

Прогноз автомобильных и пассажирских потоков в транспортных системах крупных городов

В.И.Швецов

Институт Системного Анализа РАН

1. Краткая функциональная классификация транспортных моделей.
2. Прогноз автомобильных и пассажирских потоков в транспортных системах крупных городов.
3. Практические примеры: транспортная модель Москвы и Московской области.

Функциональная классификация математических моделей транспортных потоков

Имитационные модели

- Средние потоки → динамическая имитация

Прогнозные модели

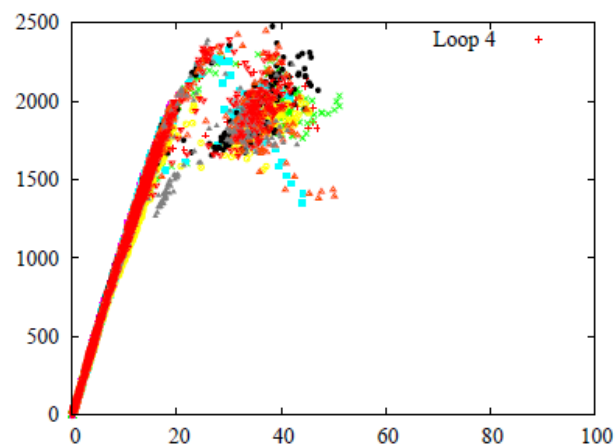
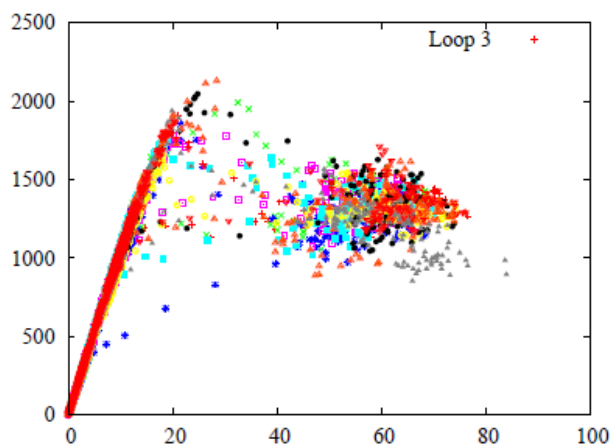
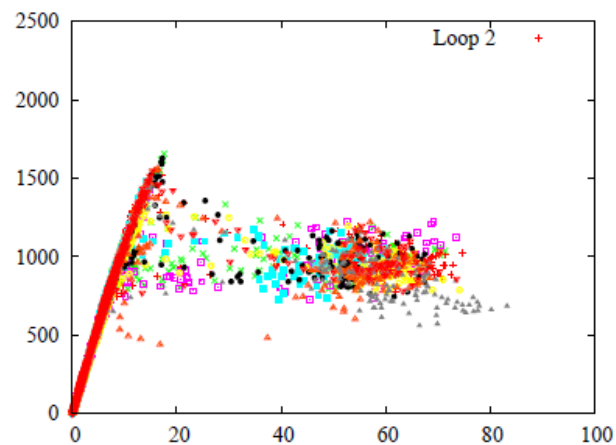
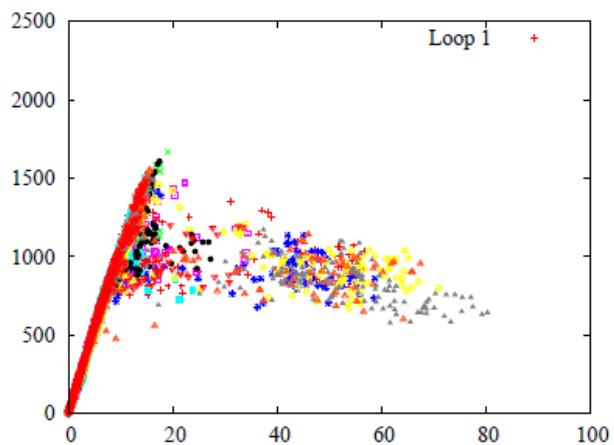
- Город и инфраструктура → средние потоки

Оптимизационные модели

- Как улучшить город и инфраструктуру?

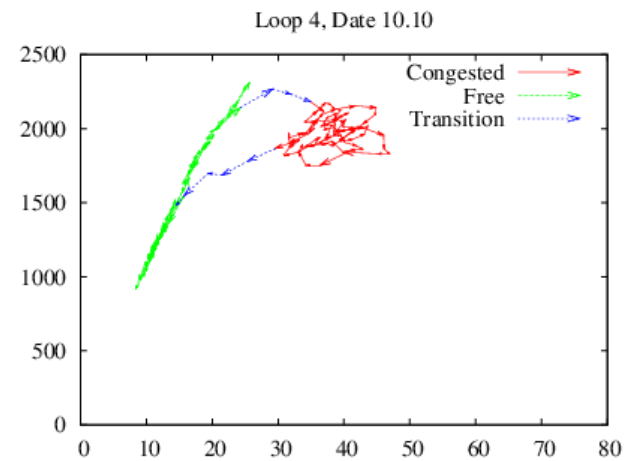
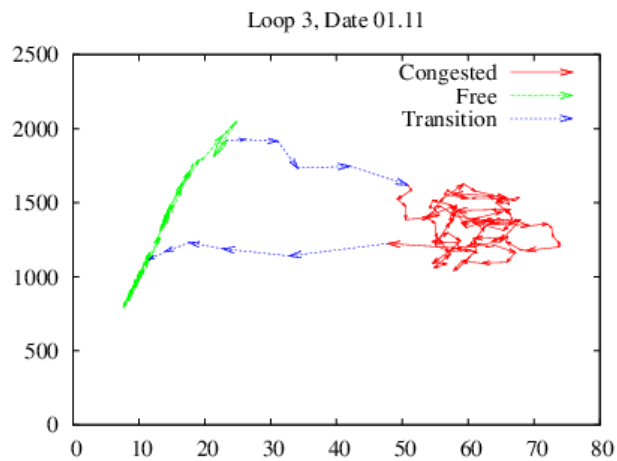
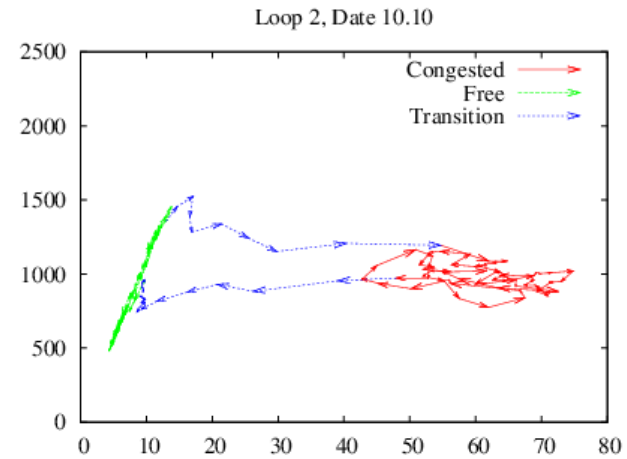
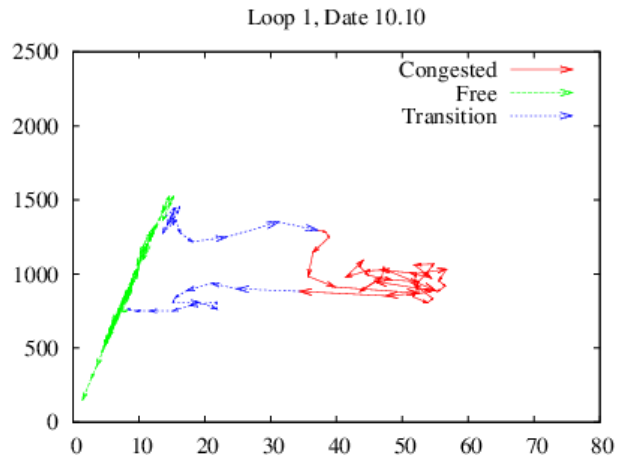
Фундаментальная диаграмма

