

© 2005 г. А. С. Алиев, канд. тех. наук,  
(Институт системного анализа РАН, Москва)  
А. И. Стрельников, канд. тех. наук,  
(ЦНИИП градостроительства РААСН)  
В. И. Швецов, канд. физ.-мат. наук,  
(Институт системного анализа РАН, Москва)  
Ю. З. Шершевский,  
(Гос. институт проектирования городов)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В КРУПНОМ ГОРОДЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ К МОСКОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ<sup>1</sup>

Представлена математическая модель работы транспортной системы крупного города или городской агломерации, предназначенная для прогнозирования транспортных и пассажирских потоков. Существенными чертами модели являются: моделирование различия в структуре передвижений в разное время суток, а также в зависимости от дня недели и времени года; последовательное использование концепции «обобщенной цены» передвижения в качестве критерия оценки путей и межрайонных «транспортных» дальностей. Модель практически откалибрована для транспортной сети Московской агломерации, включающей г. Москву и пригороды, в которых сконцентрирована значительная часть населения Московской области. Компьютерная реализация осуществлена с использованием интегрированной среды разработчика в области моделирования транспортных потоков TRANSNET.

### 1. Введение

Задача моделирования автомобильных и пассажирских потоков в транспортной сети крупных городов является актуальной в связи с возросшим объемом передвижений. В современных условиях математическая модель должна учитывать следующие важные аспекты процесса формирования транспортных потоков:

- в условиях высокой степени загруженности улиц и дорог пропускные способности элементов сети играют решающую роль при выборе путей передвижений;
- структура передвижений резко меняется на протяжении суток, а также зависимости от дня недели и времени года;
- на выбор путей и способов передвижений влияют факторы разной природы, такие как время, цена передвижения и другие;
- существует взаимная зависимость между процессами формирования автомобильных потоков и пассажирских потоков в системе общественного транспорта.

---

<sup>1</sup>Опубликовано в журнале *Автоматика и Телемеханика* 2005, № 11, с. 113–125.

В настоящее время разработано много моделей, позволяющих учесть те или иные особенности процесса формирования транспортных потоков. В данной работе представлена комплексная модель транспортной системы крупного города, позволяющая моделировать передвижения на всех видах транспорта с учетом перечисленных выше аспектов.

Исходными данными для моделирования являются данные о *подвижности* населения, т.е. среднем количестве передвижений, совершаемых с различными целями в течение суток (или недели) средним жителем, а также данные о размещении в плане города объектов, порождающих передвижения (мест приложения труда, объектов торговли и обслуживания и пр.).

Для прогноза структуры передвижений производится расчет целого набора матриц корреспонденций между расчетными районами города, соответствующих передвижениям разного типа (пешеходным, автомобильным и совершаемым в системе общественного транспорта), с разными целями и в разное время суток. Для учета суточной неравномерности расчеты производятся отдельно для каждого периода суток (например, для утреннего и вечернего часа «пик» и на средний дневной час).

Для моделирования загрузки улично-дорожной сети используется концепция равновесного распределения потоков. Расчет загрузки системы общественного транспорта может производиться по модели оптимальных стратегий, явно использующей систему маршрутов, а также приближенно в сетевой форме (по оптимальным путям).

В качестве критерия оценки путей при расчете загрузки и для оценки межрайонных «транспортных» дальностей при расчете корреспонденций используется «обобщенная цена» передвижения, которая включает в себя факторы разной природы, такие как время или цена (денежные затраты) передвижения.

Важной особенностью в задаче прогноза потоков является следующая обратная связь: матрицы корреспонденций и коэффициенты расщепления по типам передвижений зависят от обобщенных цен межрайонных передвижений. Однако сами эти цены зависят от результирующей загрузки элементов транспортной сети (и, в частности, могут различаться в разное время дня). Для приведения «входных» и «выходных» цен в соответствие друг с другом организуется итерационный процесс вычисления матриц и загрузки.

Данная методика практически реализована для транспортной сети Московской агломерации, включающей г. Москву и пригороды, в которых сконцентрирована значительная часть населения Московской области.

