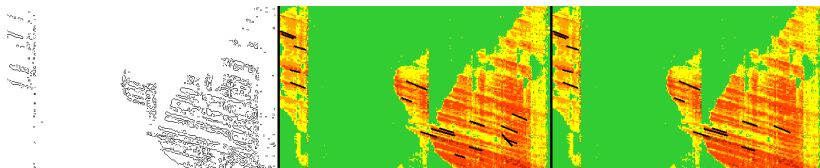


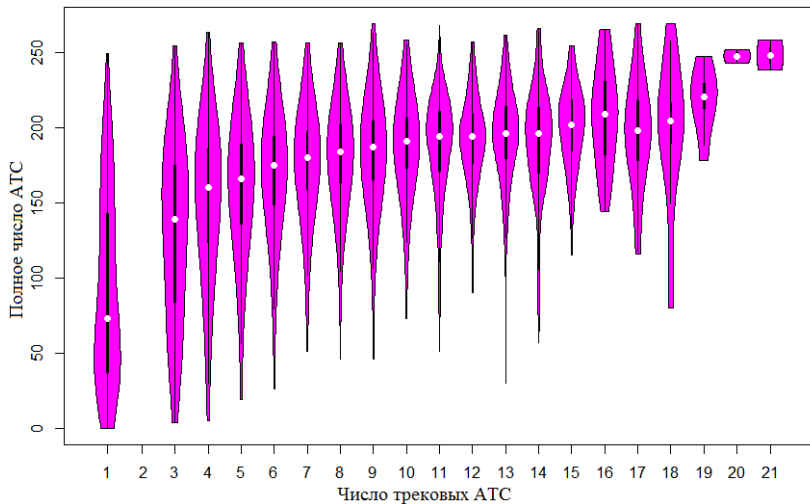
Рис.: Нахождение значений скорости волн торможения на пространственно-временной структуре значений скорости транспортного потока на внешней стороне МКАД

Итоговая скорость волны торможения равна $-15,8$ км/ч.

Комплексирование данных

- ① Дорожные датчики относительно точны, но не покрывают всю транспортную сеть.
- ② GPS-треки имеют низкую точность, но покрывают большой объём транспортной сети.

Функциональная зависимость реального числа АТС от трекового



$$N_{\text{real}} = a_0 + a_1 N_{\text{track}} + a_2 \log(N_{\text{track}}) + a_3 V + a_4 N_{\text{track}}/V$$

$$V_{\text{est}} = 12.34 + 0.639V_{\text{track}}$$

	V_{est}	V_{track}
Среднеквадратичная ошибка	0.03	0.042

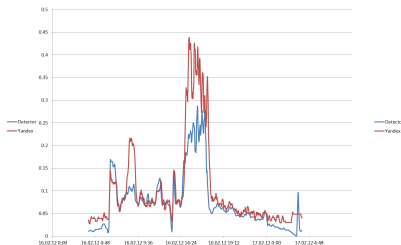
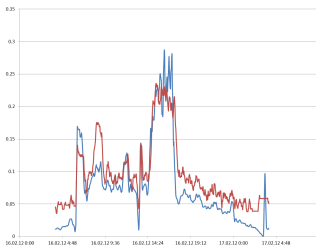
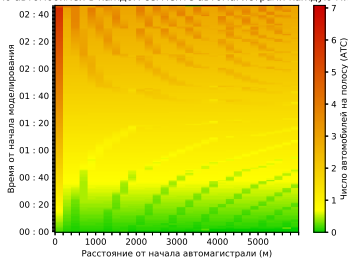


Рис.: Восстановленные значения плотности АТС с (слева) и без (справа) преобразования скорости

Проверка работоспособности модели



Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту

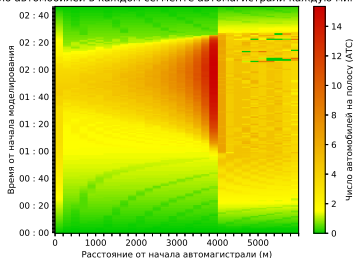


Простая дорога без перекрестков с линейно нарастающим вплоть до 150 АТС/мин потоком.

