

Математическое моделирование транспортных систем

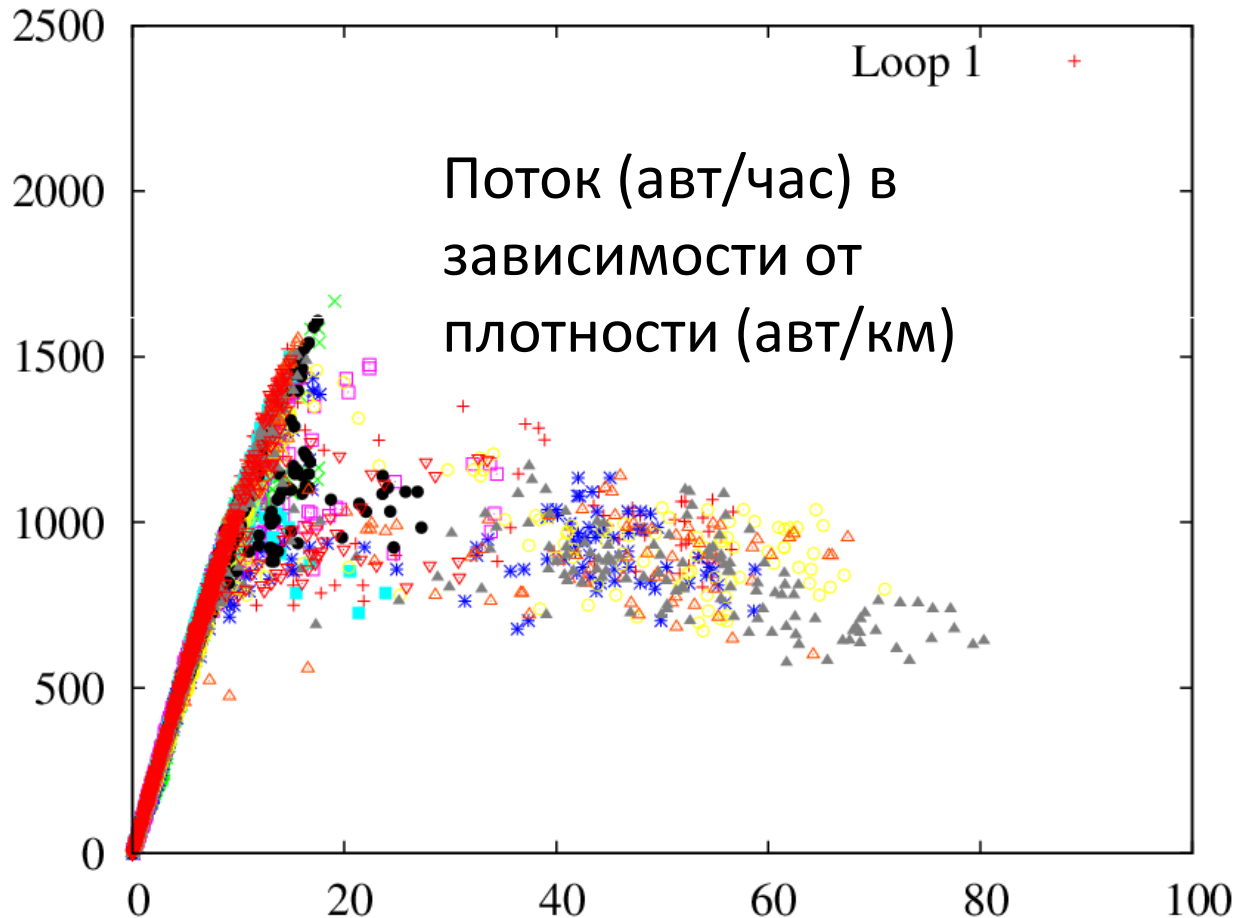
В.И.Швецов

Институт Системного Анализа РАН

1. Динамика транспортного потока: эмпирические исследования и моделирование.
2. Прогноз автомобильных и пассажирских потоков в транспортных системах крупных городов.
3. Специальные задачи:
 - Размещение наружной рекламы;
 - Платные автомобильные дороги.
4. Разработка ПО для моделирования транспорта:
программа Transnet

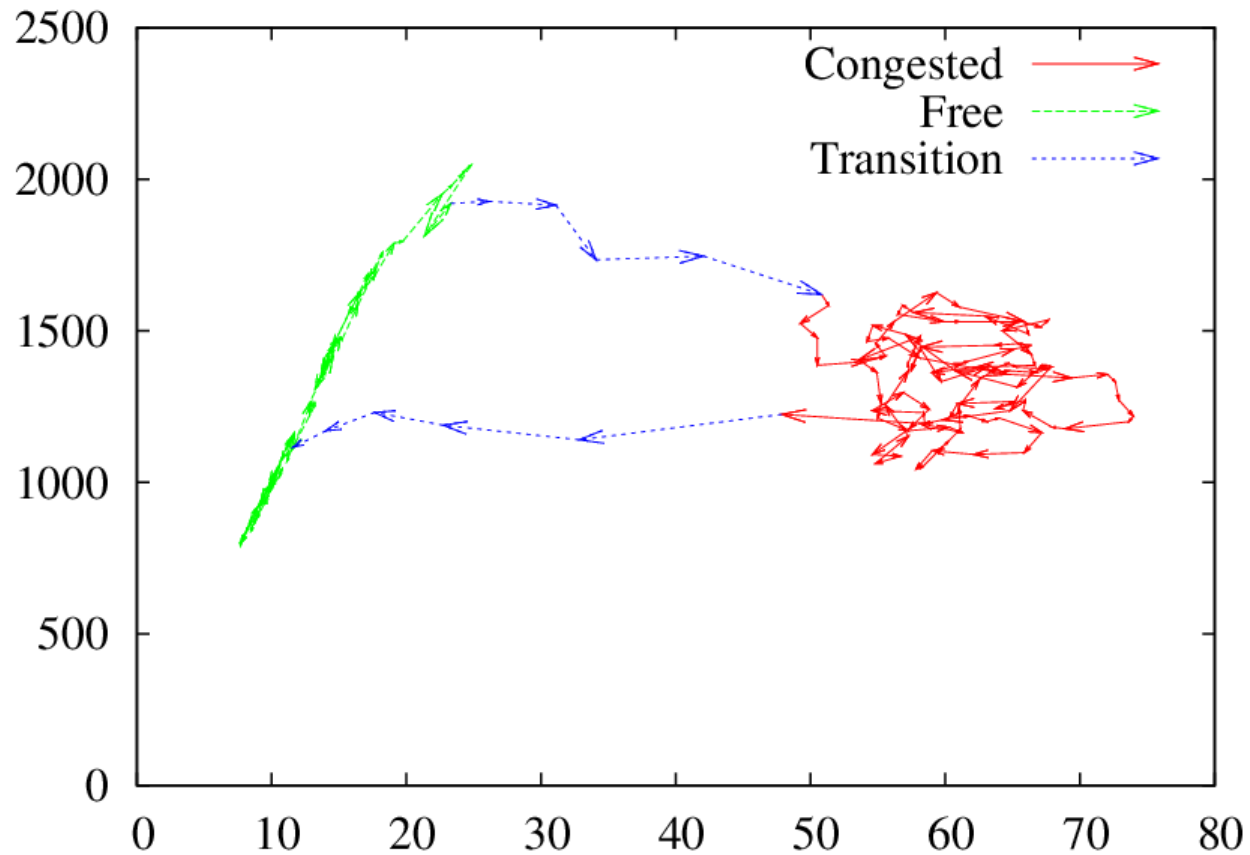
1. Динамика транспортного потока

Фундаментальная диаграмма



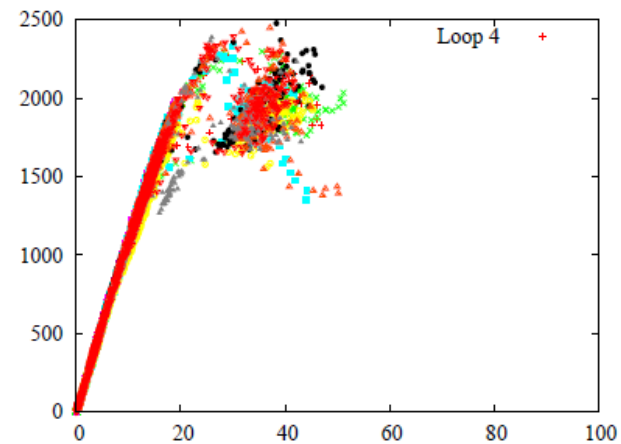
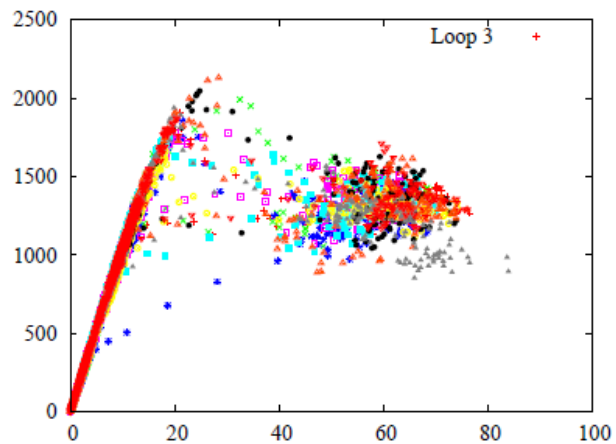
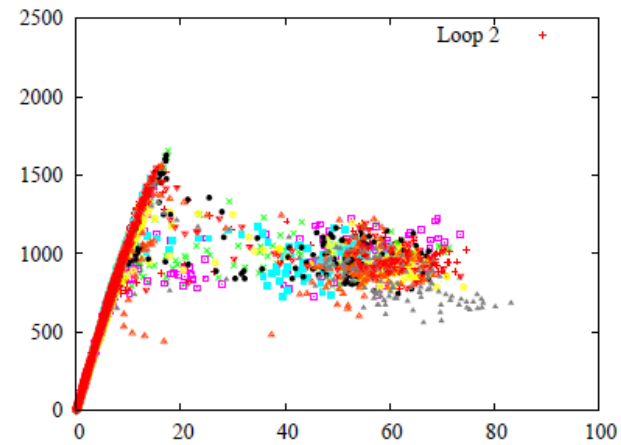
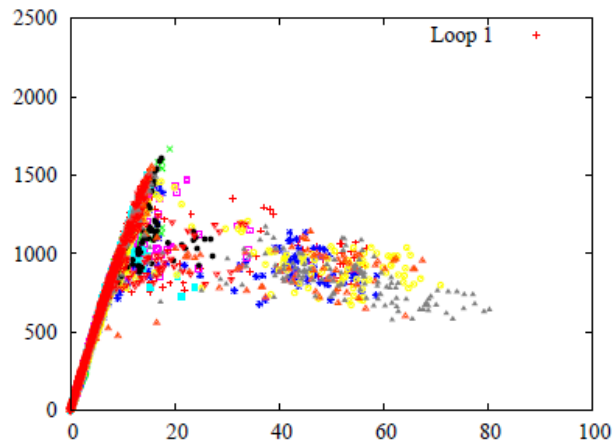
Фазовый переход