Компьютерная реализация осуществлена с использованием программы TRANSNET, созданной сотрудниками Института Системного Анализа РАН. TRANSNET представляет собой современное графическое Windows-приложение и по функциональным возможностям может быть охарактеризовано как интегрированная среда разработчика в области моделирования транспортных потоков.

## 2. Формулировка модели

Далее дается общее описание модели.

## 2.1. Обобщенная цена передвижений

Под «обобщенной ценой» пути понимается критерий, на основании которого пользователь оценивает альтернативные пути и способы передвижения. Обобщенная цена определяется как взвешенная сумма слагаемых, выражающих влияние факторов различной природы на оценку пути. В общем случае она может включать в себя следующие составляющие:

- время передвижения;
- дополнительные задержки на различных элементах транспортной сети (время парковки, время ожидания);
- денежные затраты (платные магистрали, плата за въезд в определенные зоны города);
- условные штрафные добавки времени, используемые для моделирования различных особенностей транспортной сети и мер по управлению транспортом.

Основной составляющей обобщенной цены является время передвижения, поэтому другие составляющие выражаются в условных минутах и прибавляются к времени. Обобщенная цена пути определяется как сумма обобщенных цен дуг и переходов с дуги на дугу (поворотов). Путь между двумя районами или узлами сети с минимальной обобщенной ценой называется оптимальным путем.

Обобщенная цена используется как для сравнительной оценки альтернативных путей, так и в качестве меры «межрайонной транспортной дальности» при расчете матриц межрайонных корреспонденций. В этом случае «дальность» оценивается как обобщенная цена оптимального пути между двумя районами.

## 2.2. Подвижность населения

Процесс образования потоков пассажиров и транспорта обусловлен потребностями жителей совершать передвижения с целью посещения того или иного объекта. Поэтому исходными данными для задачи прогноза потоков являются распределение объектов посещения в плане города, а также *подвижность* населения, т.е. количество передвижений с различными целями, совершаемых в течение дня (недели или года) средним жителем.

Цели передвижений объединены в несколько групп (на работу, учебу или по делам, за покупками, с лечебными целями и т.п.). Подвижность населения определяется матрицей «межцелевых» передвижений

	Дом	Работа	Цель 2	...	Цель $k$
Дом	0	$g_{01}$	$g_{02}$	...	$g_{0k}$
Работа	$g_{10}$	$g_{11}$	$g_{12}$	...	$g_{1k}$
Цель 2	$g_{20}$	$g_{21}$	$g_{22}$	...	$g_{2k}$
...	...	...	...	...	...
Цель $k$	$g_{k0}$	$g_{k1}$	$g_{k2}$	...	$g_{kk}$

Здесь подразумевается, что передвижения с «Целью 1» — это передвижение к месту труда. Матрица межцелевых передвижений определяется на основе социологических обследований. Элементы матрицы удовлетворяют естественным условиям:

$$\forall k \quad \sum_l g_{kl} = \sum_l g_{lk}.$$

Общая среднесуточная подвижность для типичного рабочего дня в крупном городе с многомиллионным населением, таком, как Москва, по некоторым данным составляет

$$\sum_{k,l} g_{kl} \approx 3,2.$$

Обследования по средним городам, например, по Калининграду, дают оценку 2,8. Для каждого конкретного города требуется особое обследование.

Все передвижения, совершаемые каждым жителем в течение дня, могут быть объединены в одну или несколько «цепочек» передвижений от одного целевого объекта к другому, начинающихся и заканчивающихся в местах жительства. Для точного моделирования таких цепочек требуется детальная статистическая информация о распределении цепочек по количеству промежуточных передвижений, по промежуткам времени между очередными передвижениями в цепочке, по типам целей в цепочке и т.д. Во многих случаях хорошую оценку корреспонденций может дать упрощенная методика, которая заключается в том, что для передвижений, являющихся промежуточными в цепочке, вычисляются отдельные матрицы корреспонденций, причем для каждого района объемы прибытия и отправления считаются одинаковыми. При таком подходе промежуточные передвижения отражают общий количественный «фон» передвижений в сети, не нарушая балансов прибытий и отправлений в каждом районе.