Разные места и даты измерения

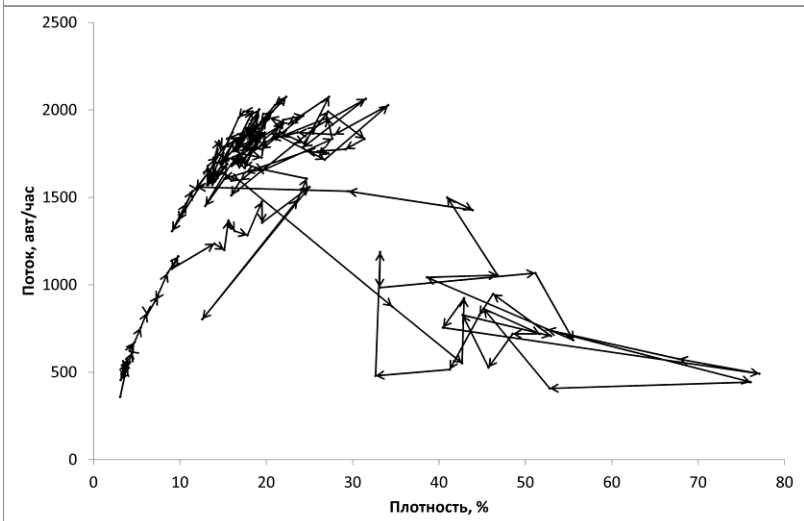
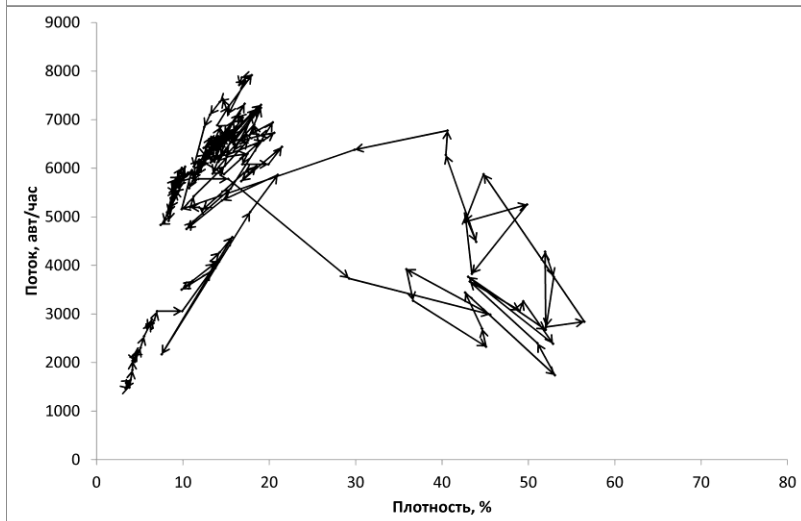
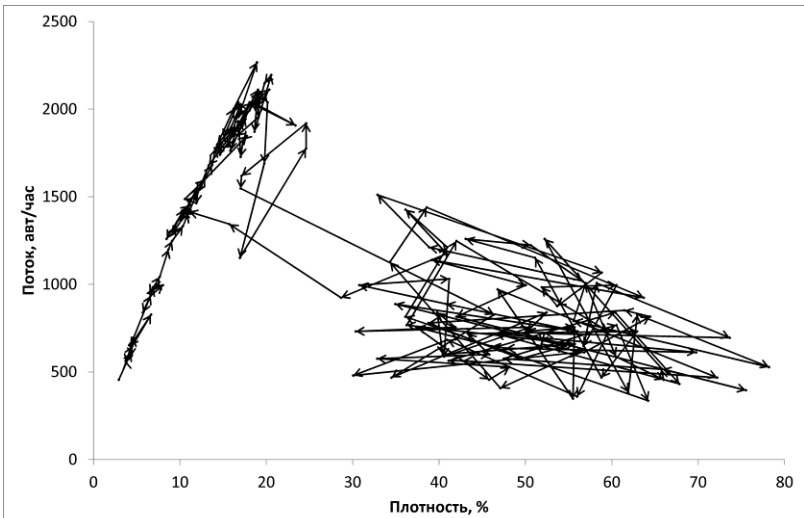
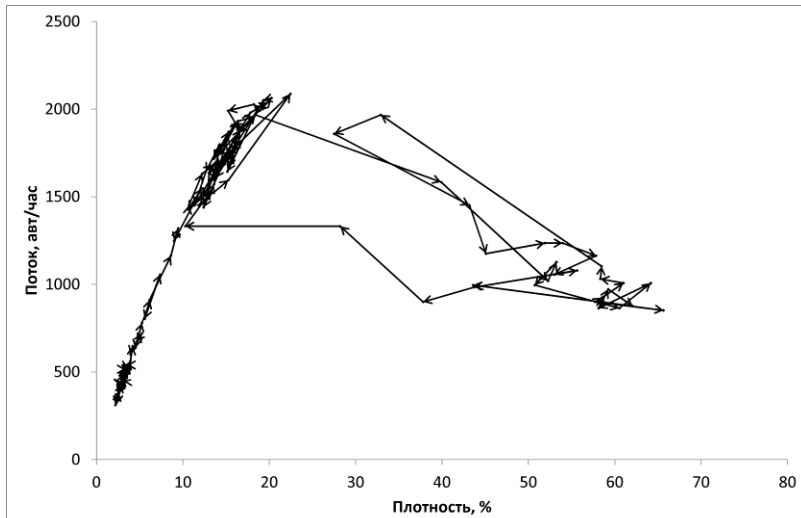


Фазовый переход

Разные места и даты измерения

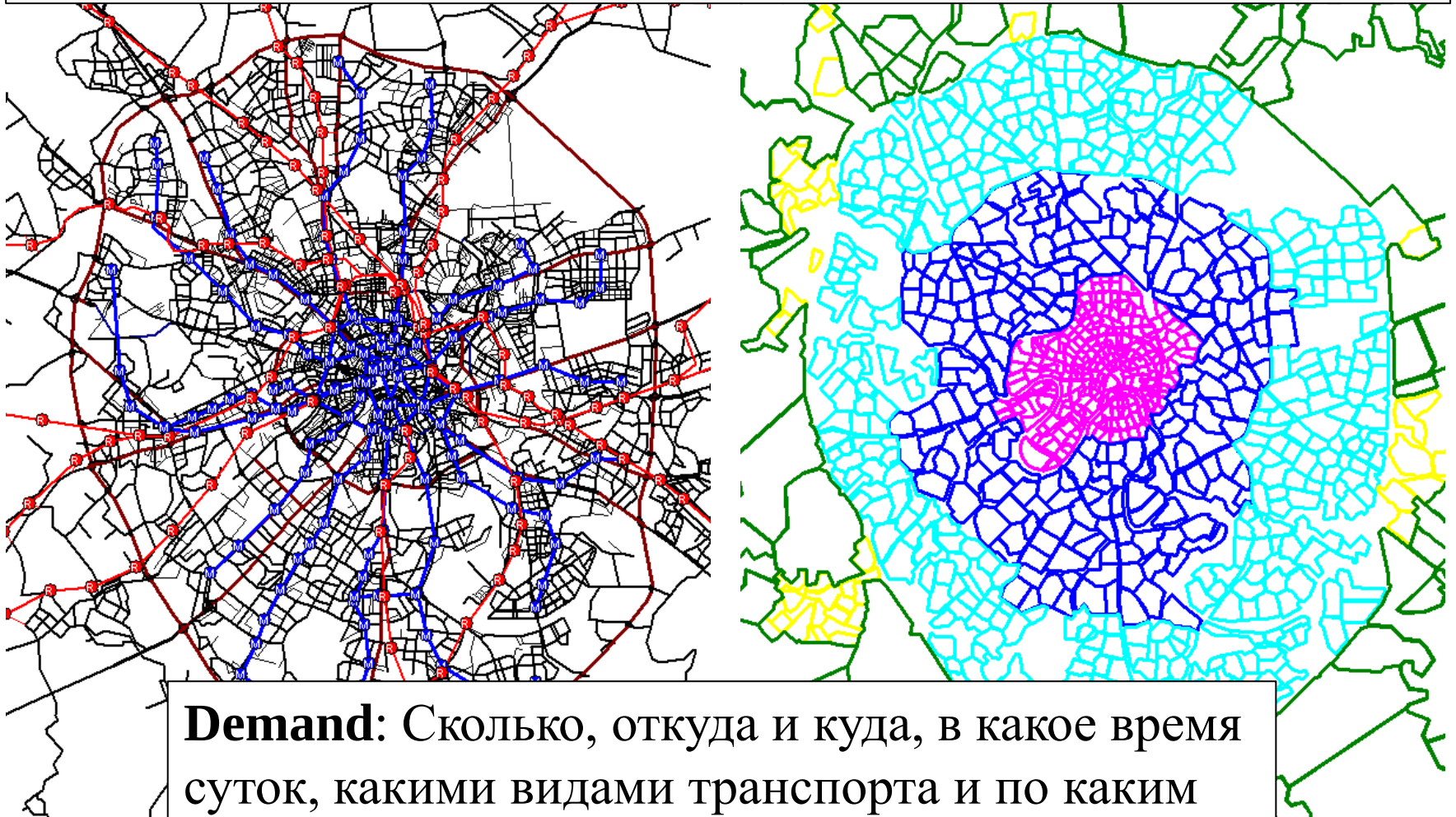


Данные для Московских дорог



Прогноз транспортных потоков

Supply: Транспортная инфраструктура, размещение населения и объектов



Demand: Сколько, откуда и куда, в какое время суток, какими видами транспорта и по каким путям будет совершено передвижений?