Loop 3, Date 01.11



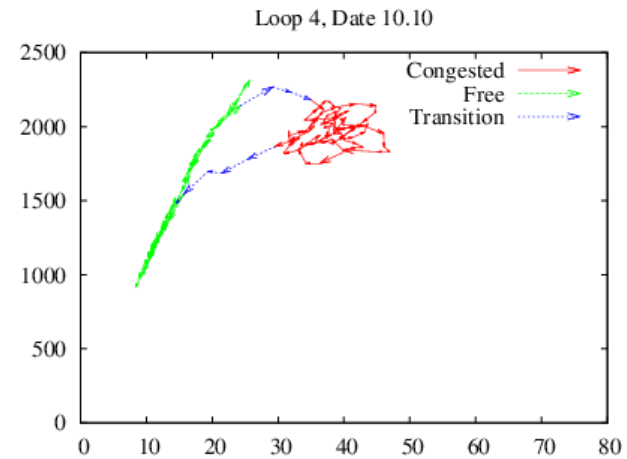
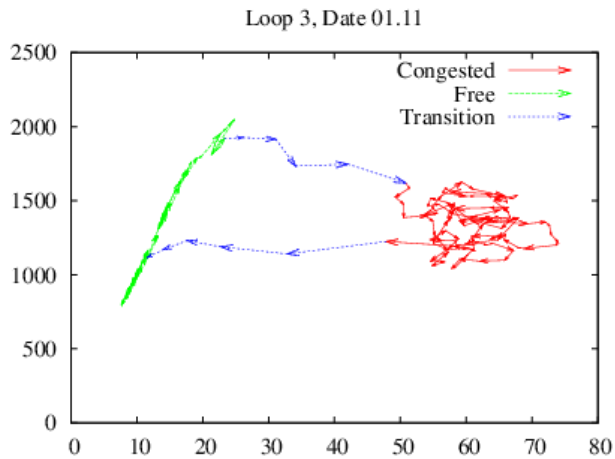
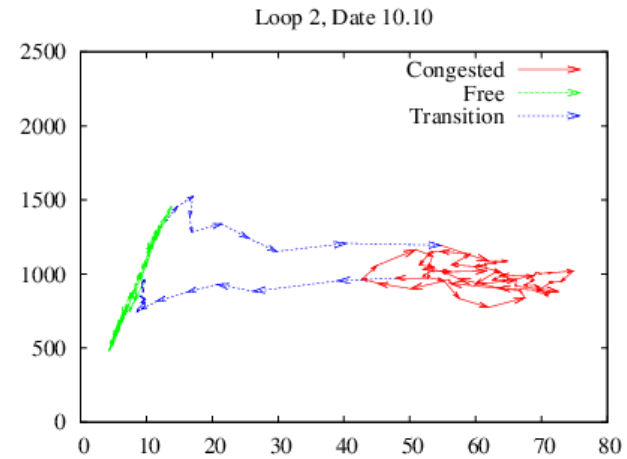
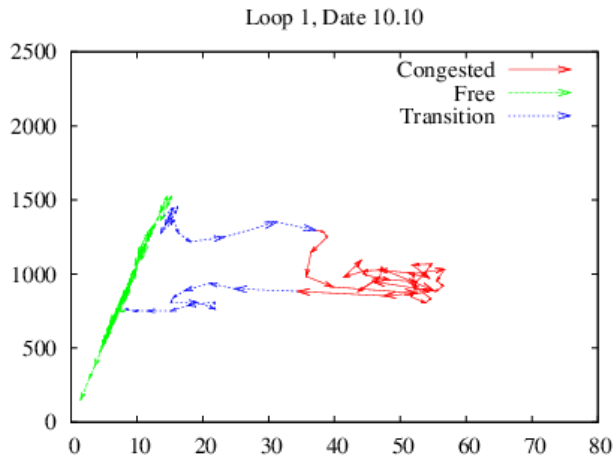
Фундаментальная диаграмма

Разные места и даты измерения

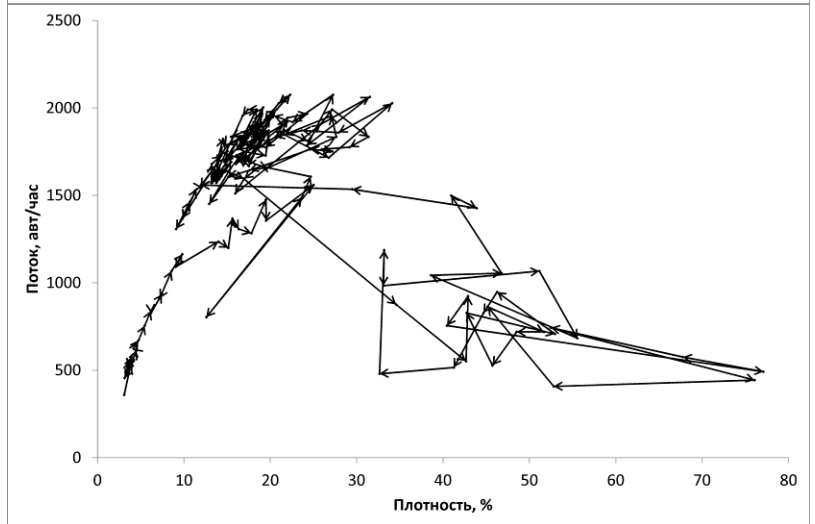
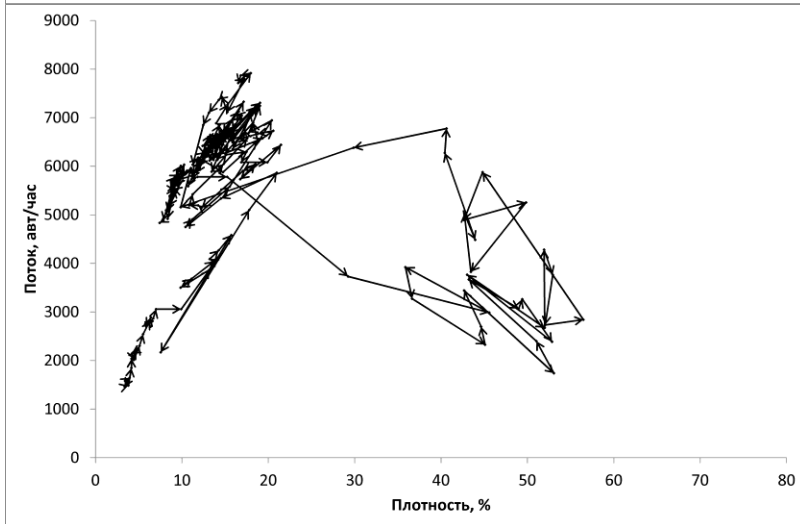
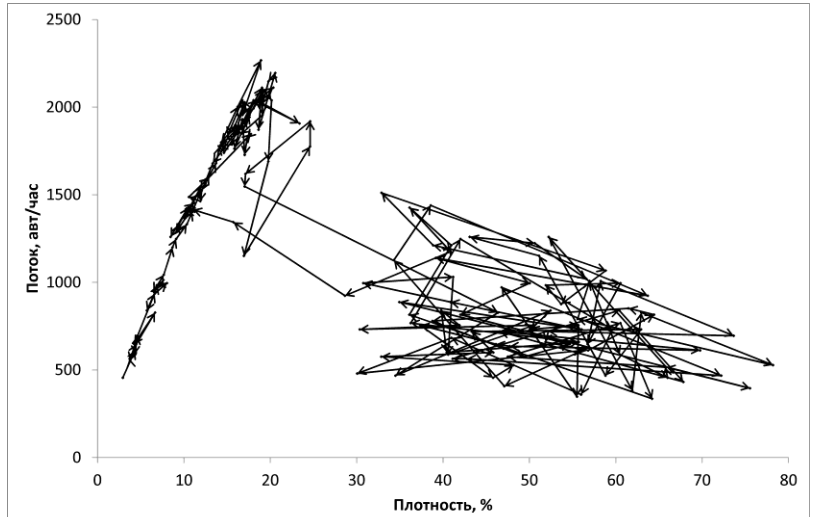
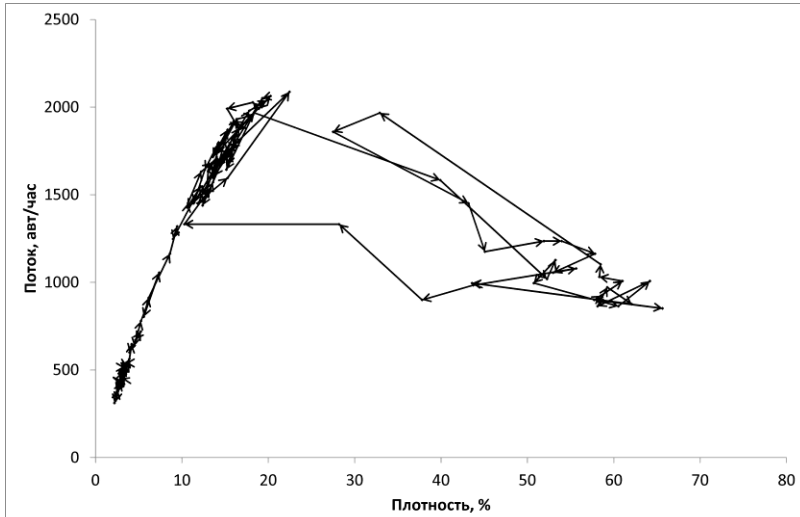


Фазовый переход

Разные места и даты измерения



Данные для Московских дорог



Кинетическое уравнение

$f(x, v, t)$ – фазовая плотность распределения

Модель Пригожина

$$\partial_t f + \partial_x(fv) = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{int} + \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{rel}$$

Модель Pavari-Fontana

$g(x, v, w, t)$ – «расширенная» фазовая плотность
индивидуальная желаемая скорость

$$\partial_t g + v \partial_x g + \partial_v(a(v, w)g) = \left(\frac{\partial g}{\partial t} \right)_{int},$$

Вывод макроскопических уравнений

$$m_k(x, t) = \int_0^\infty dv v^k f(x, v, t).$$

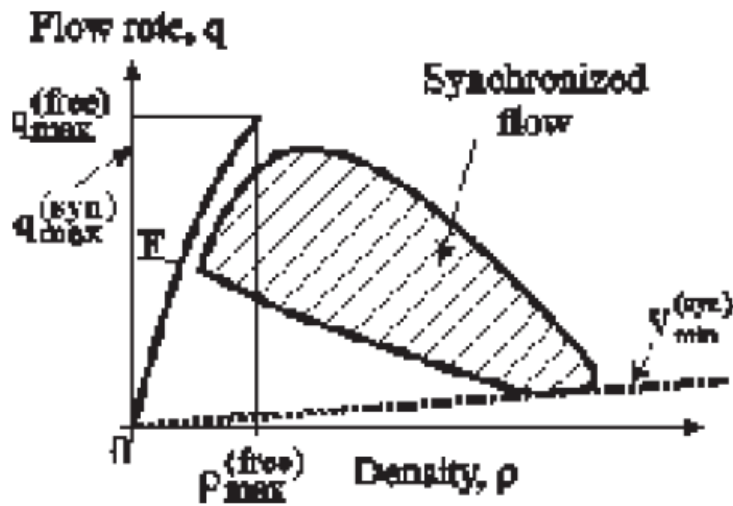
$$\partial_t m_k + \partial_x m_{k+1} = -\frac{m_k - m_{0k}}{\tau} + (1 - p)(m_1 m_k - \rho m_{k+1}).$$

Бесконечная цепочка уравнений - метод Чапмана-Энскогга

- Ряд моделей Helbing,
- GKT-модель Helbing-Treiber,
- вариант для многополосного сложносоставного потока – Helbing-Shvetsov

Трехфазная теория транспортного потока

ПОТОКА



Kerner

Модель: клеточный автомат

Эмпирические показатели синхронизации

- (Относительное) стандартное отклонение скорости;

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1,n} v_i^2 - nV^2 \right)}, \quad V = \frac{1}{n} \sum_{i=1,n} v_i.$$

- Интенсивность взаимодействий;

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1,n} \frac{v_i - v_{i-1}}{v_i^a dt_i}, \quad v_i^a = (v_i + v_{i-1})/2.$$