Для каждого вида передвижений можно указать долю передвижений, не включенных в цепочку, так называемых «возвратных» передвижений, и долю передвижений, в ходе которых житель совершает промежуточные передвижения перед возвращением домой:

$$g_{0k} = g_{0k}^{\text{возвратн}} + g_{0k}^{\text{прям}}.$$

Для возвратных передвижений матрицы прямых и обратных передвижений совпадают с точностью до транспонирования.

Точная информация об объемах прибытия и отправления в каждом расчетном районе города или агломерации редко бывает доступна для моделирования. Чаще приходится отталкиваться от косвенных характеристик, по которым можно попытаться оценить объемы прибытия и отправления. Например, может быть известным распределение торговых площадей в плане города, но этого недостаточно, чтобы точно прогнозировать количество посетителей мест торговли, так как на это количество влияет также показатель «транспортной доступности» района, наличие альтернативных мест торговли в других районах и др. На практике по ряду косвенных характеристик можно оценить «относительные» показатели емкости районов по отправлению и прибытию с разными целями  $o_i^k, d_i^k$  (здесь  $i$  - номер района,  $k$  - индекс цели). Абсолютные объемы прибытия и отправления вычисляются по относительным объемам и значениям подвижности:

$$O_i^{kl} = o_i^k g_{kl} N, \quad D_i^{kl} = d_i^k g_{kl} N,$$

где  $N$  - общее количество населения на территории, охваченной моделью.

### 2.3. Межрайонные корреспонденции

Для комплексного прогноза загрузки транспортной сети требуется расчет большого набора матриц корреспонденций между расчетными районами города, соответствующих передвижениям разного типа (пешеходным, автомобильным и совершаемым в системе общественного транспорта), с разными целями и в разное время суток. Для учета суточной неравномерности расчеты производятся отдельно для каждого времени суток (например, утреннего и вечернего часа «пик» и на средний дневной час).

Расчет матриц корреспонденций проводится по гравитационной модели [1, 2] с использованием различных кривых тяготения для передвижений с различными целями.

Обозначим:  $R$  - множество расчетных районов,  $F_{ij}^{kl}$  - корреспонденция из района  $i$  в район  $j$  от объекта целевой группы  $k$  к объекту целевой группы  $l$ . Согласно гравитационной модели корреспонденция равна

$$F_{ij}^{kl} = A_i O_i^{kl} B_j D_j^{kl} \exp(-\lambda^{kl} C_{ij}^{kl}), \quad i, j \in R,$$

где коэффициенты балансировки  $A_i, B_j$  определяются из условий

$$\sum_j F_{ij}^{kl} = O_i^{kl}, \quad \sum_i F_{ij}^{kl} = D_j^{kl}.$$

Величина  $C_{ij}^{kl}$  является «транспортной дальностью» между районами  $i, j$ . В качестве характеристики транспортной дальности можно использовать цену оптимального пути между районами. Зависимость транспортной дальности от целевых групп  $k, l$  обусловлена тем, что для разных типов передвижений может использоваться цена пути в данное время, усредненная цена в течение суток или усредненная цена «туда» и «обратно».

Например, при калибровке модели Московской агломерации были использованы следующие характеристики дальности:

$$\begin{aligned} C_{ij}^{\text{aver}} &= \sum_t \frac{1}{2} (c_{ij}(t) + c_{ji}(t)) \quad (\text{среднесуточные}), \\ C_{ij}^t &= c_{ij}(t) \quad (\text{«моментальные»}), \\ C_{ij}^{\text{work}} &= \frac{1}{2} (c_{ij}(t_{\text{утро}}) + c_{ji}(t_{\text{вечер}})) \quad (\text{трудовые}), \end{aligned}$$

где  $c_{ij}(t)$  - оптимальная цена, соответствующая загрузке транспортной сети, складывающейся в период  $t$ , усредненная по способам передвижений (легковой автомобиль, общественный транспорт);  $t$  пробегает дискретные значения - утро, день, вечер.