4-шаговая схема прогнозирования потоков



Обобщенная цена передвижения

- Время передвижения
- Денежные затраты
- Условные «штрафные» добавки времени

Обобщенная цена зависит от загрузки

Матрицы корреспонденций

Гравитационная модель: корреспонденция между районами растет с увеличением районов и убывает с ростом «удалённости» районов

$$f_{ij} = A_i B_j O_i D_j g(c_{ij})$$

$$O_i = \sum_j f_{ij}, \quad D_j = \sum_i f_{ij}$$

O_i – объем отправления;

D_j – объем прибытия;

c_{ij} – «удалённость»

$g(c_{ij})$ – функция тяготения

Мера «удалённости» районов – обобщенная цена передвижения

Матрицы корреспонденций

Энтропийная модель: реализуется распределение корреспонденций с наибольшим статистическим весом

$$H(f) = \sum_{i,j} f_{ij} \ln \left(\frac{f_{ij}}{\nu_{ij}} \right), \quad f = \{f_{ij} | i, j \in R\}.$$

$$F = \operatorname{argmax}(H(f)), \quad f = \{f_{ij} | i, j \in R\},$$

$$\sum_{j \in R} f_{ij} = O_i, \quad \sum_{i \in R} f_{ij} = D_j, \quad f_{ij} \geq 0,$$

$$g_n(f) = 0, \quad h_m(f) \leq 0$$

ν_{ij} — «априорные» вероятности

Выбор способа передвижения

Стандартные способы передвижения:

- пешком,
- на общественном транспорте,
- на автомобиле.

Теория дискретного выбора:

$$S_{ij}^k = \frac{e^{-\alpha^k c_{ij}^k + \beta^k}}{\sum_m e^{-\alpha^m c_{ij}^m + \beta^m}}$$

S_{ij}^k – доля использующих
способ k ;

c_{ij}^k – обобщенная цена
передвижения способом k ;

Цепочки передвижений

Trip-based.

- «Дом-Работа»
- «Работа-Магазин»
- «Магазин-Дом»

Tour-based.

- «Дом-Работа-Дом»
- «Дом-Работа-Магазин-Дом»

Activity-based.

- «Дом-Работа-Дом»
- «Дом-Работа-Магазин-Дом»
- «Дом-Работа-Дом»; «Дом-Магазин-Дом»

Обобщенная цена для всей цепочки + время дня каждого звена

Типичная структура модели активности

Выбор схемы дневной активности

- количество цепочек,
- количество промежуточных целей в каждой цепочке

Выбор основной цели (для каждой цепочки)

- расположение цели,
- основной способ передвижения,
- время начала

Выбор промежуточной цели (для каждого звена)

- расположение цели,
- способ передвижения,
- время начала

Численная реализация: метод Монте-Карло.
Число испытаний == Реальное число жителей

Распределение по сети

Задача распределения потоков

- набор используемых путей для каждой пары районов
- расщепление корреспонденций по используемым путям

Статические и динамические модели

Основные модели

- равновесное распределение (User equilibrium assignment)
- оптимальные стратегии (Optimal strategy assignment)

Распределение автомобильных ПОТОКОВ

Каждый участник движения стремится избрать путь с минимальной обобщенной ценой.

Принцип равновесия

В состоянии равновесия ни один участник движения не может изменить свой путь так, чтобы уменьшить обобщенную цену своего пути.

Поиск равновесного распределения

Гипотеза. Обобщенная цена движения по дуге является неубывающей функцией потока на этой дуге $c_a = c_a(u_a)$

Системная оптимизация:

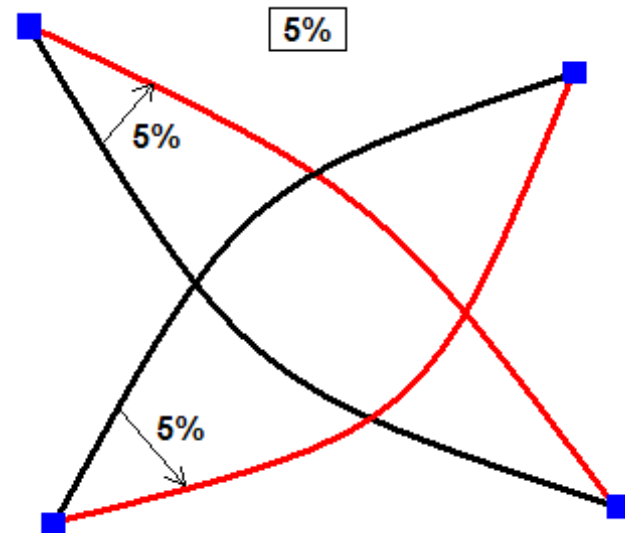
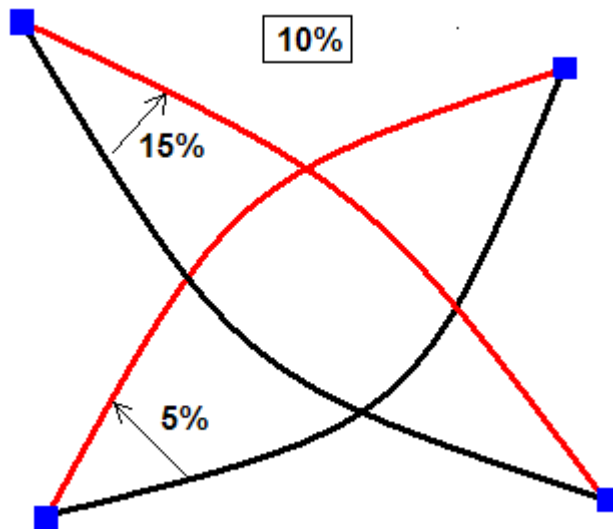
$$\sum_a c_a(u_a)u_a \rightarrow \min$$

Индивидуальная оптимизация;

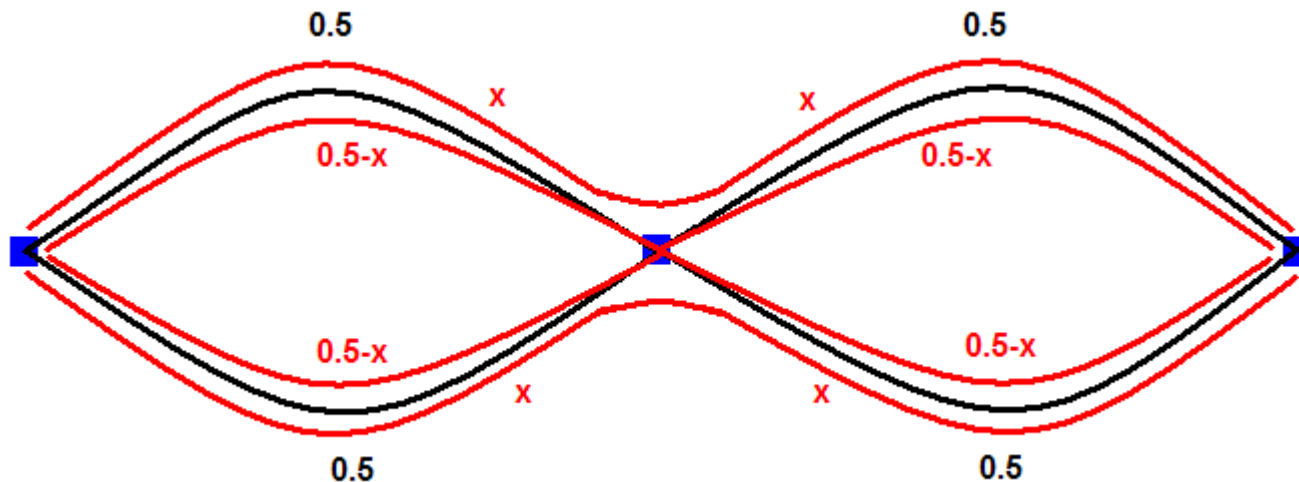
$$\sum_a \int_0^{u_a} c_a(v)dv \rightarrow \min$$

Критика равновесного распределения.