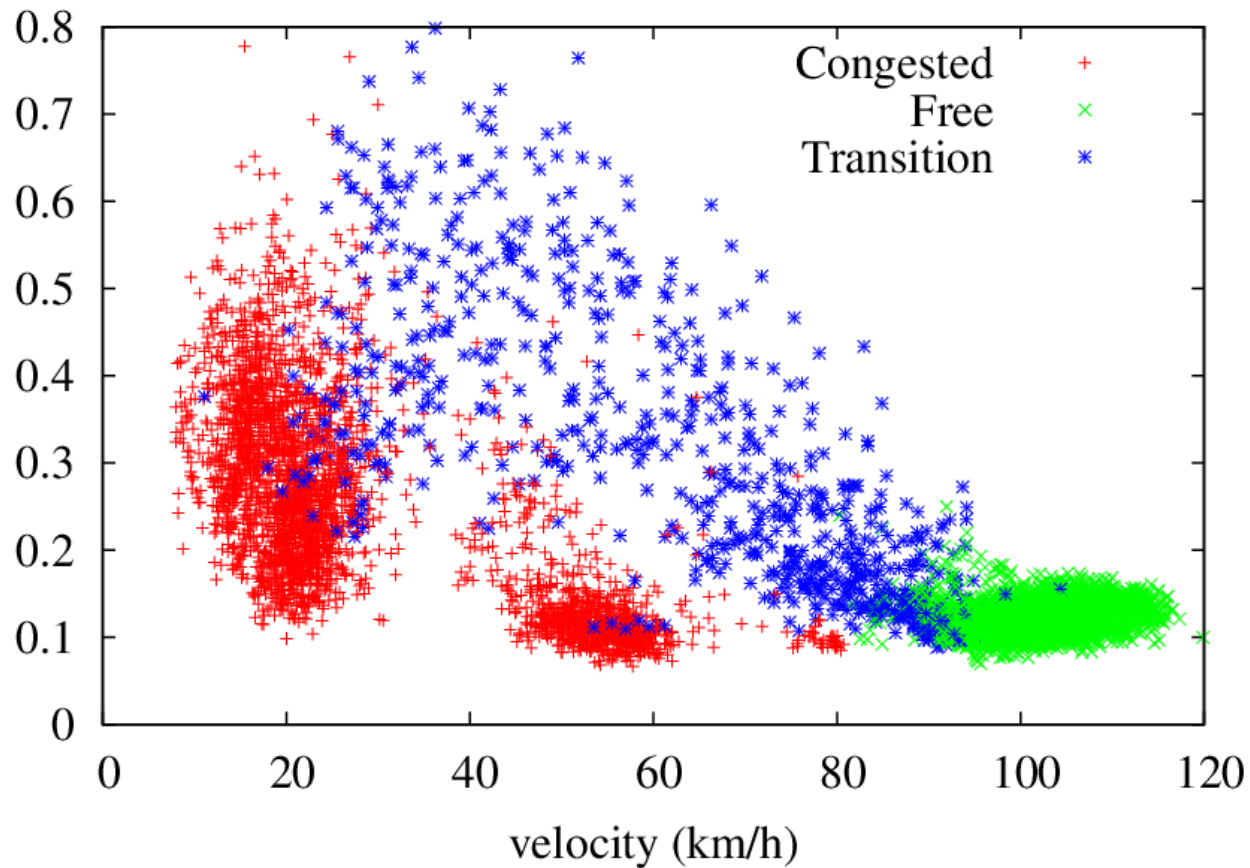
- Корреляция скоростей соседних автомобилей

$$k = \frac{n(R - VV^-)}{(n-1)\sqrt{\Theta\Theta^-}}, \quad R = \frac{1}{n} \sum_{i=1,n} v_i v_{i-1}, \quad V = \frac{1}{n} \sum_{i=1,n} v_i, \quad V^- = \frac{1}{n} \sum_{i=1,n} v_{i-1}$$

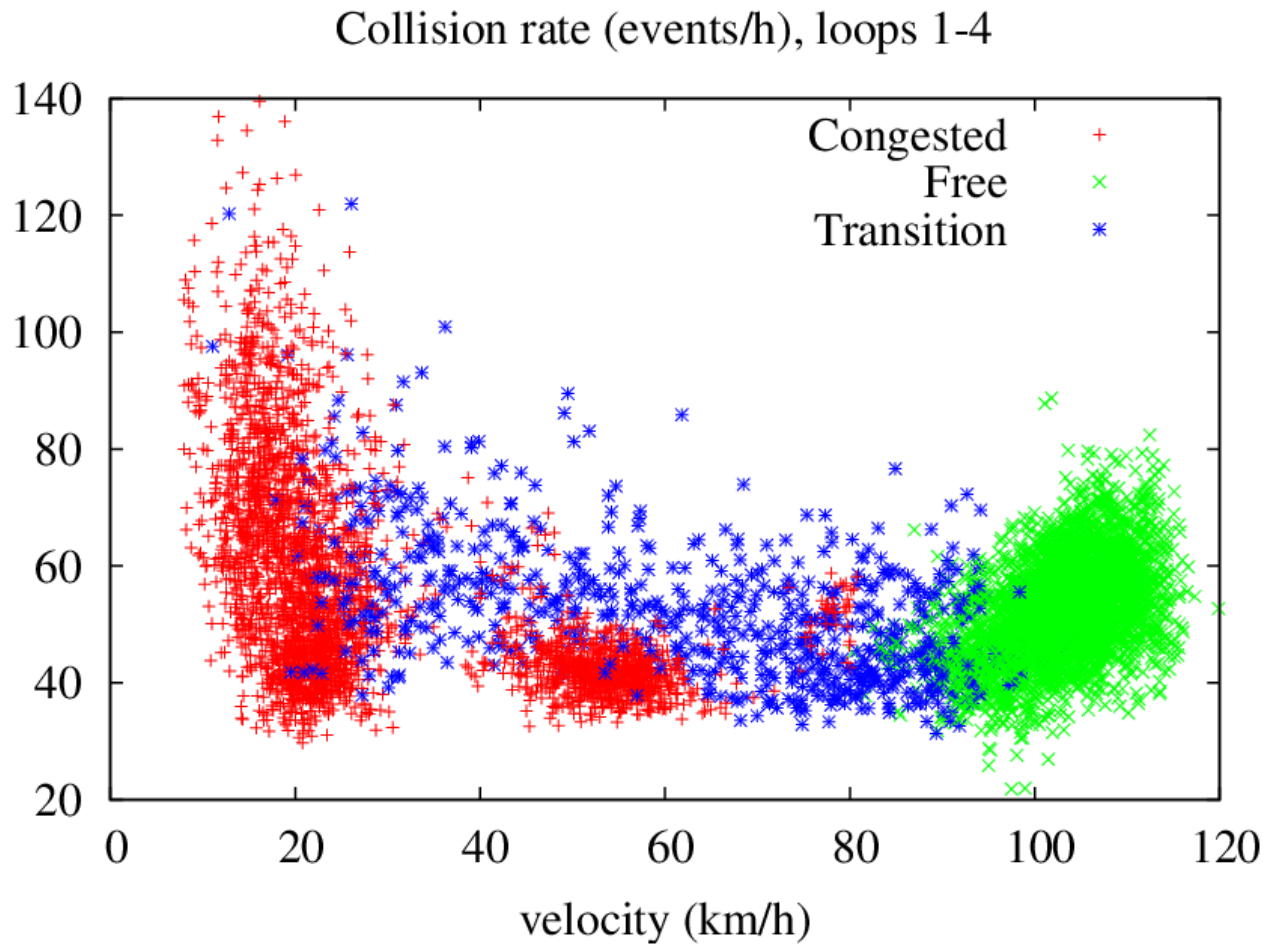
$$\Theta = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1,n} v_i^2 - nV^2 \right), \quad \Theta^- = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1,n} v_{i-1}^2 - n(V^-)^2 \right).$$

Стандартное отклонение скоростей

Relative std velocity deviation, loops 1-4

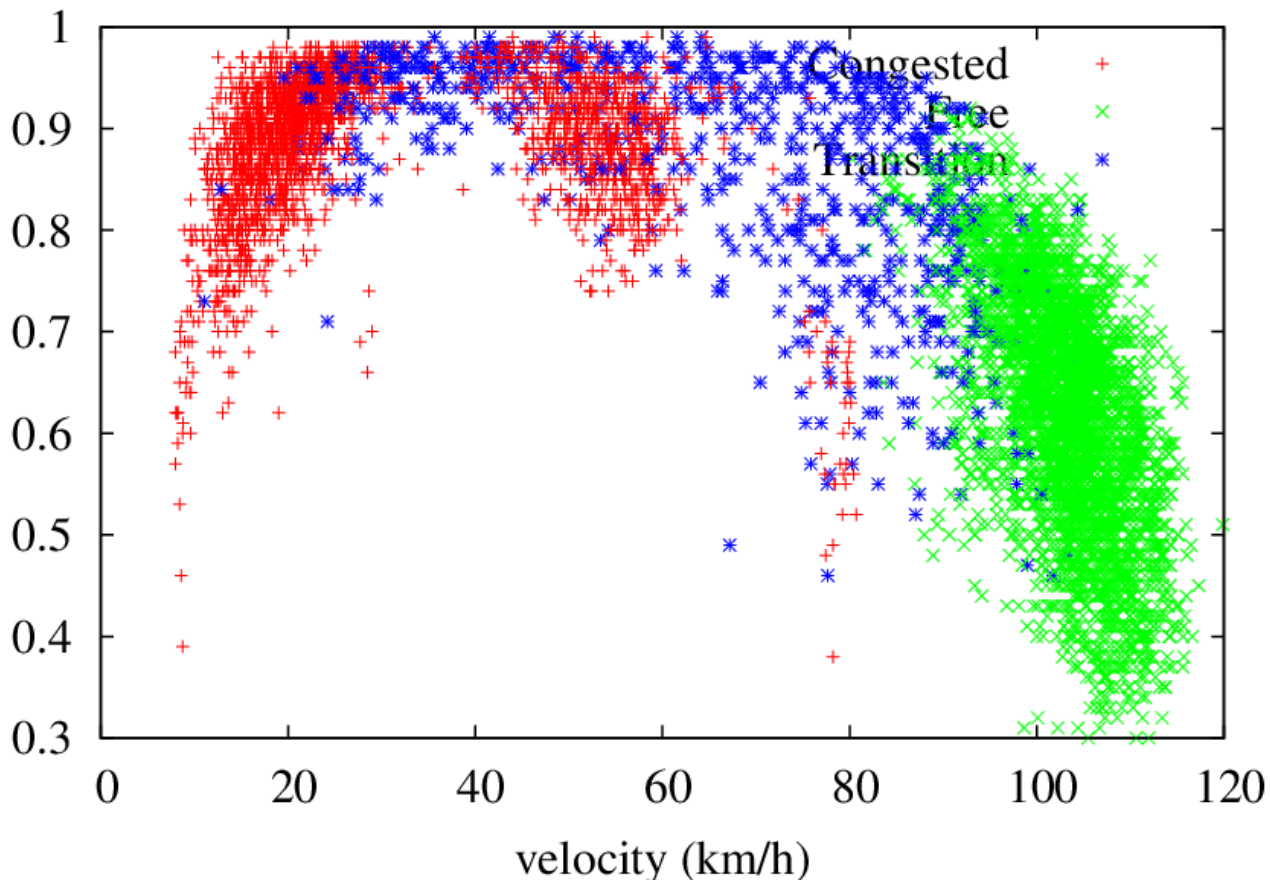


Интенсивность взаимодействий



Корреляция скоростей соседних автомобилей

Velocity correlation coefficient, loops 1-4



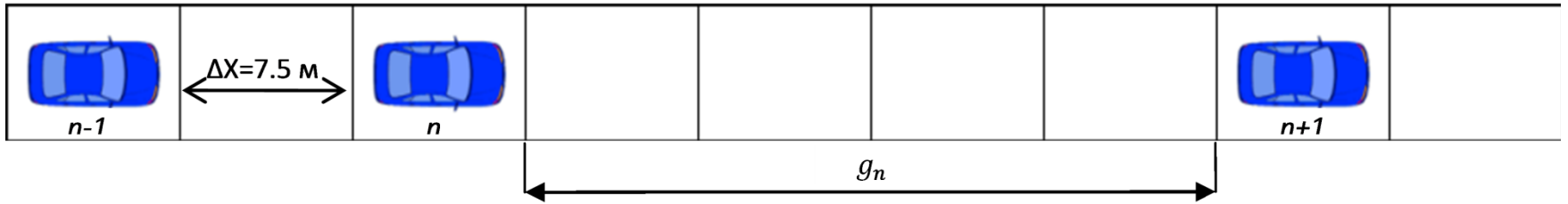
Концепция клеточных автоматов

Клеточные автоматы (Cellular Automata, CA) – идеализированные представления физических систем, в которых пространство и время считаются дискретными, и каждый элемент системы имеет конечный набор состояний.

Модели на основе клеточных автоматов:

- Высокая вычислительная эффективность, возможность использования в многопроцессорных системах для моделирования больших дорожных сетей в реальном времени и даже быстрее
- Меньшая точность по сравнению с непрерывными микромоделями

Простейший клеточный автомат



x_n и v_n – координата и скорость n -го автомобиля

Правила перехода

- *Ускорение*: $v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{\max})$.
- *Торможение*: $v_n \rightarrow \min(v_n, g_n)$.
- *Случайные возмущения с вероятностью p* :
 $v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0)$.
- *Движение*: $x_n \rightarrow x_n + v_n$.