Коэффициенты  $\lambda^{kl}$  определяют «чувствительность» корреспонденций к фактору дальности. Значения этих коэффициентов определяются из эмпирических обследований [3, 4, 5]. Типичные значения для трудовых поездок - 0,065, для культурно-бытовых поездок - 0,15.

Коэффициенты суточной неравномерности  $\kappa_t^{kl}, t = 1, \dots, T$ , - это коэффициенты, на которые нужно умножить суточную матрицу корреспонденций, чтобы получить матрицу корреспонденций для периода  $t$ :

$$F_{ij}^{kl}(t) = \kappa_t^{kl} F_{ij}^{kl}.$$

Эти коэффициенты для передвижений с разными целями определяются из анализа эмпирических данных о неравномерности загрузки различных элементов транспортной сети, неравномерности прибытия и отправления в различных районах города и др.

Расщепление матриц по типам передвижений производится индивидуально для каждой пары районов на основе сопоставления обобщенных цен передвижений разных типов.

Например, при калибровке модели Московской агломерации были использованы две эмпирические функции - коэффициент пользования транспортом и коэффициент расщепления поездок. Вид этих функций показан на рис. 1. Коэффициент пользования транспортом (КПТ) - это доля поездок (непешеходных передвижений) от общего числа передвижений, как функция от длины передвижения. КПТ зависит от скорости поездки, предоставляемой транспортной сетью, как от параметра. На рис. 1 показано несколько кривых, соответствующих возрастанию скорости. Скорость вычисляется как среднее между скоростями поездок на автомобиле и общественным транспортом, с учетом коэффициента расщепления. Коэффициент расщепления поездок - это доля поездок с использованием общественного транспорта от общего числа поездок. Коэффициент расщепления зависит от соотношения цен передвижений на общественном транспорте и на автомобиле  $C_{общест}/C_{авто}$ . В качестве цен могут использоваться как цены, соответствующие текущей загрузке сети, так и усредненные цены за разные периоды дня и для передвижений «туда» и «обратно».

#### 2.4. Транспортные потоки в сети

Для расчета транспортных потоков на всех элементах сети необходимо распределить межрайонные корреспонденции по путям, соединяющим пары районов.

Фундаментальной особенностью улично-дорожной сети (УДС) является зависимость цен передвижений от загрузки элементов сети. Эта зависимость приводит к тому, что при общей значительной загрузке сети каждая корреспонденция распределяется между несколькими альтернативными путями, причем эти пути могут быть далеки от оптимальных путей, рассчитанных по свободной сети. Для моделирования загрузки УДС с учетом этого эффекта используется концепция равновесного распределения [6, 7]. Под равновесным распределением понимается распределение, при котором ни у кого из участников движения нет мотивации для изменения пути, т.е. обобщенная цена всех альтернативных путей равна или превосходит цену пути, по которому он движется.

При наличии в системе нескольких классов пользователей (например, легковой и грузовой транспорт) следует учитывать, что цена движения по элементу сети (дуге или повороту) может быть различна для пользователей разных классов. В упрощенной модели многопользовательского равновесия предполагается, что цены движения на элементах сети для пользователей разных классов отличаются на константы, не

зависящие от потока (эти константы могут зависеть от характеристик элементов и, вообще говоря, определяются индивидуально для каждого элемента сети).

Обозначим через  $u_a^k$  поток по дуге  $a$  представителей класса пользователей  $k$ ,  $u_a$  - полный поток по дуге  $a$ . Цена каждой дуги складывается из зависящего от полного потока слагаемого  $c_a(u)$  и константы  $d_a^k$ , специфичной для каждого класса пользователей. Модель равновесного распределения может быть сформулирована в виде задачи оптимизации

$$\sum_a \int_0^{u_a} c_a(\nu) d\nu + \sum_k \sum_a d_a^k u_a^k \rightarrow \min.$$

Минимум ищется при ограничениях, выражающих балансы прибытия и отправления в каждом районе и узле сети. Для точной формулировки ограничений необходимо рассматривать отдельно потоки представителей всех корреспонденций на каждой дуге. Подробное описание модели см., например, в [7, 8].