Алгоритм Франке-Вульфа



Неоднозначность равновесного распределения



- Равновесное распределение единственно в терминах суммарных потоков на дугах.
- Каждому распределению потоков по дугам соответствует линейное пространство порождающих распределений по путям.

Типы алгоритмов распределения

- **Link-based.** Потоки на дугах (Франке-Вульфа)
Достоинство: используются только суммарные потоки на дугах от предыдущих итераций.
Недостатки: неравномерная по дугам сходимость, эффект «застревающих» потоков.
- **Route-based.** Потоки на межрайонных путях
Серьезные требования к ресурсам компьютера.
- **Origin-based.** В терминах потоков «из общего источника»
Промежуточный вариант. Устраняет «застрявшие» потоки.

Энтропийная модель

«Настоящее» распределение по путям должно
максимизировать энтропию

u_a^* - равновесные значения потоков на дугах;

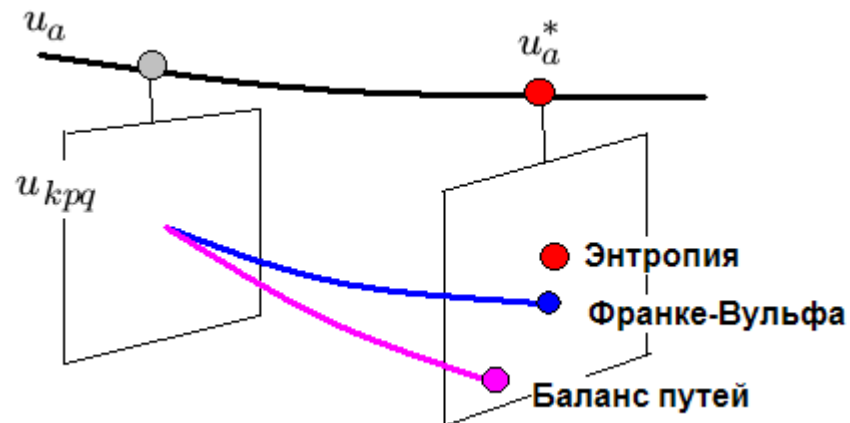
f_{pq} - корреспонденция из p в q .

$$\sum_{p,q} \sum_{k \in K_{pq}} \left(u_{kpq} \ln \left(\frac{u_{kpq}}{f_{pq}} \right) - u_{kpq} \right) \rightarrow \max;$$

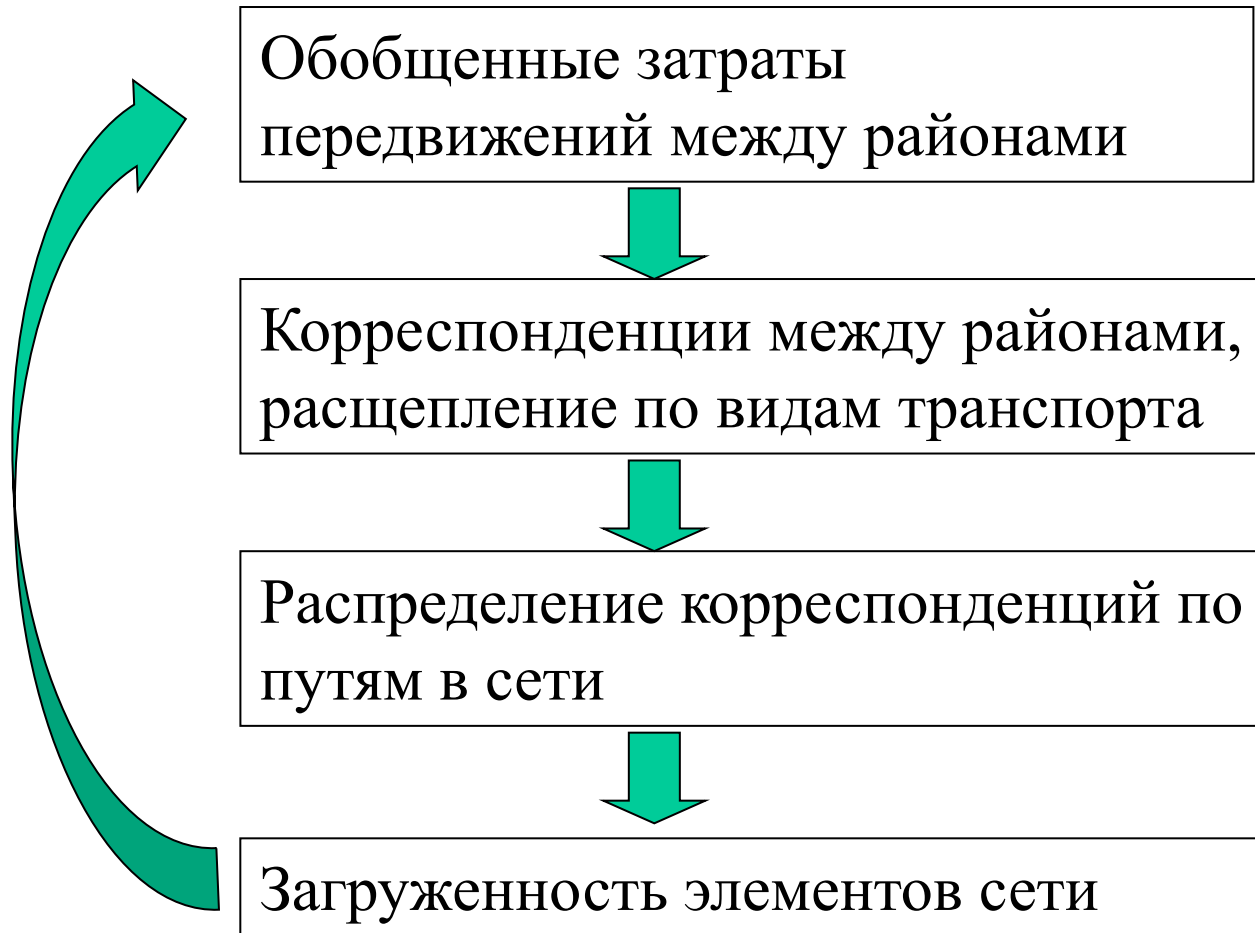
$$\sum_{p,q} \sum_{k \in K_{pq}} u_{kpq} = u_a^*,$$