Дорога с сужением, синусоидальный поток



Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту

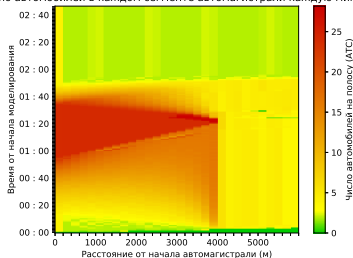


Пятиполосная дорога с сужением до двух полос. Входной поток — синусоида с периодом равным времени моделирования и амплитудой 85 АТС/мин.

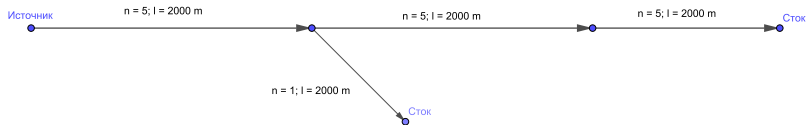
Дорога с пропадающим сужением



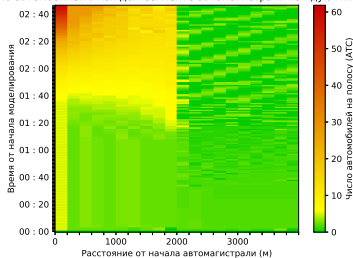
Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту



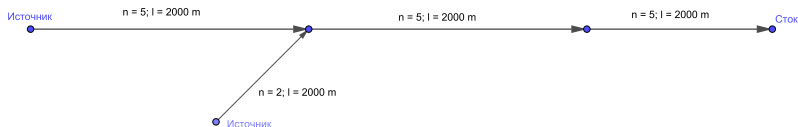
Пятиполосная дороге без перекрестков с пропадающим сужением до двух полос. Входной поток 100 АТС/мин.



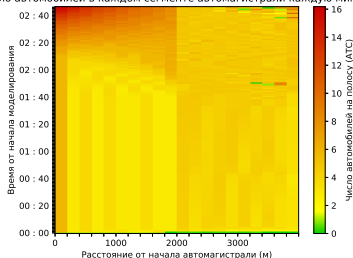
Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту



Пятиполосная дорога со съездом. Поток на автомагистрали 65 АТС/мин с линейно нарастающей долей съезжающих автомобилей с 20% до 60%.



Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту



Пятиполосная дорога с въездом. Поток на автомагистрали 140 АТС/мин, поток на въезде линейно растёт с 20 до 50 АТС/мин.

Прямая дорога между дорожными датчиками

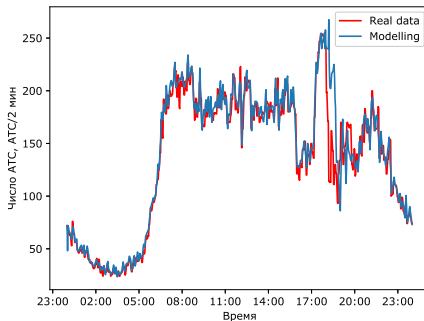


Рис.: График полученного с помощью модели числа съехавших АТС (красная линия) в сравнении с числом съехавших АТС зафиксированных дорожным датчиком (синяя линия) за один день. Среднеквадратичная ошибка $S = 18.4$.

Прямая дорога между дорожными датчиками. Перекрытая полоса

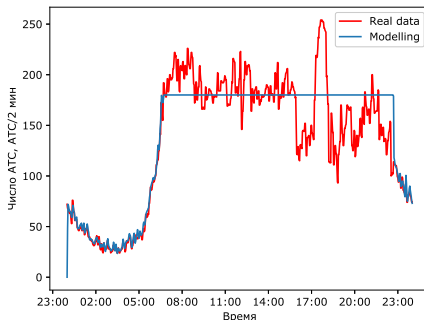


Рис.: График полученного с помощью модели числа съехавших АТС (красная линия) в сравнении с числом съехавших АТС зафиксированных дорожным датчиком (синяя линия) за один день с перекрытием полосы.