Модель неоднородного многополосного транспортного потока (Д.Мазурин)

- За основу взята дискретная стохастическая трехфазная модель Кернера (2009)
- Для моделирования транспортных средств различных размеров используется более мелкая сетка и поперечная дискретизация
- Введен ряд поведенческих констант (комфортная скорость и ускорение, склонность к перестроениям и др.) для описания различного поведения водителей

Перестроения в модели

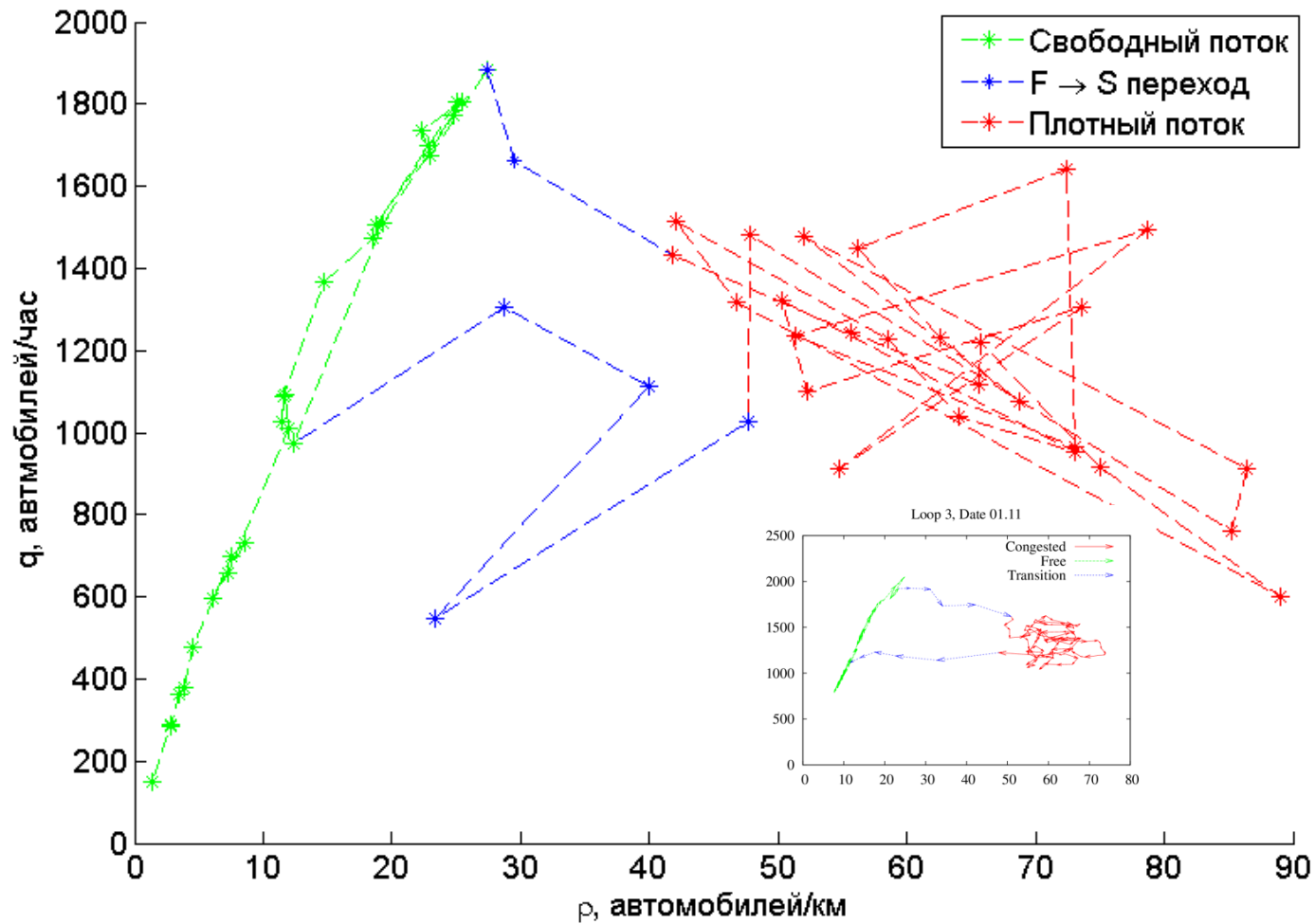
Две категории перестроений:

- **Вынужденная** смена полосы (Mandatory Lane Change) имеет место, когда транспортному средству необходимо сменить полосу для продолжения движения согласно выбранному маршруту
- **Невынужденная** смена полосы (Discretionary Lane Change) подразумевает перестроения с целью увеличения скорости передвижения

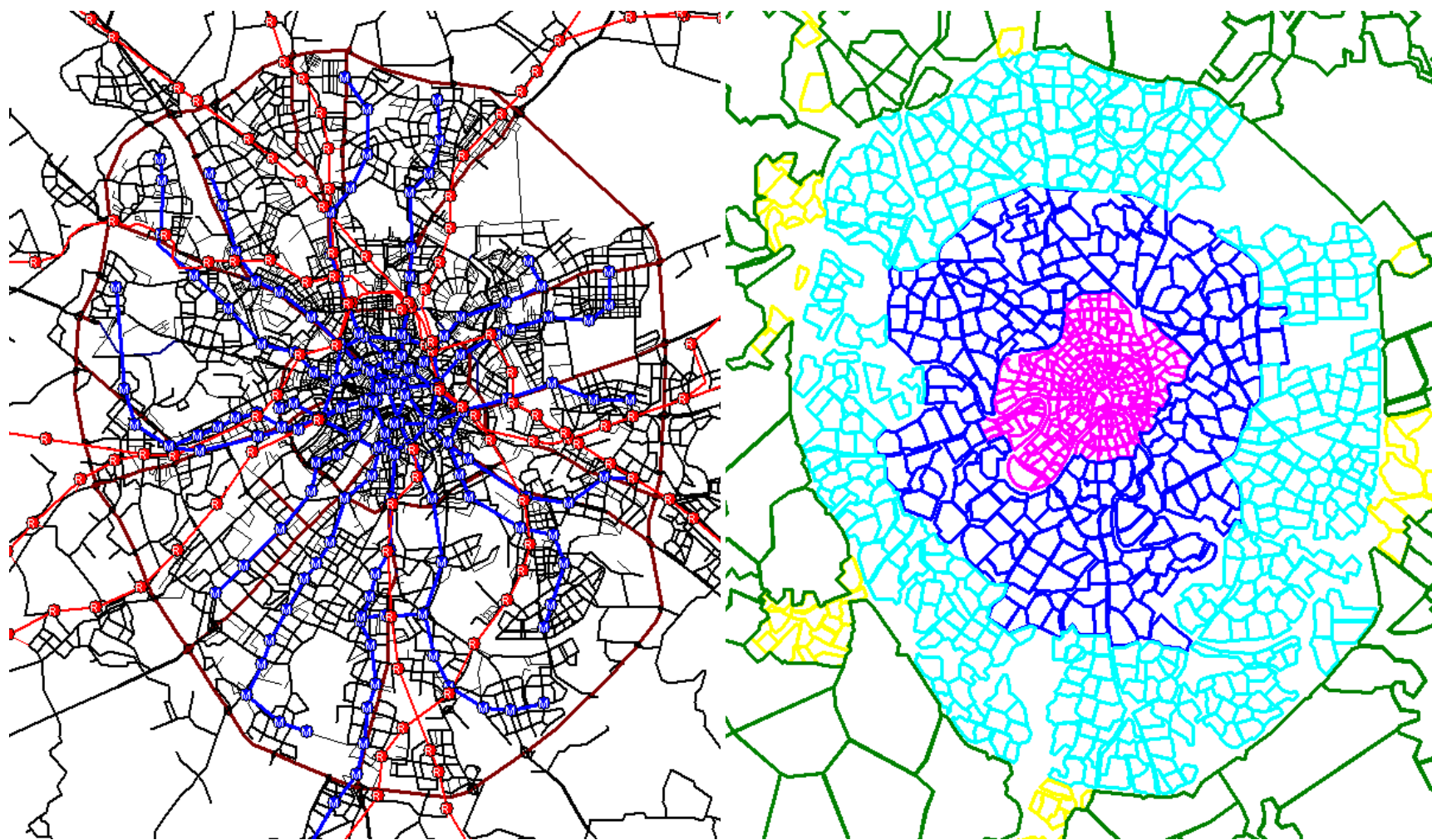
На каждом шаге проверяется необходимость (целесообразность) перестроения и условия безопасности.

При выполнении этих условий происходит смена полосы с некоторой вероятностью.

Модельная фундаментальная диаграмма



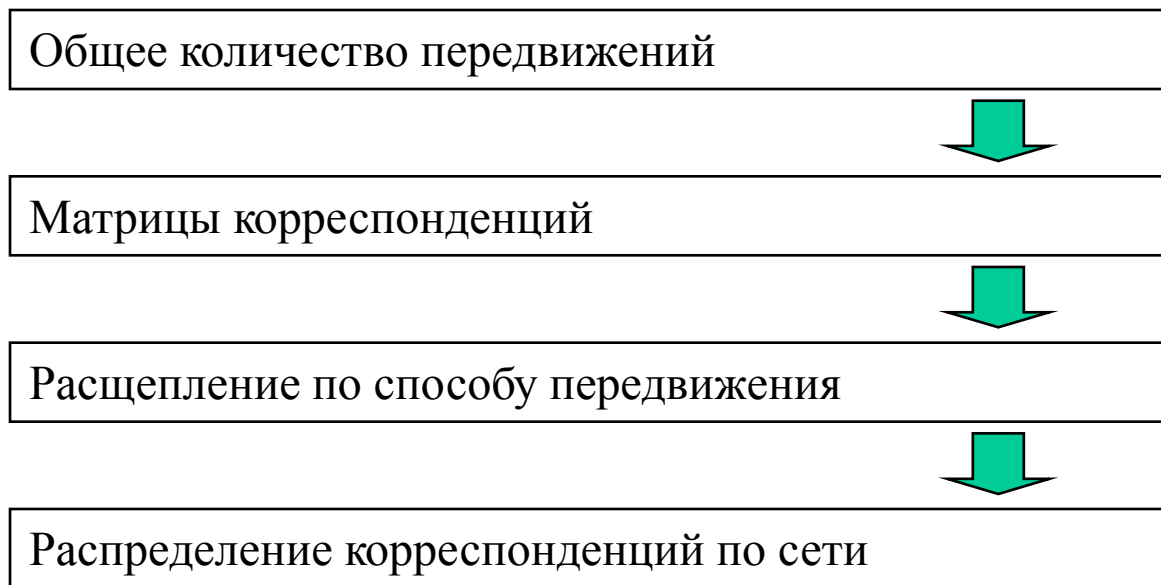
2. Прогноз транспортных потоков



4-стадийная схема прогнозирования потоков

Исходное:

потребность населения совершать передвижения с различными целями (подвижность)



Обратная связь

Обобщенные затраты
передвижений между районами



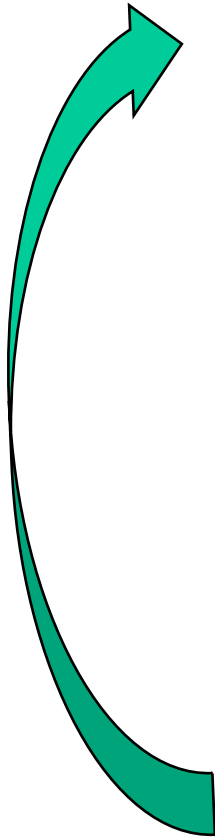
Корреспонденции между районами



Распределение корреспонденций
по путям в сети

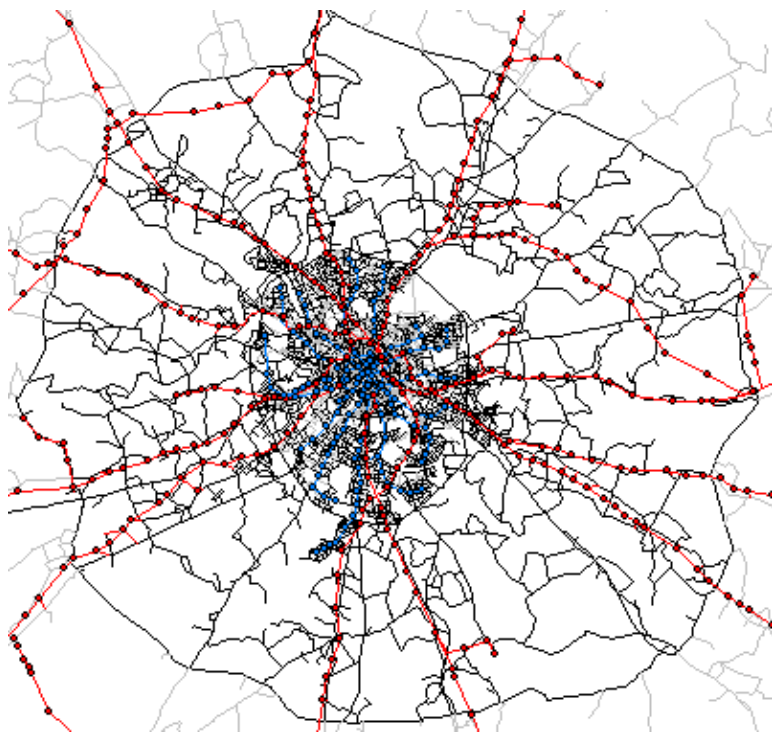


Загруженность элементов сети



Математическая модель для прогноза транспортных и пассажирских потоков в Московской агломерации