$$\sum_{k \in K_{pq}} u_{kpq} = f_{pq},$$

$$u_{kpq} \geq 0.$$

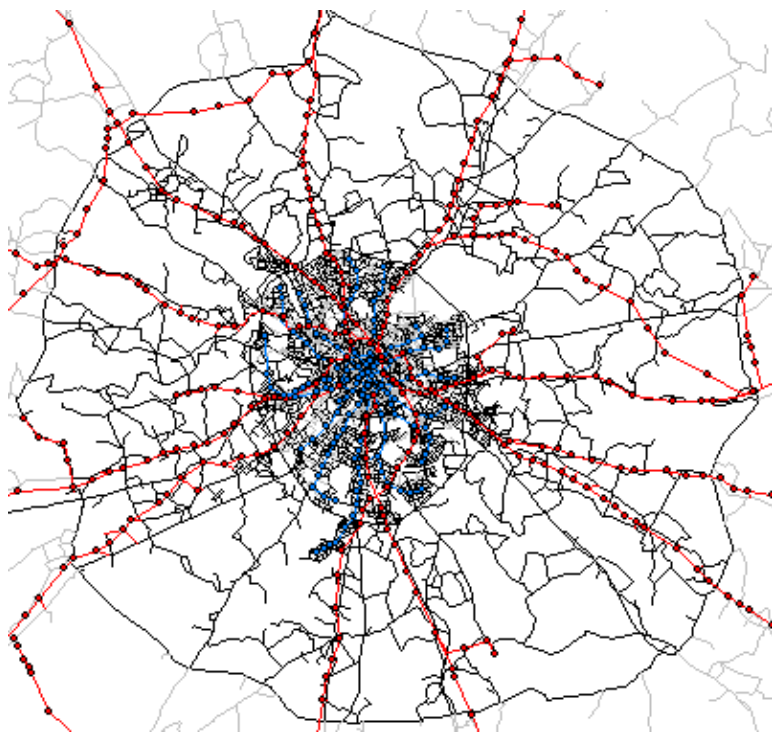


Обратная связь



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



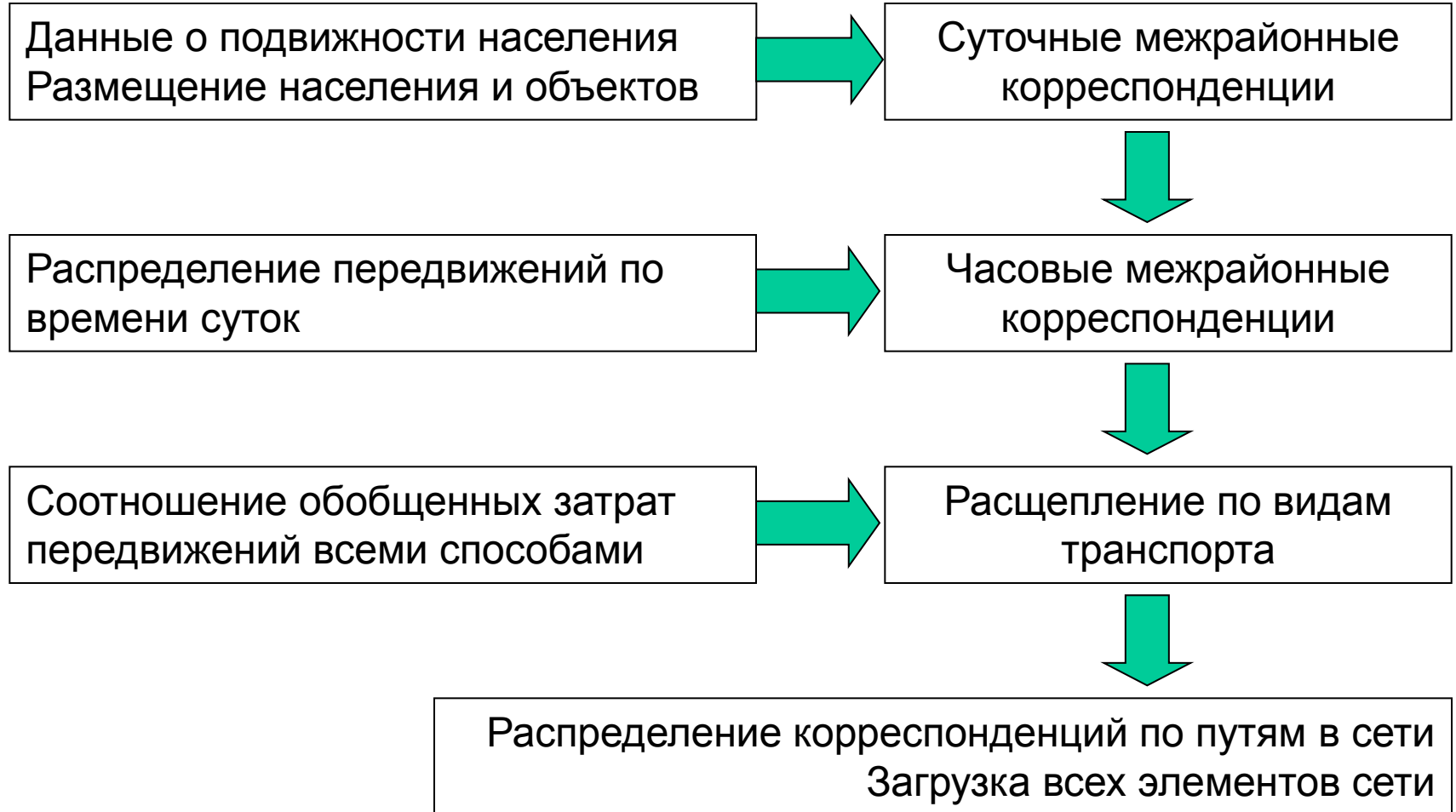
Модель позволяет прогнозировать автомобильные и пассажирские потоки в транспортной сети, включая улично-дорожную сеть, метро, поезда пригородного сообщения.

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 (ИКА РАН Москва)

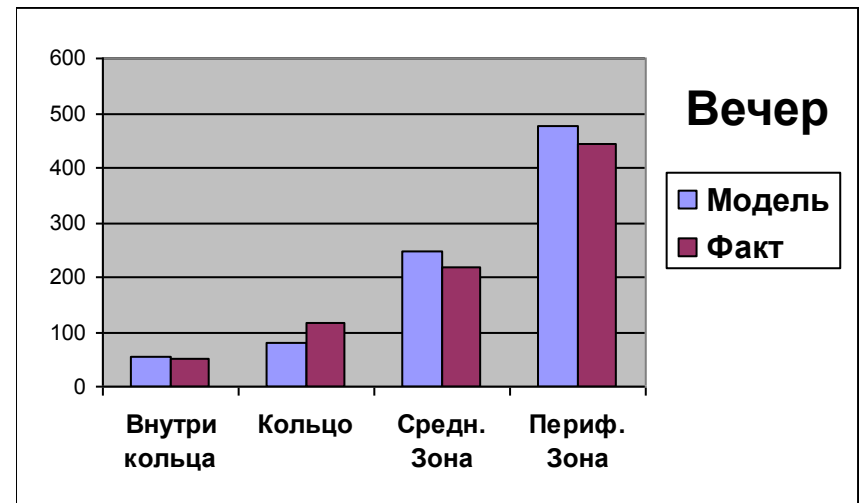
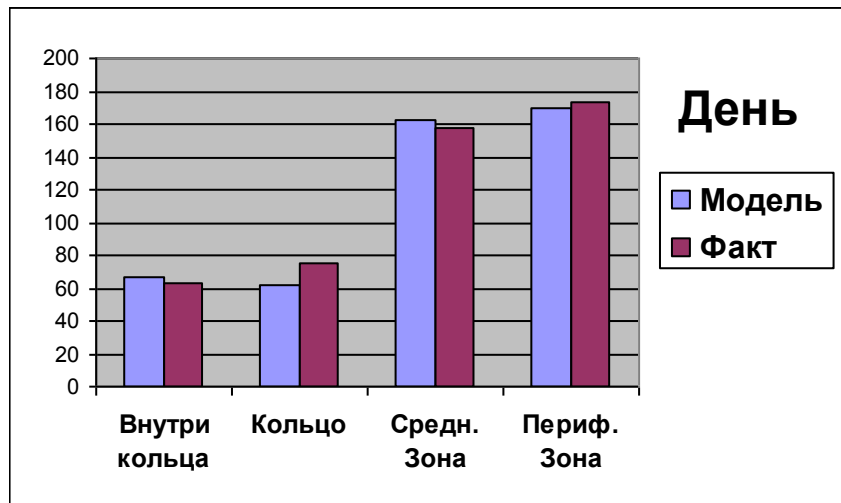
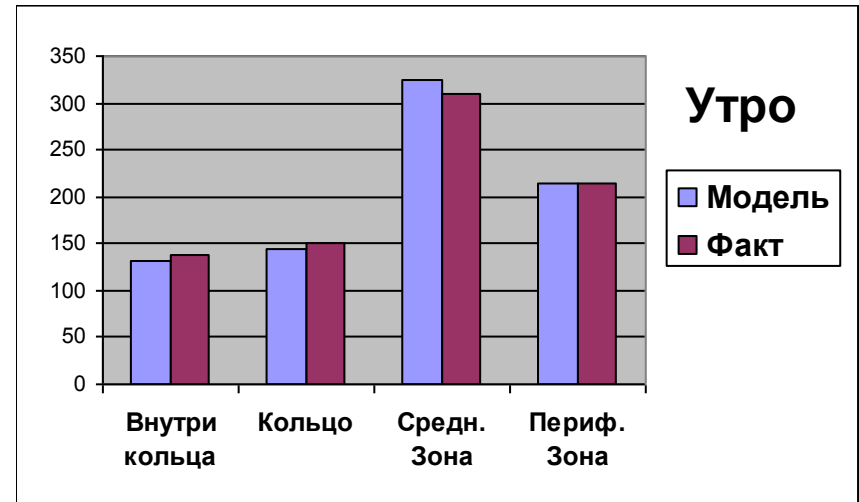
Структура модели