Моделирование МКАД

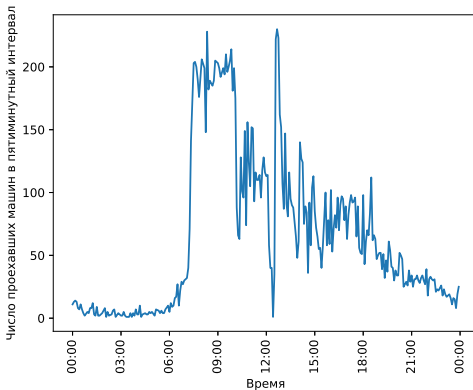
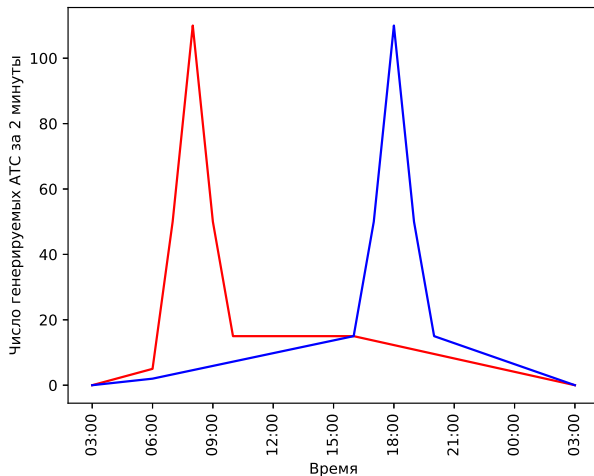


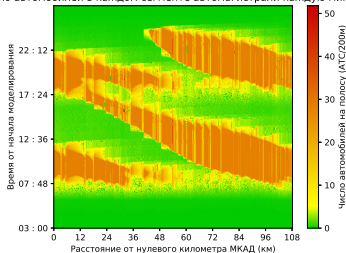
Рис.: Данные с дорожного датчика за один день. Пиковая нагрузка 45 АТС/мин в 8:20.



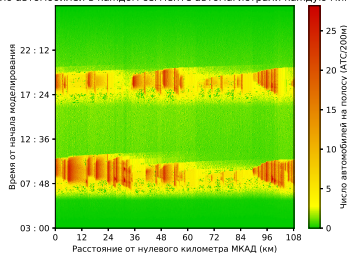
Графики загрузки двух типов въездов — с утренней и вечерней пиковыми нагрузками

Число автомобилей на автомагистрали

Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту



Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту

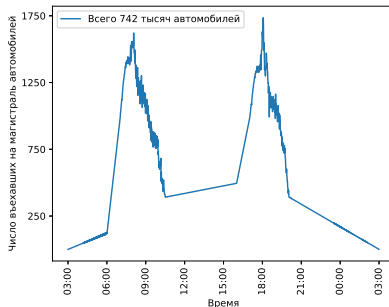
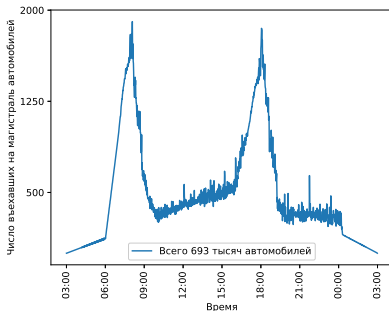


а) Без управления въездами

б) С управлением въездами

Количество автомобилей на 200 метров в модели транспортной сети
МКАД за день

Число въехавших автомобилей

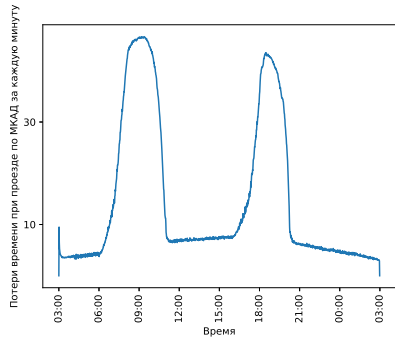
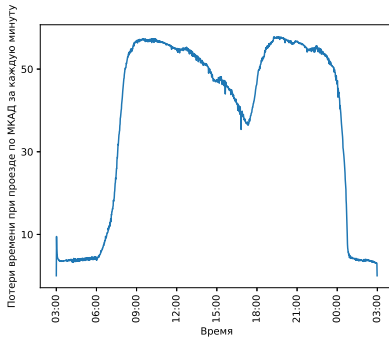