совместно с Центром исследований транспортной инфраструктуры и привлеченными экспертами Российской академии архитектуры и строительных наук



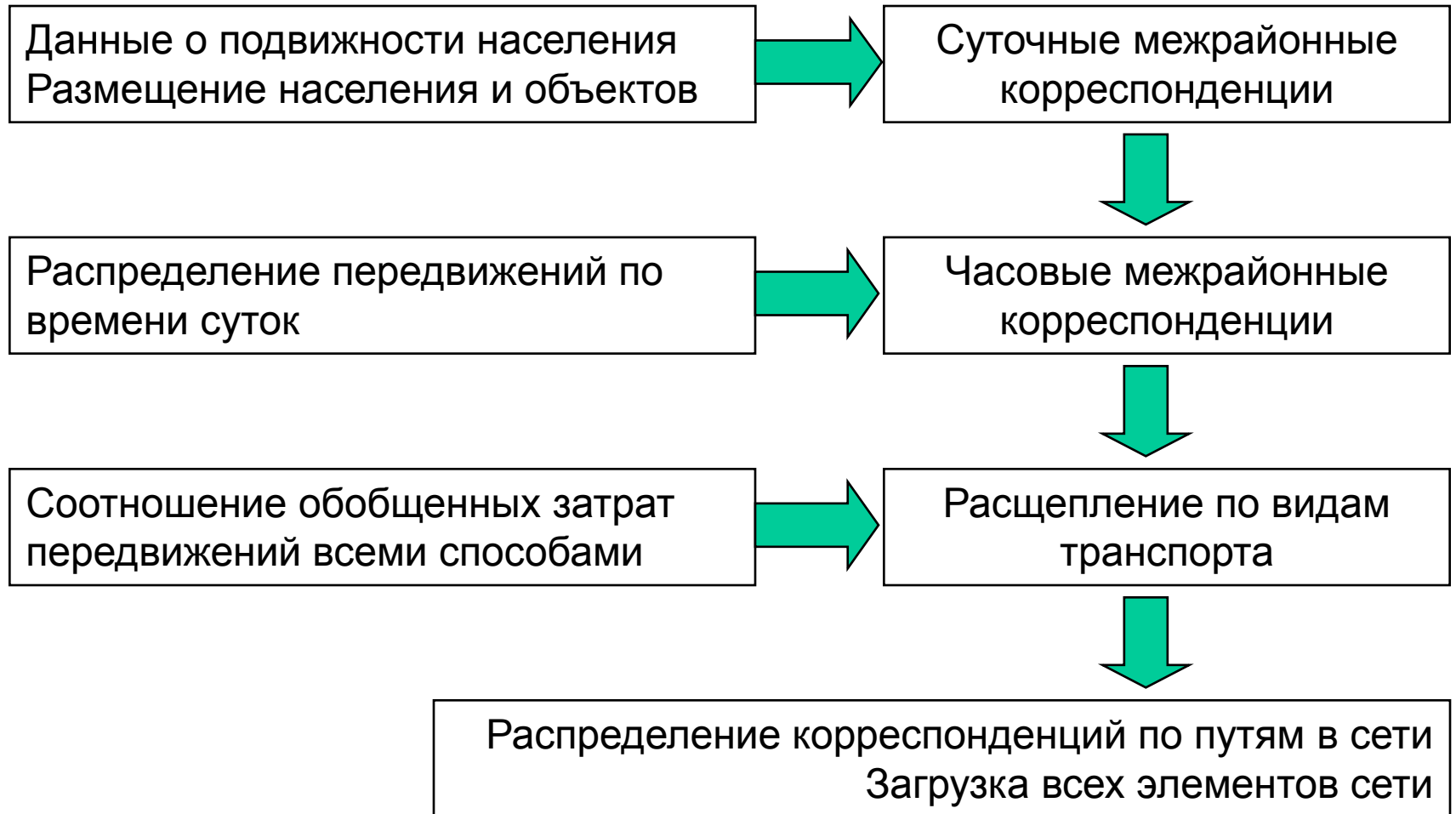
Модель позволяет прогнозировать автомобильные и пассажирские потоки в транспортной сети, включая улично-дорожную сеть, метро, поезда пригородного сообщения.

Моделирование всех видов передвижений: легковые и грузовые автомобили, общественный пассажирский транспорт, пешеходные передвижения. Учет их взаимного влияния.

Моделирование транспортных и пассажирских потоков в разное время суток, в зависимости от дня недели и времени года.

Модель реализована с использованием программного обеспечения TransNet (ИСА РАН Москва)

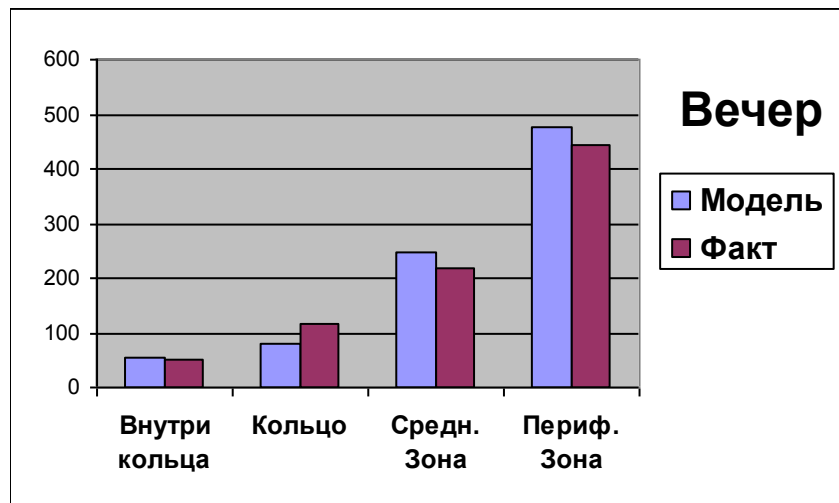
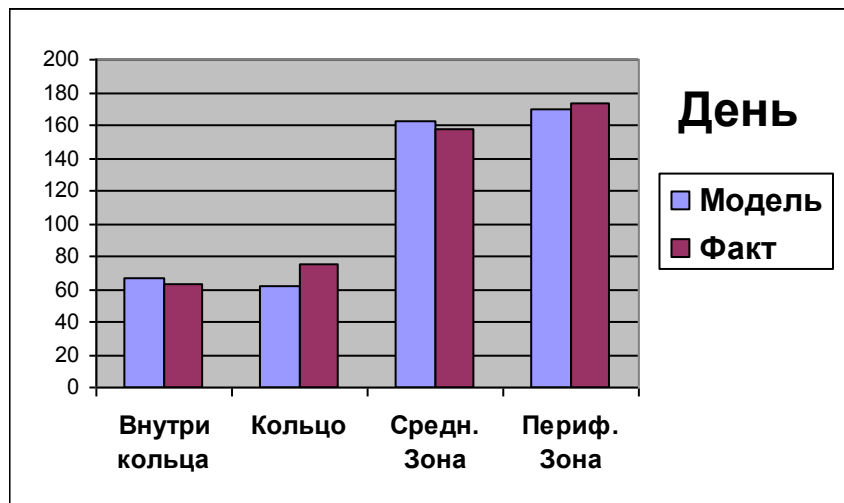
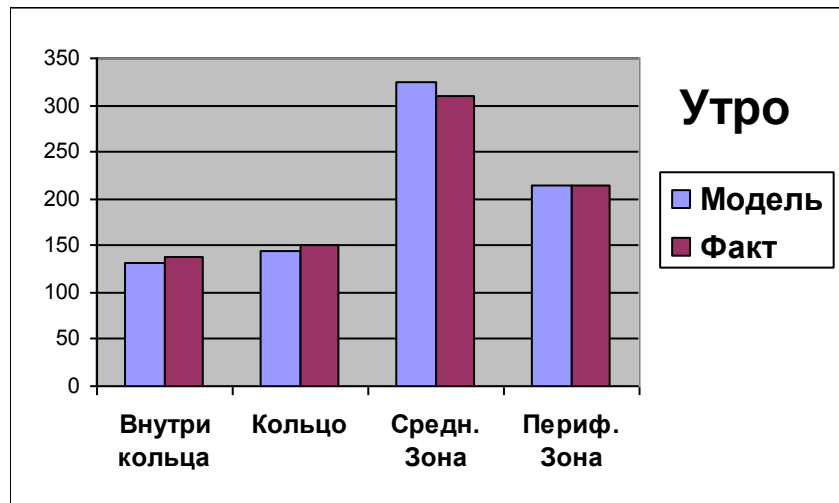
Структура модели



Результаты калибровки модели

Суммарное количество пассажиров, выходящих со станций метрополитена в разное время суток (тыс.чел.)

Показаны суммы по 4 зонам – от центра до окраин

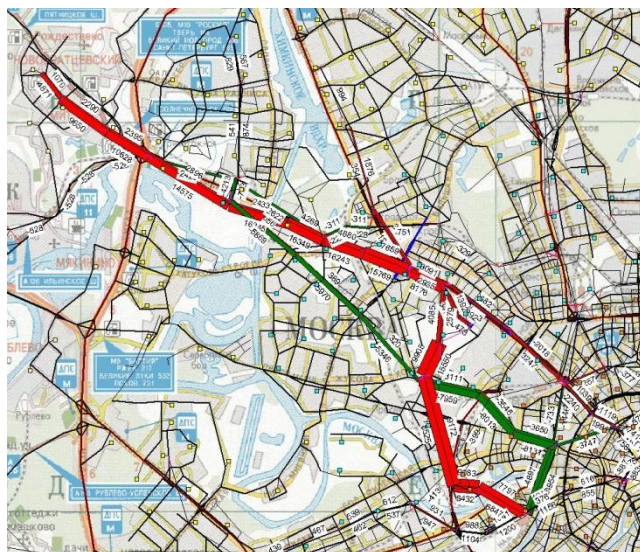


Пример. Скоростной внеуличный транспорт от м. Сокол до Митино

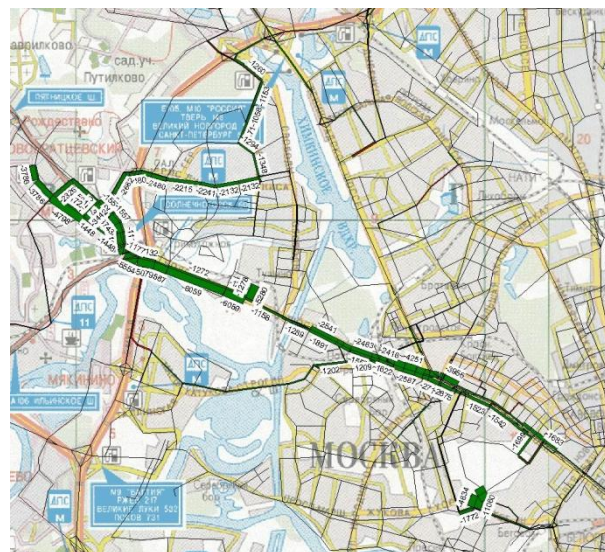
Определение спроса на новую линию.

Прогноз изменения пассажирских потоков.

Линия не дублирует Филевскую.



Внеуличный транспорт



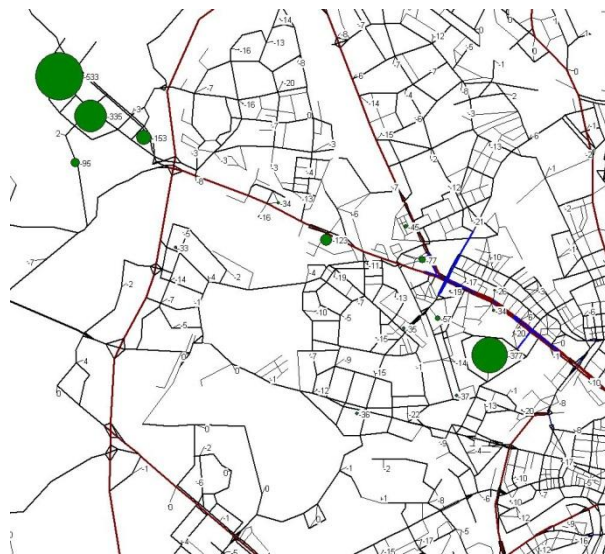
Наземный ОПТ – снижена нагрузка

Влияние на УДС.

Уменьшается выезд из районов на легковом автомобиле.