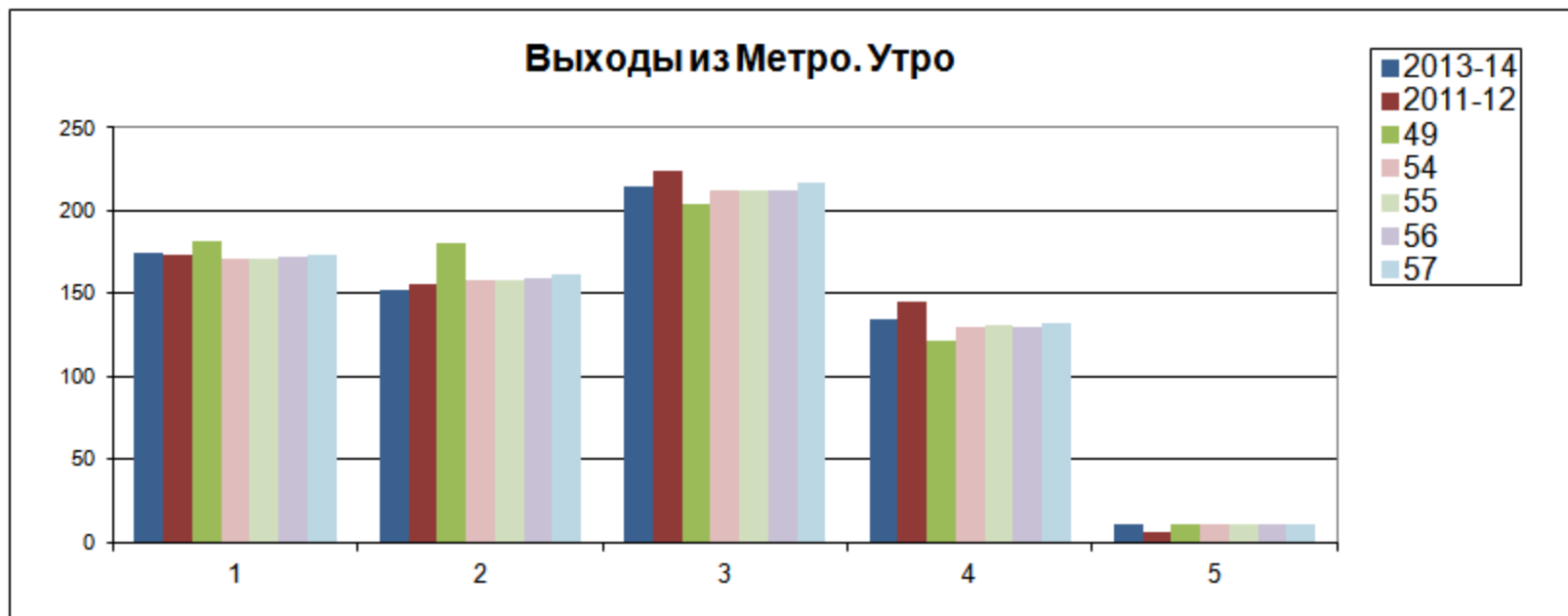
Результаты калибровки модели

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

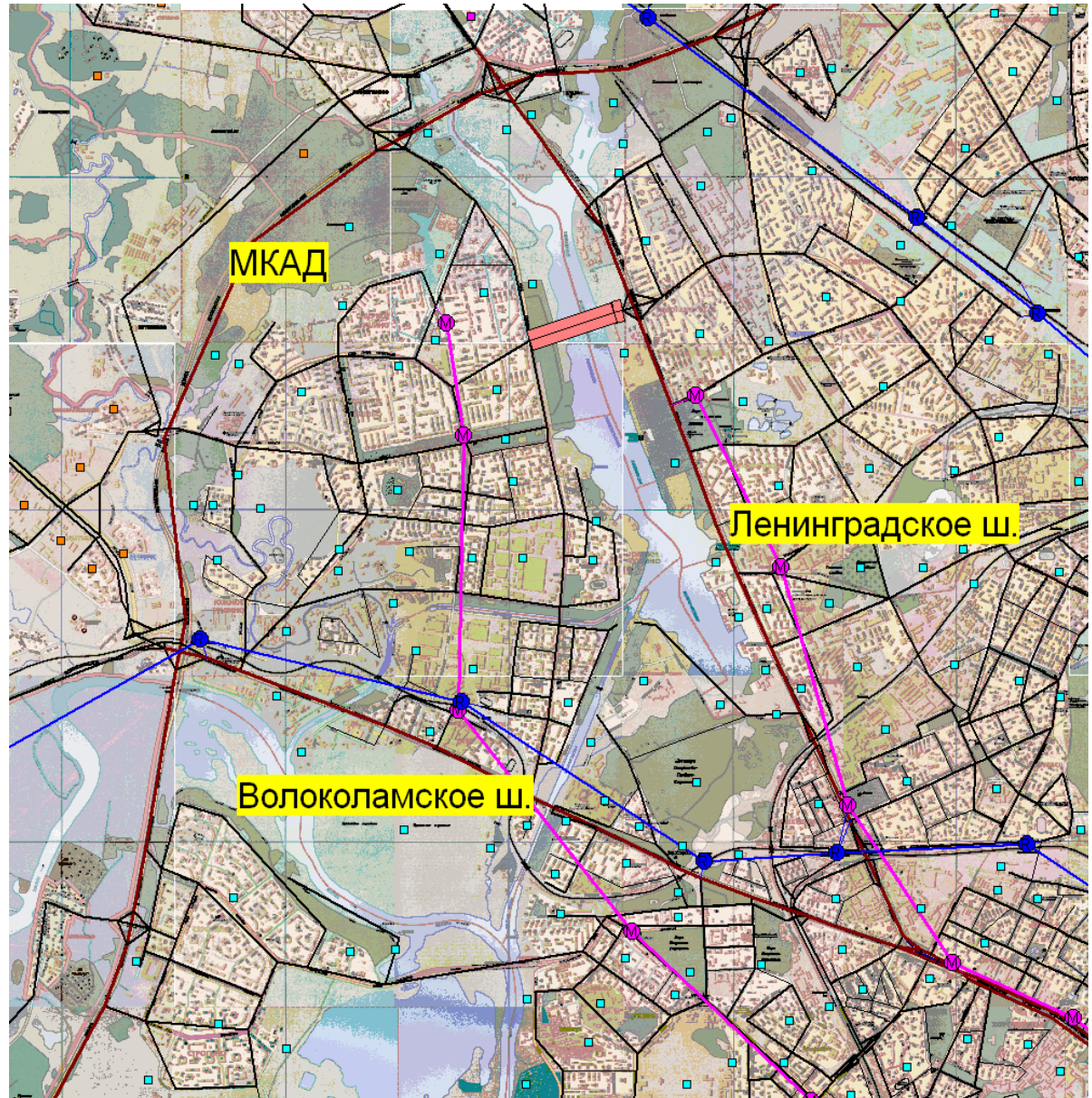
Показаны суммы по 4 зонам – от центра до окраин