а) Без управления въездами

б) С управлением въездами

Графики суммарно въехавшего на МКАД со всех въездов числа автомобилей

Временные потери на проезд по МКАД



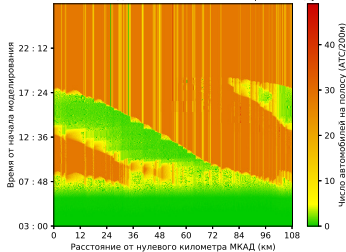
а) Без управления въездами

б) С управлением въездами

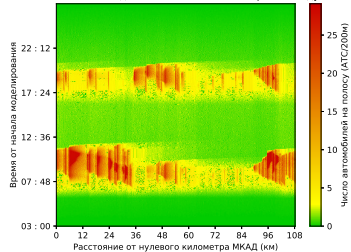
Временные потери на проезд по МКАД относительно пустой автомагистрали

Число автомобилей на автомагистрали

Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту



Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту

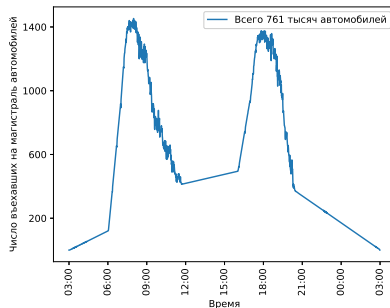
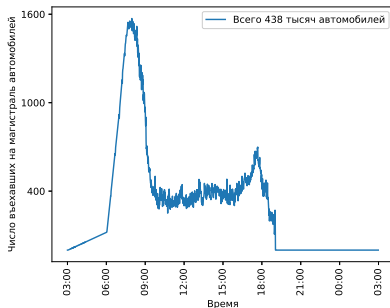


а) Без управления въездами

б) С управлением въездами

Количество автомобилей на 200 метров в модели транспортной сети
МКАД за день

Число въехавших автомобилей

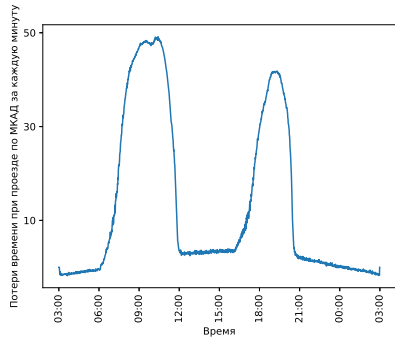
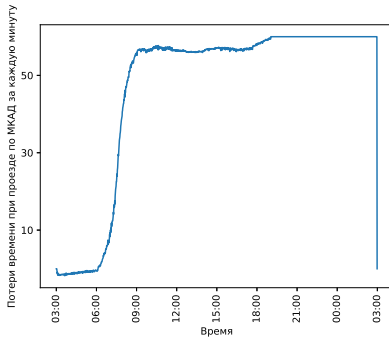


а) Без управления въездами

б) С управлением въездами

Графики суммарно въехавшего на МКАД со всех въездов числа автомобилей

Временные потери на проезд по МКАД



а) Без управления въездами

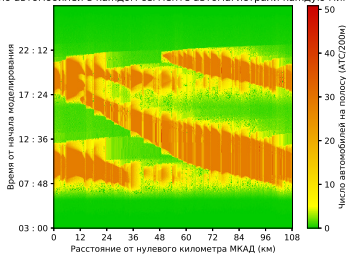
б) С управлением въездами

Временные потери на проезд по МКАД относительно пустой автомагистрали

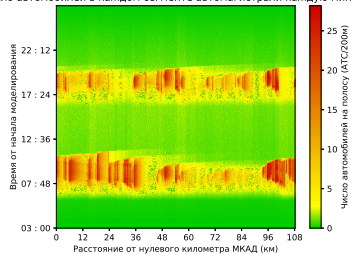
Моделирование МКАД с
вычислением всех
фундаментальных диаграмм