Уменьшение автомобильных потоков*

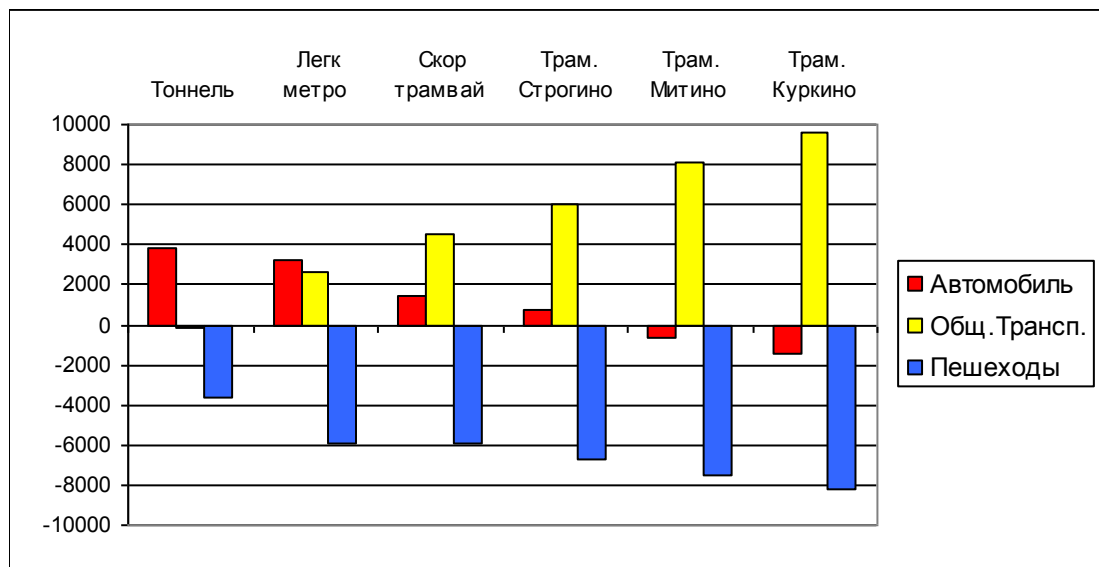


Уменьшение автомобильного выезда из районов

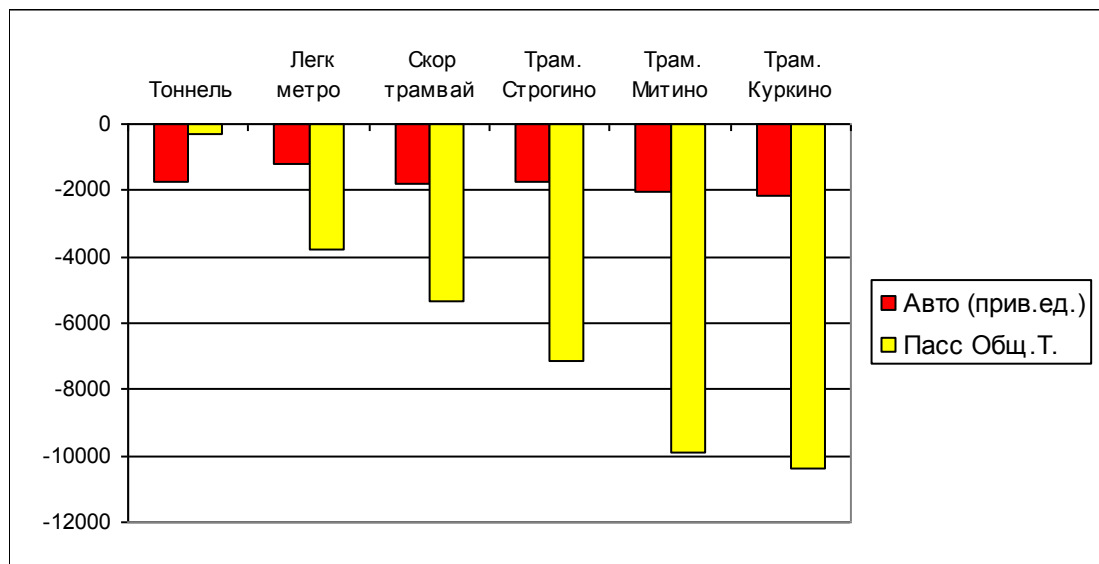
*Произойдет прогнозируемое замещение этих легковых потоков на крупных магистралях.

Пример. Скоростной внеуличный транспорт от м. Сокол до Митино

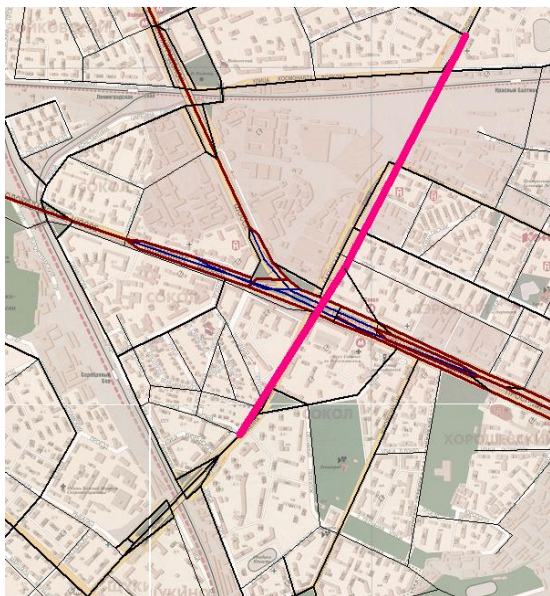
Прогнозируемое изменение структуры пассажирских перевозок в транспортной системе г. Москвы



Прогнозируемое изменение количества автомобилей и пассажиров общественного транспорта, **одновременно находящихся в движении**



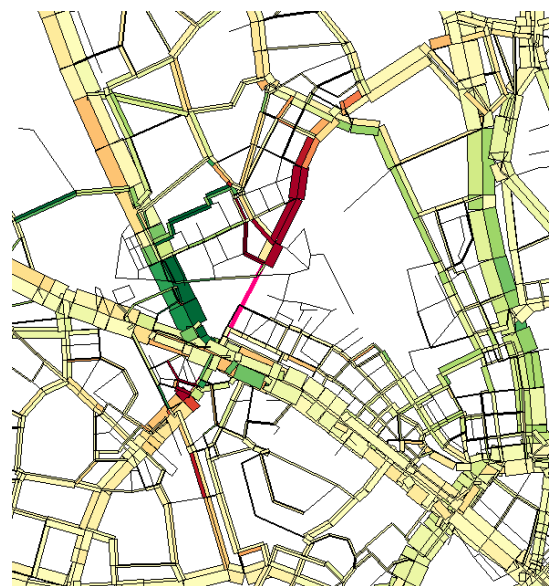
Пример. Моделирование тоннеля в районе М.Сокол



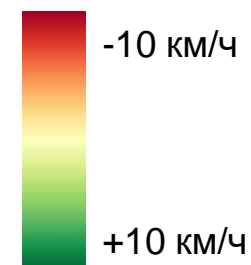
Прогнозируемая
интенсивность
транспортных
потоков
(утро)



Ожидаемое
изменение
интенсивности



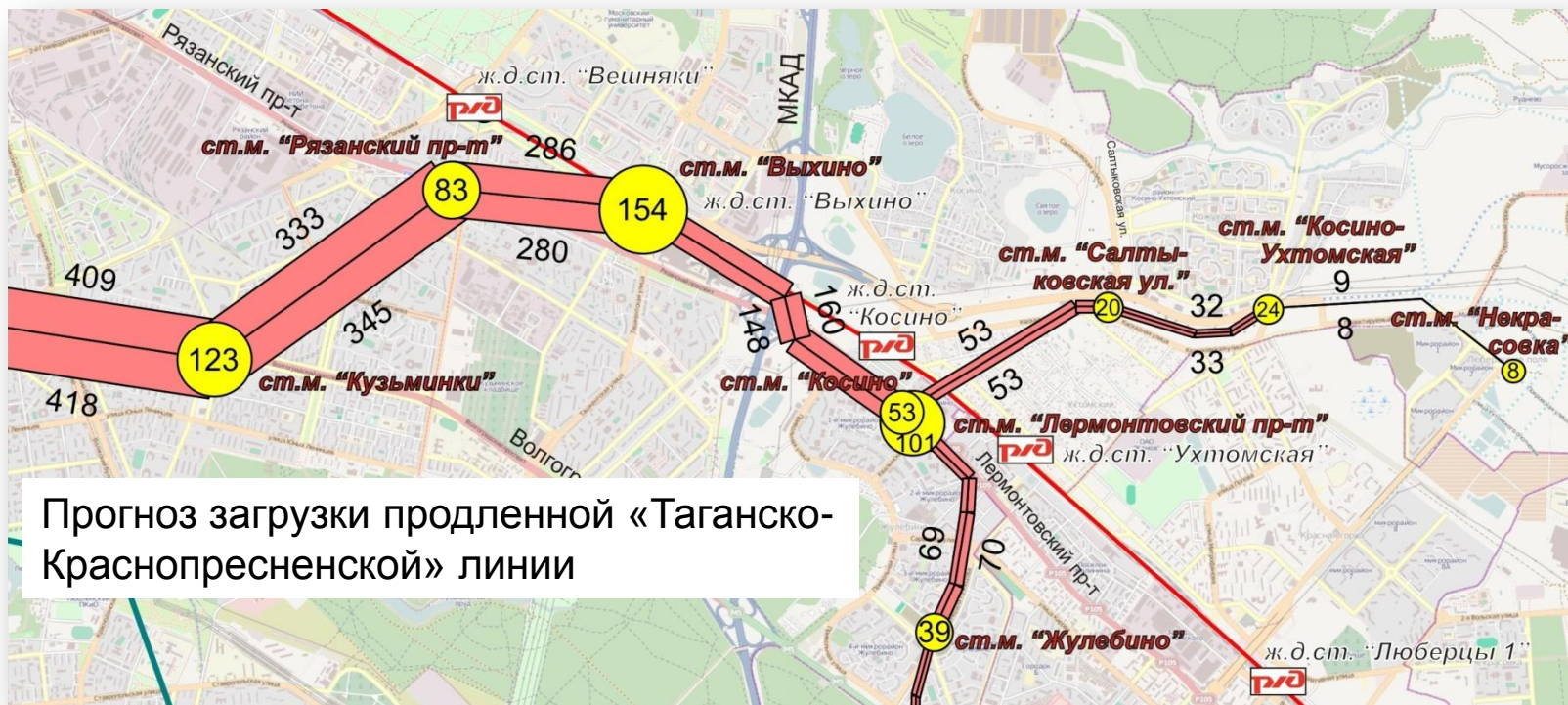
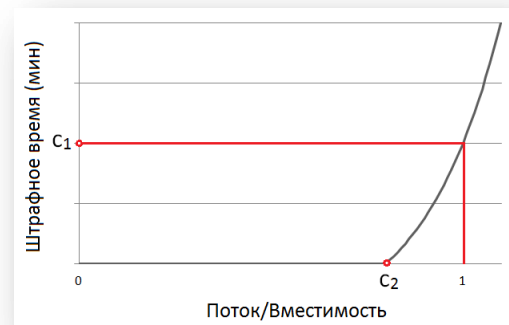
Ожидаемое
изменение
скорости



Алгоритм распределения пассажирских потоков в системе ОПТ

Алгоритм оптимальных стратегий:
модификация с целью учета ограничения по вместимости

Возможная «отрицательная эффективность»
продления перегруженных линий с точки зрения
общесетевых затрат времени



3.1 Эффективность размещения наружной рекламы

Транспортная модель:

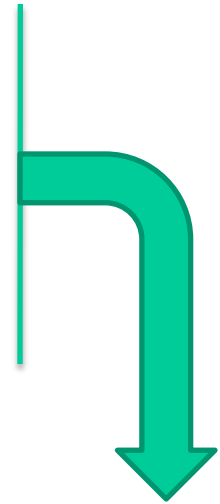
Структура передвижений на всех видах транспорта

Расположение и «видимость» рекламных плоскостей

Дополнительная статистическая модель
«Стратифицированной структуры передвижений»

в динамике по дням

- количество визуальных контактов с плоскостями
- распределение населения по числу контактов (охват)



Классификация передвижений

Слои передвижений – разные цели
Группы населения – разная
подвижность по слоям
Виды транспорта – разные пути



**Динамика
«Охвата»**

Распределение числа контактов при одной поездке

$$\pi^k(n) = \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_n \leq m_k} \frac{v_{i_1}^k}{1 - v_{i_1}^k} \cdots \frac{v_{i_n}^k}{1 - v_{i_n}^k} \prod_{i=1}^{m_k} (1 - v_i^k)$$

$$\pi(n) = \sum_{k=1}^K \alpha_k \pi^k(n).$$

k – вид транспорта,
 α_k – коэффициенты расщепления,
 v_i^k – коэффициенты «видимости»

Передвижения отдельного слоя

$P_i(n, t)$ – распределение по числу контактов n для жителей i -го района

Такт слоя τ – интервал времени, в течение которого все жители совершают в среднем одно передвижение.