Результаты калибровки модели

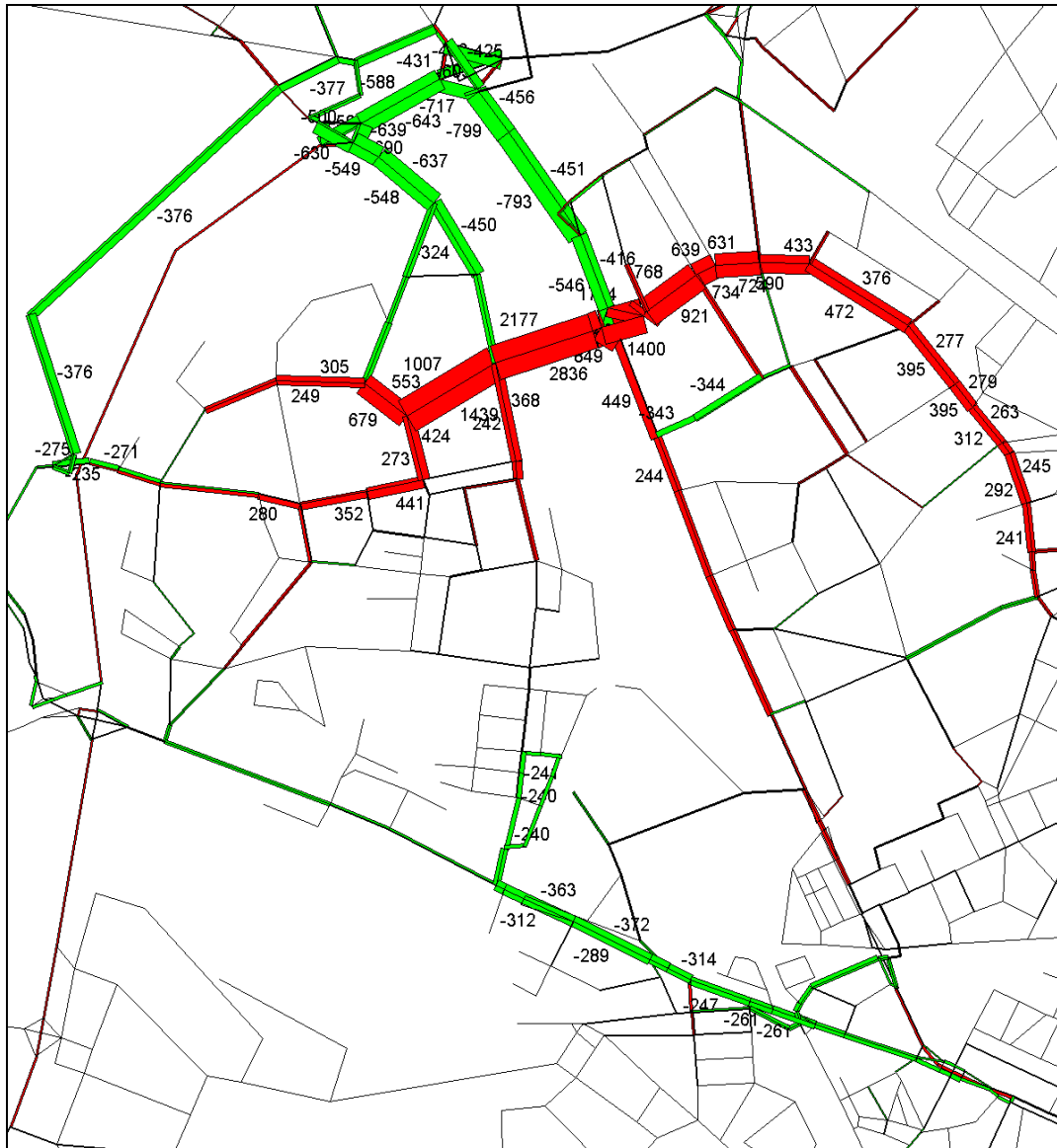


Иллюстративный пример. Изменение транспортных потоков в случае строительства моста



Пример 1. Изменение потоков по сравнению с существующим положением

Автомобильные потоки



Основные результаты

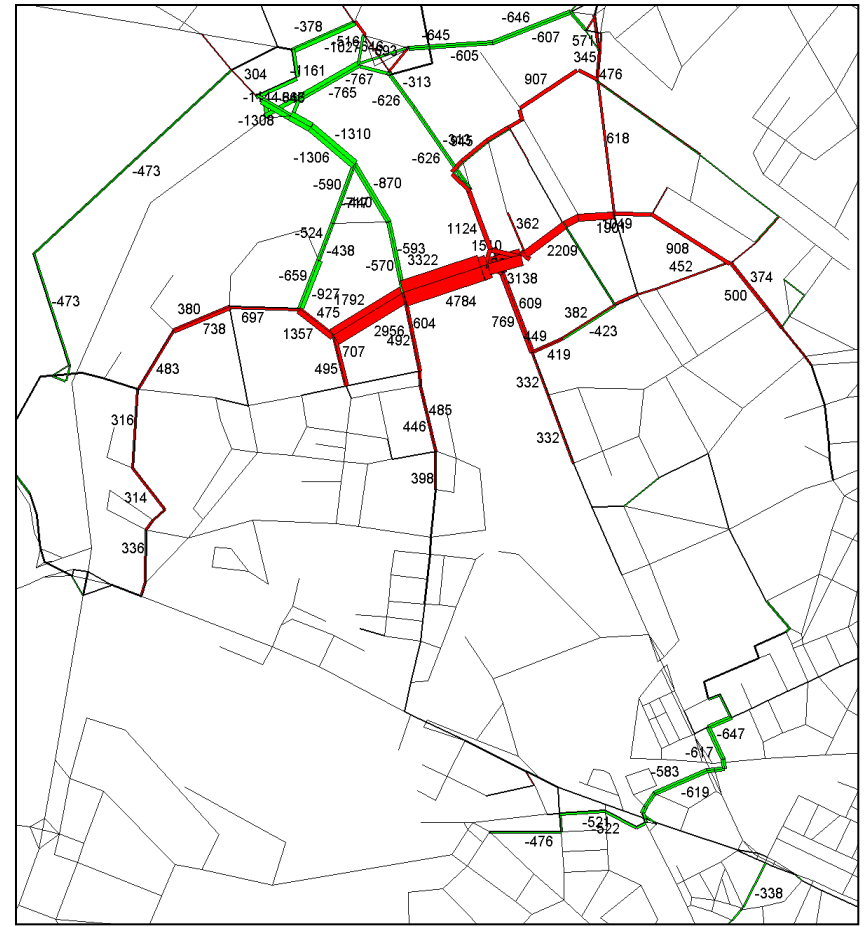
- Модель выявляет разницу между потоками в разное время суток
- Мост получает максимальную загрузку до 2.8 тыс. автомобилей в одном направлении, что оправдывает создание ширины проезжей части в 4 полосы.
- Введение в действие моста перераспределяет транспортные потоки, частично снимая их с участков МКАД, Ленинградского шоссе, ул. Свободы и некоторых других.
- В небольшой степени мост снижает потоки на Замоскворецкой и Таганской линиях метро.
- На уличном общественном транспорте, следующем через мост, можно ожидать потоки до 4.5-5 тыс. за час в одном направлении.

Пример 1. Изменение потоков по сравнению с существующим положением

Пассажирские потоки на метро и поездах пригородного сообщения



Пассажирские потоки на уличном общественном транспорте

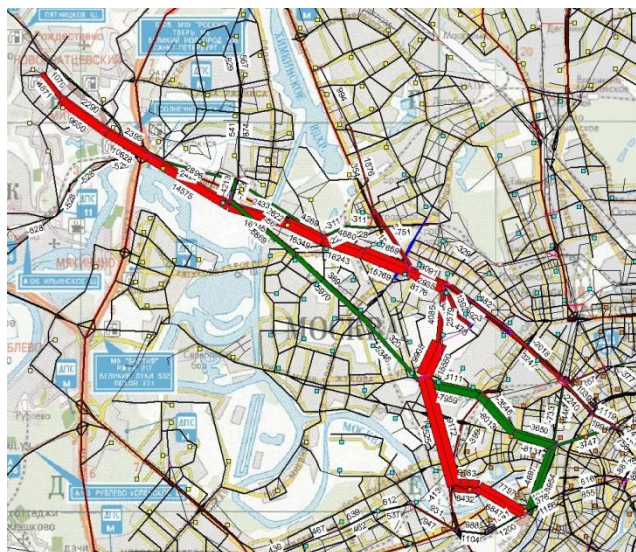


Пример. Скоростной внеуличный транспорт от м. Сокол до Митино

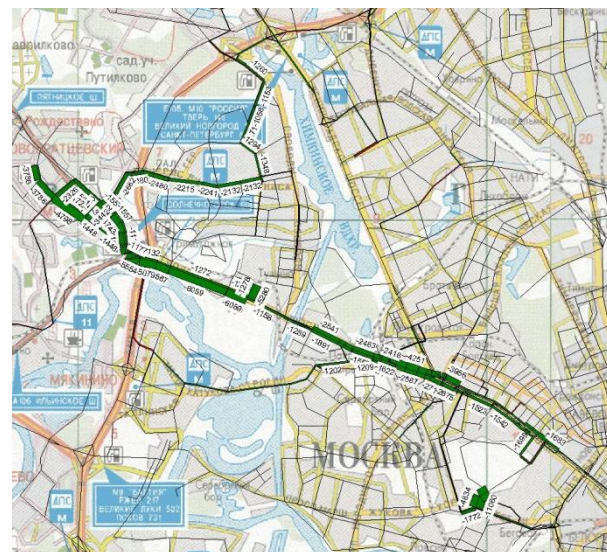
Определение спроса
на новую линию.