Число автомобилей на автомагистрали

Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту



Число автомобилей в каждом сегменте автомагистрали каждую минуту

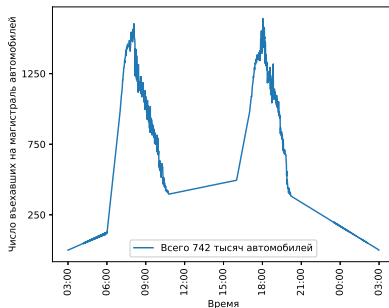
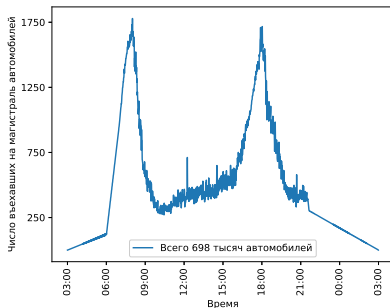


а) Без управления въездами

б) С управлением въездами

Количество автомобилей на 200 метров в модели транспортной сети
МКАД за день

Число въехавших автомобилей

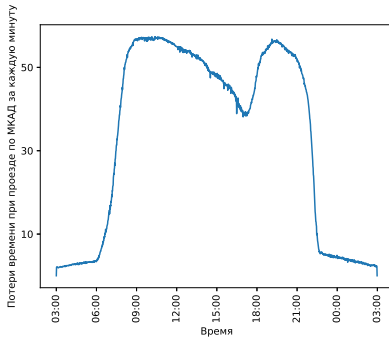


а) Без управления въездами

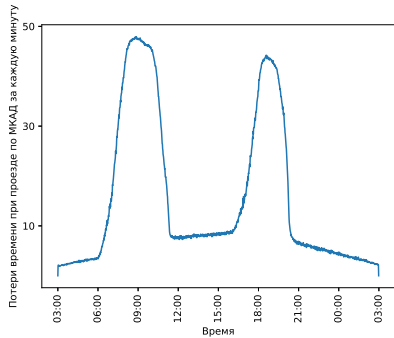
б) С управлением въездами

Графики суммарно въехавшего на МКАД со всех въездов числа автомобилей

Временные потери на проезд по МКАД



а) Без управления въездами



б) С управлением въездами

Временные потери на проезд по МКАД относительно пустой автомагистрали

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

1. *Старожилец, В. М.* — Комплексирование данных из разнородных источников в задачах моделирования транспортных потоков. /. — В. М. Старожилец, Ю. В. Чехович // Машинное обучение и анализ данных. — 2016.
2. *Старожилец, В. М.* — Об идентификации статистической модели транспортных потоков с использованием групп автомобильно-транспортных средств. /. — В. М. Старожилец, Ю. В. Чехович // Машинное обучение и анализ данных. — 2017.
3. *Старожилец, В. М.* — Об одном подходе к статистическому моделированию транспортных потоков на МКАД и управлению въездами. /. — В. М. Старожилец, Ю. В. Чехович // Автоматика и телемеханика. — 2021.
4. *Старожилец, В. М.* — Об одном подходе к статистическому моделированию транспортных потоков. /. — В. М. Старожилец, Ю. В. Чехович // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2021.

5. Разработка, калибровка и верификация модели движения трафика в городских условиях. Часть I. — [Текст]. /. — А. Е. Алексеенко [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. — 2015. — Т. 7, № 6. — С. 1185—1203.
6. Adaptive traffic light control on highway entrances. — [Текст]. /. — А. Alekseenko [и др.] // 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). — IEEE. 2017. — С. 1—6.

- 11-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации», 2016;
- 18-я Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов», 2017;
- 19-я Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов», 2019;
- XXVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», 2020;
- 13-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации», 2020;
- XXVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», 2020;
- 20-я Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов», 2021;

Спасибо за внимание!