«Закрепленные» и «свободные» передвижения

$$P_i^{\text{fix}}(n, k\tau) = \sum_j Q_{ij} \pi_{ij}(n, k), \quad \pi_{ij}(n, k) = \sum_{l=0}^n \pi_{ij}(n-l, k-1) \pi_{ij}(l)$$

$$P_i^{\text{free}}(n, k\tau) = \sum_{l=0}^n P_i^{\text{free}}(n-1, (k-1)\tau) p_i(l), \quad p_i(n) = \sum_j Q_{ij} \pi_{ij}(n).$$

$\pi_{ij}(n, k)$ вероятность n контактов на k передвижениях

$Q_{ij}, \sum_j Q_{ij} = 1$ вероятности совершения поездок (нормированные строки матрицы корреспонденций)

Распределение для слоя общего вида

$$P_i(n, k\tau) = \lambda P_i^{\text{fix}}(n, k\tau) + (1 - \lambda) P_i^{\text{free}}(n, k\tau), \quad 0 \leq \lambda \leq 1.$$

Агрегирование слоев

Интерполяция по времени и свертка распределений

$$P_i^a(n, t) = P_i^a(n, m\tau_a) + (P_i^a(n, (m+1)\tau_a) - P_i^a(n, m\tau_a)) \frac{t - m\tau_a}{\tau_a}$$
$$(m-1)\tau \leq t < m\tau,$$

$$P_i(n, t) = \sum_{l=0}^n P_i^a(l, t) P_i^b(n-l, t), \quad P(n, t) = \sum_i \frac{N_i}{N} P_i(n, t).$$

Расщепление по видам транспорта

- Усреднение распределения с учетом коэффициентов расщепления.
- Необходима стратификация по предпочтениям (минимально: владельцы авто и «безлошадные»)

Различие дней недели

Разные слои передвижений в рабочие и выходные дни.

- Усредненная по неделям динамика
- Динамика с явным учетом дня начала рекламной кампании

3.2 Моделирование платных дорог

Расширение сферы анализа транспортной системы:

- Анализ программ и прогнозов социально-экономического и демографического развития
- Определение сценариев для расчета
- Прогноз интенсивности движения на платных автодорогах
- Анализ эластичности сборов (в зависимости от тарифа), определение оптимальных тарифов и прогноз сборов по годам

Данные для разработки модели

Данные для разработки базовой модели:

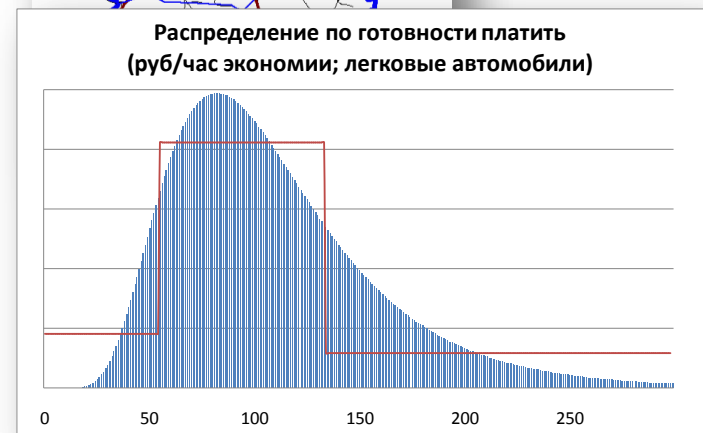
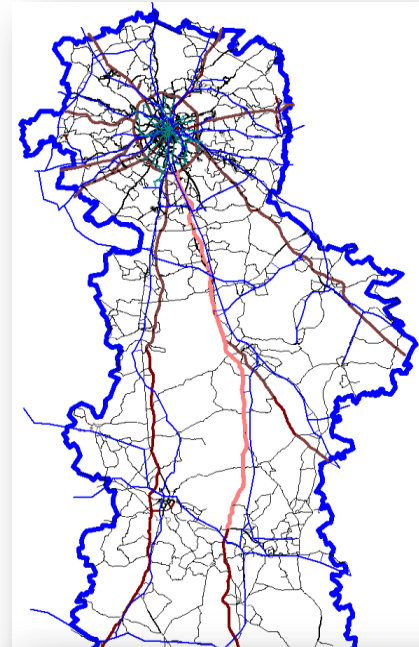
- Геометрия и характеристики транспортной сети
- Социально-экономическое и демографическое наполнение территории
- Социологические исследования транспортного поведения

Данные для калибровки базовой модели:

- Замеры интенсивности
- Опрос корреспонденций

Данные для прогноза интенсивности на платной дороге:

- Социологические исследования готовности вносить плату за проезд



Определение оптимального уровня тарифа

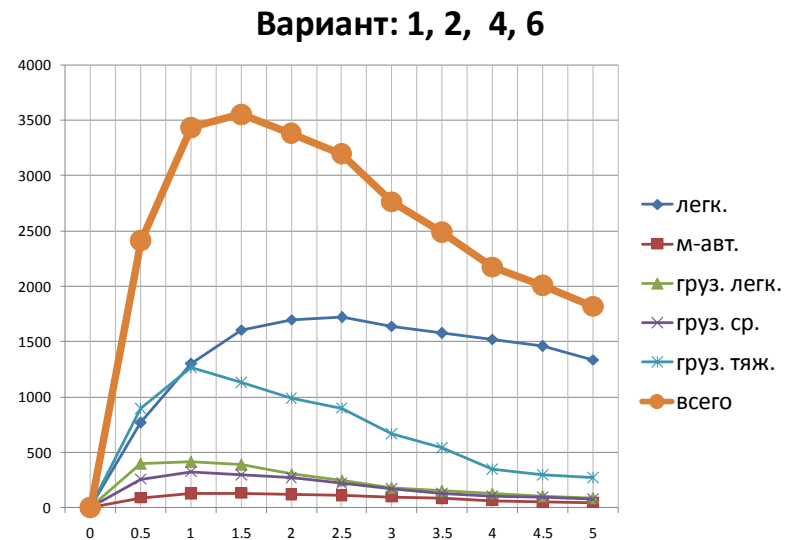
Обобщенные затраты на передвижение:

- Время поездки
- Дополнительные времена (начало движения, парковка и др.)
- Плата за проезд, выраженная в условном «штрафном» времени

Алгоритмы распределения корреспонденций по сети:

- Монокритериальные (средняя цена времени)
- Бикритериальные (непрерывное распределение водителей по готовности платить)

Суммарная прогнозируемая выручка в зависимости от тарифа



4. Программа TransNet

- Графический редактор транспортной сети;
- Средства моделирования;
- Средства представления ВЫХОДНЫХ результатов.

www.isa.ru/transnet

Графический редактор

The screenshot shows the TransNet software interface for Moscow. The window title is "TransNet: Москва [Moscow.tn]". The menu bar includes "Файл", "Редактировать", "Операции", "Карта", "Моделирование", "Сервис", "Данные", and "Помощь". The toolbar contains various editing tools. The left sidebar shows the "Узлы линии" (Line Nodes) table, which is currently selected. The main map area displays a street map with a network of lines and nodes. A context menu is open over a node, listing options: "Редактировать линию", "Параметры дуги...", "Параметры дуг линии...", "Вставить узел...", "Удалить линию...", and "Маршруты...".

Ул.дор. сеть | Внеул. сеть | Районы | Маршруты
Каталог: **Магистраль I класса (центр)**
Линия: **Новый Арбат**

Узлы линии

Узел	X	Y	↓	↑	Пово...
3277	6468	9571	3	3	Авто
3278	6408	9571	3	3	Авто
3279	6349	9571	3	3	Авто
3280	6313	9570	3	3	Авто
3281	6190	9560	3	3	Авто
3282	5717	9533	3	3	Авто ?
3583	5366	9529	3	3	Авто
3089	5323	9530			Авто

Закреть | Помощь

Переход к просмотру/редактированию состава линии | x: 6033 y: 10027

Графический редактор

Параметры дуг улицы

Линия: Комсомольский просп.

1. ВПЕРЕД

4 Число полос
Ценовая функция: Стандартная дуга
18 Скорость ОТ
11.3 Частота ОТ

Признаки:
 Легковой (С)
 Грузовой (Т)
 Полоса общественно
 Развязки
 Въезд в Садовое

1200 Пр.спос. на полосу
60 Своб. скорость
0.5 Занято полосу

Длина дуги (м): 187 Авто

9503

9504

Маршруты

ОК Отмена

Повороты в узле 3083

Узел 3083	1	2	3	4
1. Левшинский Б. п.		Enter		
2. Смоленский б.				ND
3. Неопалимовский 1-й п.				Enter
4. Смоленский б.	Exit	ND		

Светофор
 Авто

В клетках таблицы:
 Ценовые функции
 Цена (мин)

Узел просмотрен

Все авто Все спец

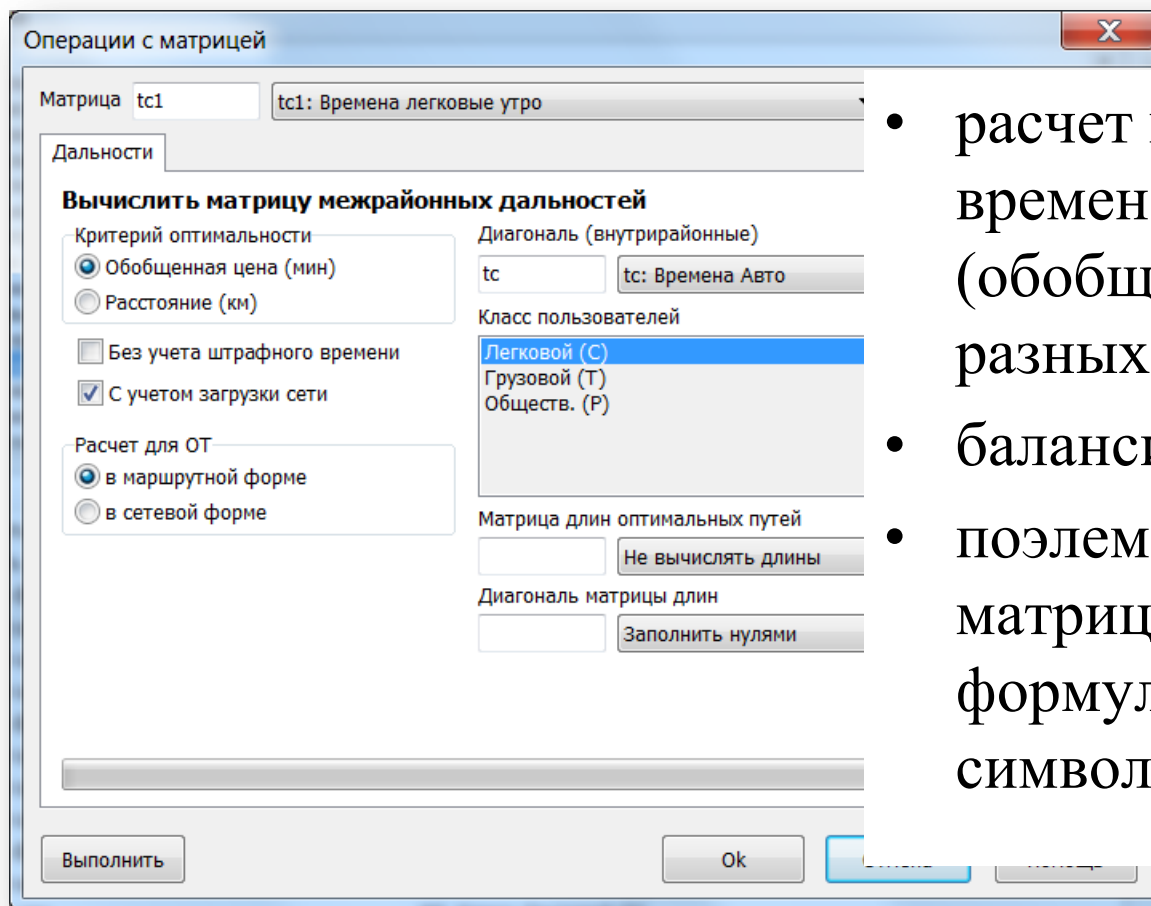
Изменить... ОК Отмена Экспорт... Печать... Настройка... Помощь

Средства моделирования

- Синтаксический анализатор выражений (расчетные формулы в символьном виде).
- Блок матричных вычислений.
- Расчет загрузки: встроенные алгоритмы распределения корреспонденций по путям в сети.
- Методика определения обобщенной цены всех элементов транспортной сети в широких пределах выбирается пользователем.
- Командные файлы для выполнения расчетов в «пакетном» режиме.