Прогноз изменения
пассажирских потоков.

Линия не дублирует
Филевскую.



Внеуличный транспорт



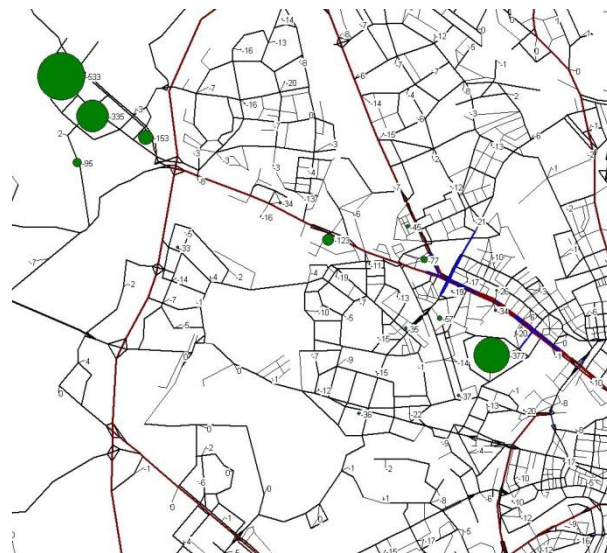
Наземный ОПТ – снижена нагрузка

Влияние на УДС.

Уменьшается выезд из
районов на легковом
автомобиле.



Уменьшение автомобильных
потоков*

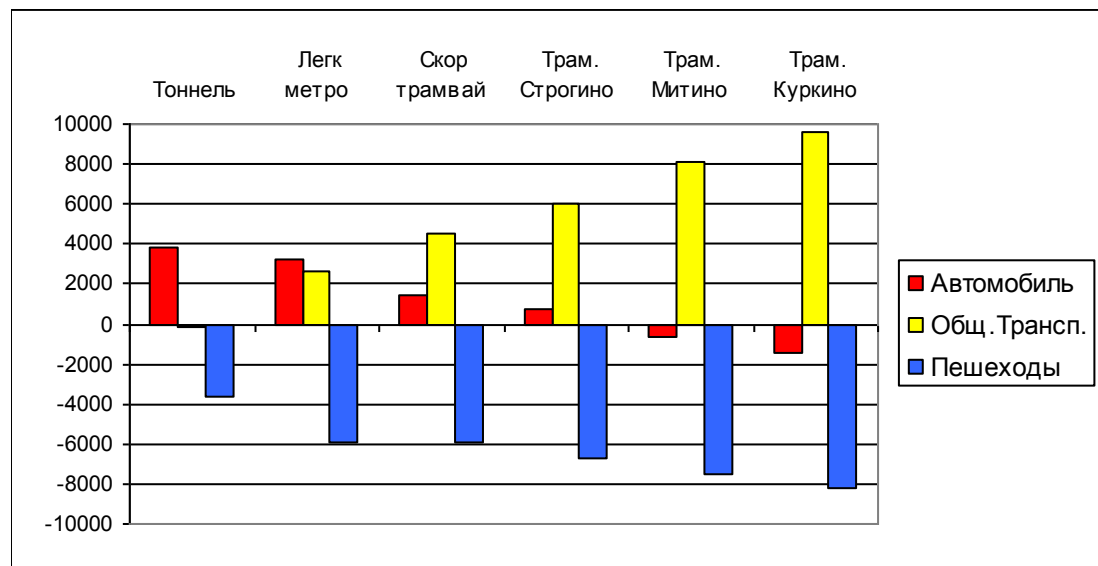


Уменьшение автомобильного
выезда из районов

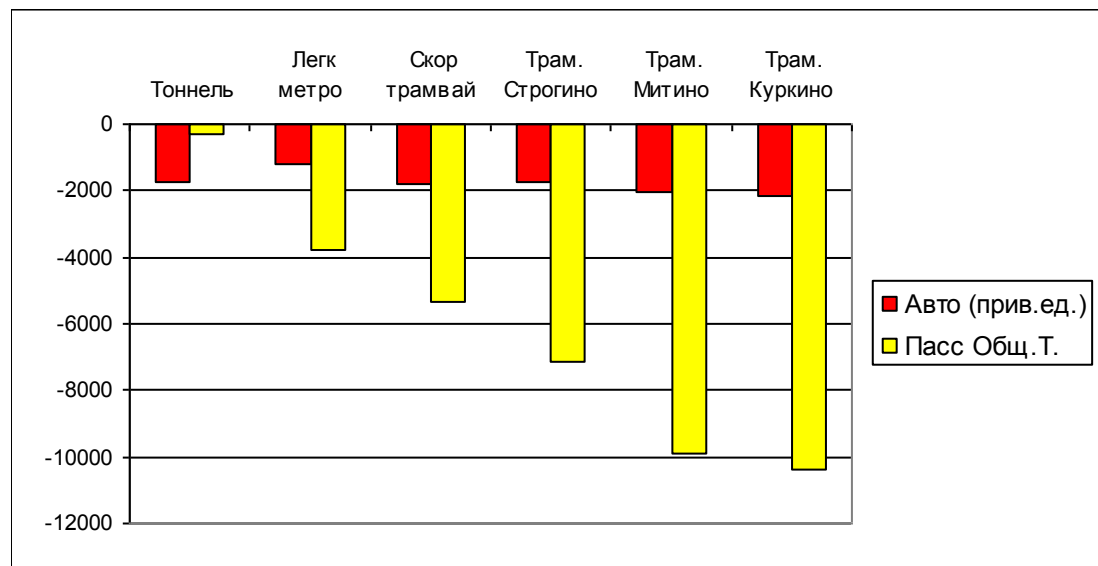
*Произойдет прогнозируемое замещение
этих легковых потоков на крупных
магистральных.

Пример. Скоростной внеуличный транспорт от м. Сокол до Митино

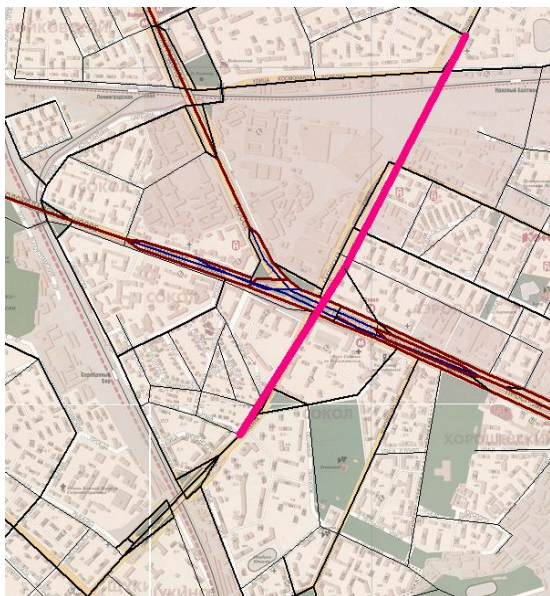
Прогнозируемое изменение
структуры пассажирских перевозок в транспортной
системе г. Москвы



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



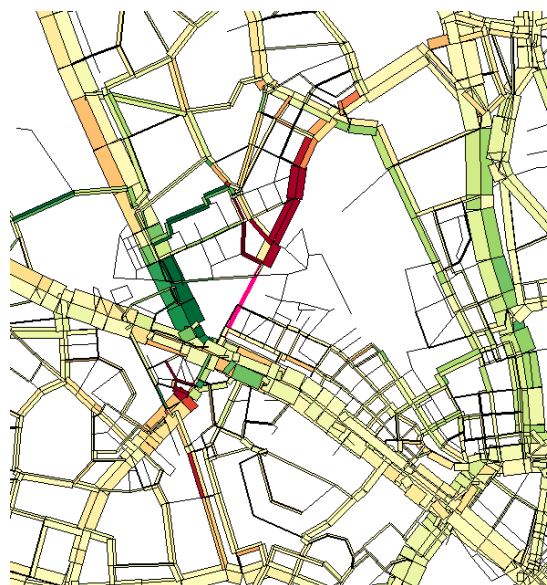
Пример. Моделирование тоннеля в районе М.Сокол



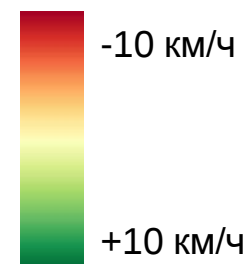
Прогнозируемая
интенсивность
транспортных
потоков
(утро)



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