Важной особенностью загрузки системы общественного транспорта является «ветвление» пути за счет возможности использования альтернативных маршрутов по принципу «какой придет на остановку первым». В этом случае речь идет не о расчете конкретных путей, а, скорее, о расчете «стратегии поведения», в которой продолжение пути определяется случайным событием прибытия на остановку того или иного транспортного средства. Для моделирования такого поведения используется модель оптимальных стратегий [9].

В калибровочных расчетах или расчетах, связанных с долгосрочным планированием, загрузка системы общественного транспорта может также рассчитываться приближенно в сетевой форме. Сетевой расчет не использует системы маршрутов, а распределяет корреспонденции по оптимальным путям, проводимым по дугам сети, несущим общественный транспорт.

Важной особенностью в задаче прогноза потоков является следующая обратная связь: матрицы корреспонденций и коэффициенты расщепления по типам зависят от обобщенных цен межрайонных передвижений. Однако сами эти цены зависят от результирующей загрузки элементов транспортной сети (и, в частности, могут различаться в разное время дня). Для приведения «входных» и «выходных» цен в соответствие друг с другом организуется итерационный процесс расчета матриц корреспонденций и распределения корреспонденций по сети. Схема итераций показана на рис. 2. Индексы «ped», «pub» и «auto» на рис. 2 относятся к пешим передвижениям и поездкам на общественном транспорте и легковом автомобиле соответственно.

### 3. Модель Московской агломерации

Изложенная в разделе 2 методика практически реализована для транспортной сети Московской агломерации, включающей г. Москву и пригороды, в которых сконцентрирована значительная часть населения Московской области.

Транспортная сеть представлена графом улично-дорожной сети (примерно 7350 узлов и 22600 дуг) и внеуличного транспорта (метрополитен и железные дороги с пригородно-городским движением). Вся территория агломерации разделена на 1865 расчетных районов, «привязанных» к узлам графа дугами-связями. Транспортная сеть и система районов показаны на рис. 3.

### 3.1. Программа TRANSNET

Компьютерная реализация модели осуществлена с использованием программного обеспечения TRANSNET, созданного сотрудниками ИСА РАН [10]. TRANSNET представляет собой современное графическое Windows-приложение и по функциональным возможностям может быть охарактеризовано как интегрированная среда разработчика в области моделирования транспортных потоков.

Основные компоненты TRANSNET:

- графический редактор транспортной сети;
- средства моделирования:
  - блок матричных вычислений;
  - алгоритмы распределения потоков по сети;
  - использование функций, определенных пользователем;
  - командный язык и расчеты в пакетном режиме;
- средства графического представления и вывода данных.

Блок матричных вычислений предоставляет возможность вычисления матриц межрайонных цен и расстояний, а также поэлементного вычисления матриц по указанным пользователям формулам. Кроме того, предусмотрены алгоритмы балансировки матриц по указанным массивам данных о прибытии и отправлении в каждом районе. Имея матрицу межрайонных цен  $\{c_{ij}\}$ , можно вычислить матрицу корреспонденций по формуле  $\{\exp(-\lambda c_{ij})\}$  с последующей балансировкой.

Распределение автомобильных потоков по сети осуществляется с использованием алгоритма равновесного распределения для нескольких (произвольного количества) классов пользователей транспортной сети. Для общественного транспорта предусмотрен сетевой и маршрутный алгоритмы распределения. Зависимость обобщенной цены от загрузки дуги задается пользователем программы в виде математической формулы (допускается также интерполяция по табличным данным).

Все расчетные формулы вводятся в TRANSNET в виде символьных выражений, похожих на выражения языка *C*. Расчеты могут производиться как в интерактивном режиме, с использованием меню и диалогов, так и в пакетном режиме, с использованием командного языка TRANSNET. В последнем случае все необходимые расчетные операции по вычислению матриц и распределению потоков записываются в виде команд в текстовый файл, после чего командный файл может многократно запускаться на выполнение.