Блок матричных вычислений

Возможна любая методика расчета матриц корреспонденций, реализуемая операциями:



Операции с матрицей

Матрица tc1 tc1: Времена легковые утро

Дальности

Вычислить матрицу межрайонных дальностей

Критерий оптимальности

Обобщенная цена (мин)

Расстояние (км)

Без учета штрафного времени

С учетом загрузки сети

Расчет для ОТ

в маршрутной форме

в сетевой форме

Диагональ (внутрирайонные)

tc tc: Времена Авто

Класс пользователей

Легковой (С)

Грузовой (Т)

Обществ. (Р)

Матрица длин оптимальных путей

Не вычислять длины

Диагональ матрицы длин

Заполнить нулями

Выполнить Ok

- расчет матриц межрайонных времен и расстояний (обобщенных затрат для разных видов транспорта);
- балансировка матриц;
- поэлементное вычисление матриц по произвольным формулам (вводятся в символьном виде).

Расчет загрузки сети

Расчет загрузки УДС

Распределить матрицы корреспонденций

Класс пользователей	Матрица корреспонденций	Пути
Легковой (С)	k1с: Корресп утро легк	
Грузовой (Т)	k1т: Корресп утро груз	

Настроить

Сделано: 200 (Макс.)

Достигнута: Требуемая

Точность: 0.1

Состояние

Настройка расчета

Алгоритм

Франке-Вульфа

Балансировка путей

Вклад ОТ в приведенный поток

Не учитывать

Взять частоты движения на дугах

Взять частоты движения из маршрутов

Без учета штрафного времени

Инициализация (с чего начать?)

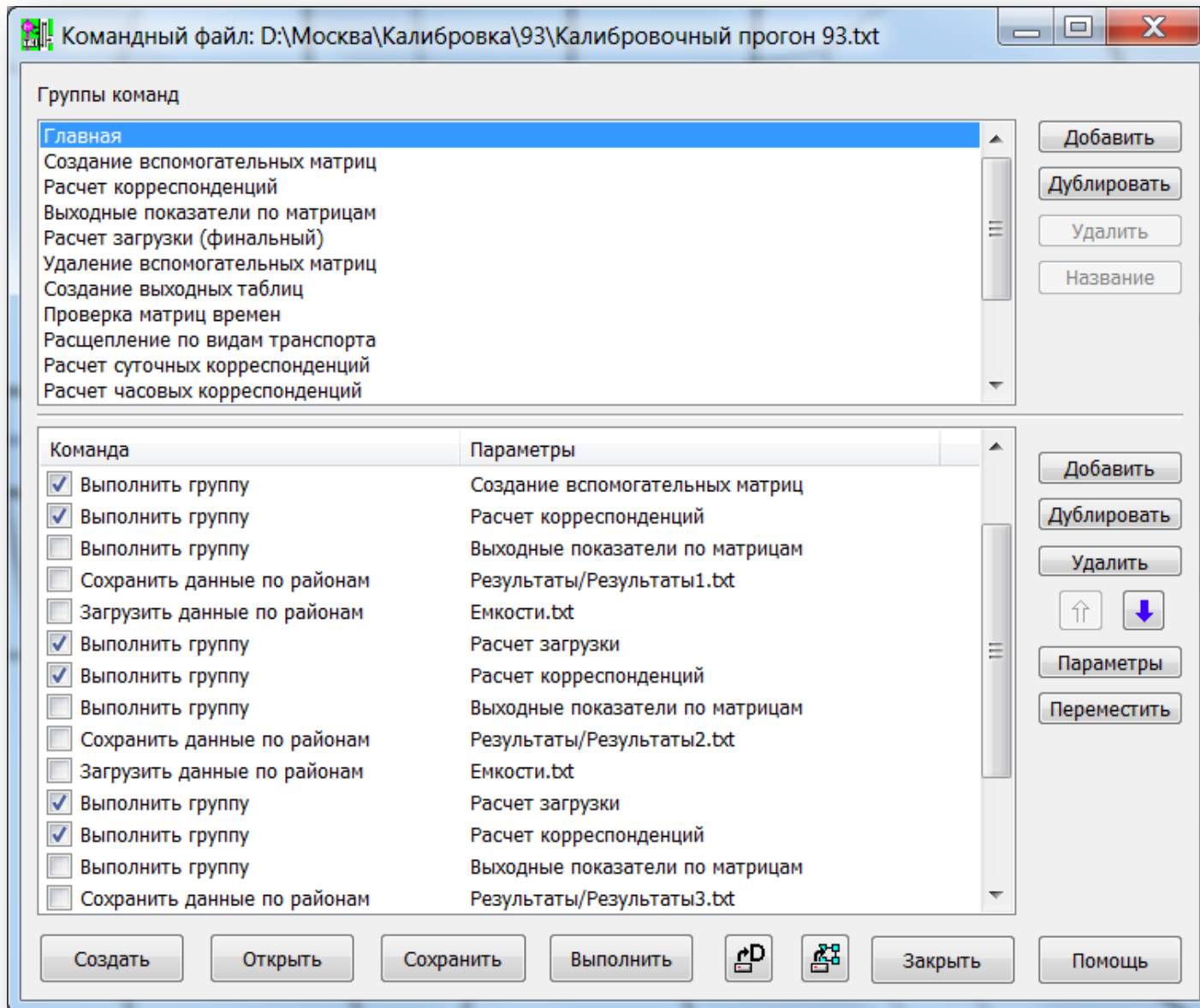
С пустой сети

С ранее рассчитанной загрузки

Дополнительно

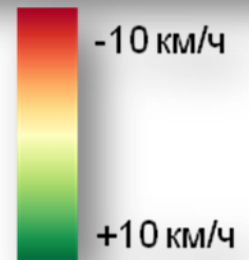
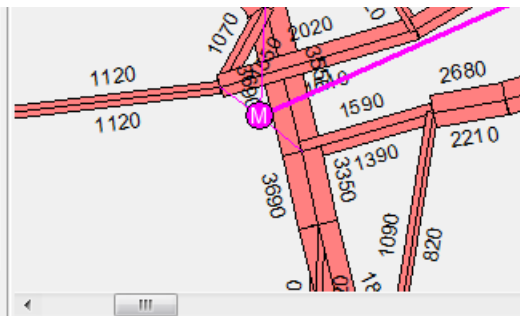
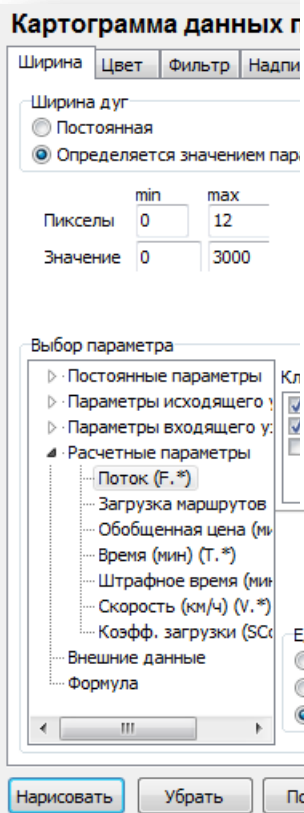
- Автомобильные потоки: равновесное распределение.
- Пассажирские потоки: «сетевая» и «маршрутная» форма (алгоритм оптимальных стратегий, возможность учета вместимости).

Командный файл

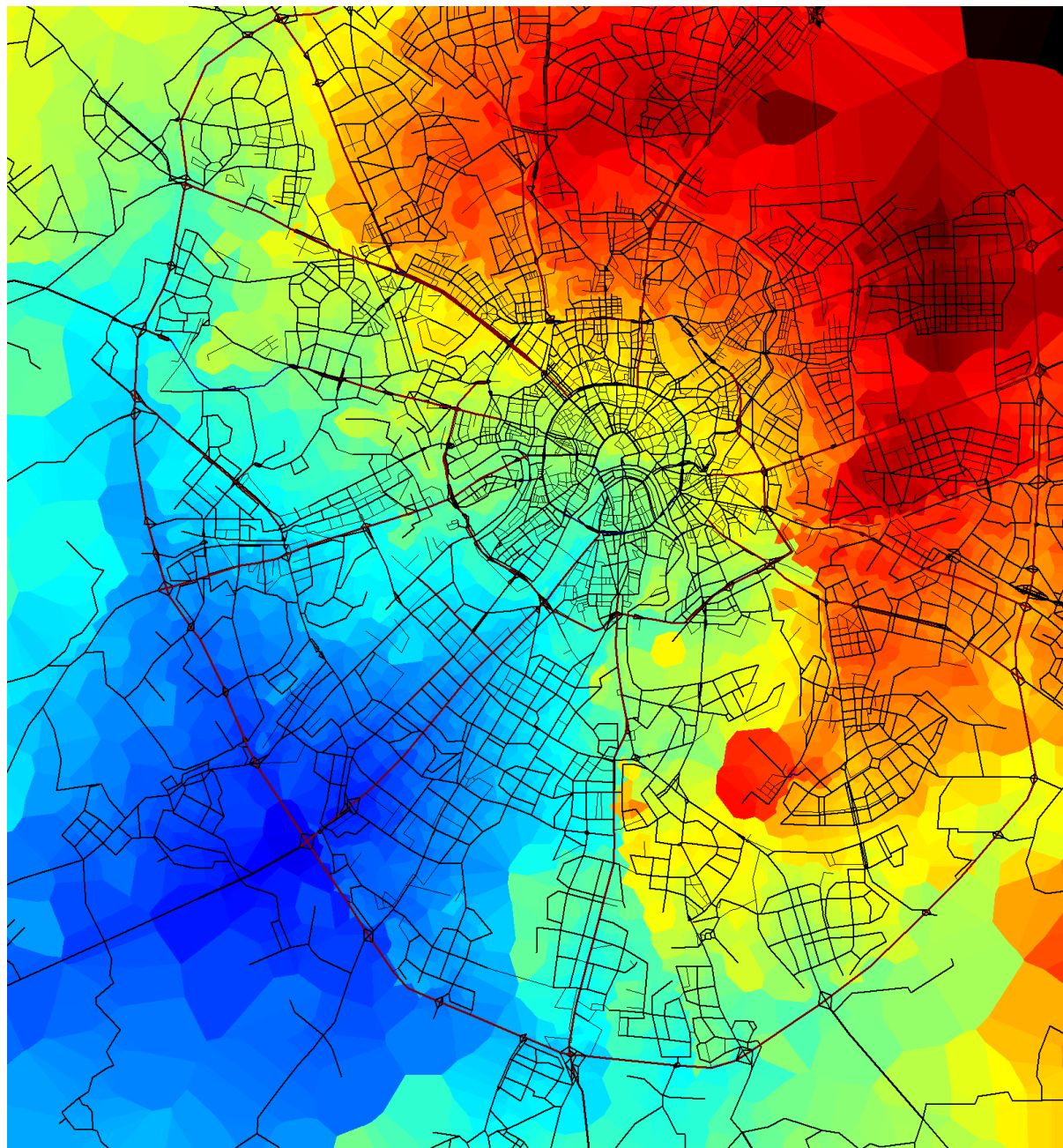


Представление результатов

- Графическое представление данных на карте.
- Выходные таблицы данных (произвольно настраиваются).
- Печать и экспорт в графические файлы фрагментов сети и схем перекрестков.
- Агрегированные показатели, функции распределения передвижений по дальности, времени и др.



Время
движения из
выбранного
района
(«изохроны»)



Примеры применения

Модель Москвы. 2000-2012. Институт Системного Анализа РАН совместно с Центром исследований транспортной инфраструктуры и привлеченными экспертами Российской академии архитектуры и строительных наук. Десятки выполненных проектов.

Прогноз интенсивности движения и сборов на платных дорогах
2012. Модели платных участков М4 (21-225км) и М7 ("Обход Ногинска"). КИК "ТрансПроект".

Модель Нижнего Новгорода. 2007-2008, 2012 гг. ИСА РАН по заказу ГУП НИиПИ Генплана Москвы. Модель использована при разработке генерального плана Нижнего Новгорода.

Модель Омска. 2006-2007 гг. ИСА РАН по заказу ОАО ТПИ «Омскгражданпроект». Модель использована при разработке генерального плана г. Омска.