### 3.2. Калибровка модели

Для калибровки использовались результаты замеров потоков автотранспорта на улично-дорожной сети, данные о входах и выходах на станциях метрополитена, а также размеры фактических корреспонденций между станциями, результаты замеров пассажиропотоков на линиях железной дороги и в контрольных сечениях сети наземного общественного транспорта, произведенные в разное время суток.



В табл. 1 дано сравнение ряда расчетных характеристик с соответствующими данными обследований. В таблицу сведены общесетевые показатели - общие суммарные входы и выходы на станциях метро, суммарная транспортная работа (автомобили \* км) на множестве обследованных дуг улично-дорожной сети, а также усредненные по набору обследованных дуг пассажирские потоки на железной дороге и наземном общественном транспорте. Сравнение показывает хорошее качественное и количественное согласие фактических данных и результатов моделирования.

Наибольшее расхождение результатов моделирования и данных обследований, как видно из таблицы, возникает при сравнении пассажирского потока, замеренного в избранных сечениях наземного общественного транспорта (ОТ). Это является отражением того факта, что информационное обеспечение именно этого аспекта модели во время калибровки было наихудшим. Так, в настоящее время в наличии нет актуализированной базы данных по всем маршрутам наземного ОТ, включая маршрутные такси, подмосковных, а также частных московских перевозчиков. Поэтому для калибровки применялся упрощенный сетевой метод расчета потоков наземного ОТ. Кроме того, сами измерения пассажирских потоков сделаны по приближенной методике, включающей оценку «на глаз» степени заполненности салона проезжающих автобусов.

С другой стороны, очень хорошего согласования удалось достичь в моделировании пассажирских потоков на метро, где есть надежная и достоверная статистика входов и выходов на станциях в разное время суток. Этот результат тем более ценен, что именно метро является основным несущим видом общественного транспорта в Москве, в то время как наземный транспорт в большей мере играет «подвозящую» роль (хотя и не везде). На рис. 4 показаны расчетные и фактические суммарные объемы выхода со станций метро в разных кольцевых зонах города (внутри Кольцевой линии, на станциях Кольцевой линии и в срединной и окраинной зонах вне Кольцевой). Сравнение показано для утреннего, дневного и вечернего часа. Из рисунка видно, что модель дает правильный прогноз объемов пассажирских передвижений в кольцевой структуре Москвы и их изменение в течение суток.

Расчетные автомобильные потоки показаны на рис. 5. На рис. 6 показано сравнение вечерних и утренних расчетных потоков. Видна асимметрия движения по радиальным направлениям, связанная с трудовыми передвижениями из окраинных «спальных» районов. На рисунке видны также участки выраженной асимметрии утренних и вечерних потоков на МКАД. Например, на юго-западном участке МКАД утром в большей степени загружена внутренняя, вечером - внешняя сторона. Эти результаты подтверждаются наблюдениями.

#### 4. Заключение

В работе представлена математическая модель работы транспортной системы крупного города или городской агломерации, предназначенная для прогнозирования изменений в этой работе при краткосрочных или долгосрочных изменениях градостроительного характера или при изменениях в транспортной структуре и организации движения.

Отличительными характеристиками модели являются:

- учет различия характеристик дальности и часовой неравномерности передви-

жений, совершаемых с разными целями;

- учет различия в структуре передвижений и загрузке элементов транспортной сети в разное время суток;
- последовательное использование концепции «обобщенной цены» передвижения в качестве критерия оценки путей и межрайонных «транспортных» дальностей;
- корректный учет взаимозависимости между обобщенной ценой путей, значениями корреспонденций и результирующей загрузкой элементов сети.

В ходе калибровки достигнута приемлемая сходимость результатов расчета с имеющимися фактическими данными. Модель работоспособна и может использоваться для прогнозирования ситуаций, возникающих на транспортной сети в случае изменения ее структуры или градостроительных условий. Прогнозирование может осуществляться для любых периодов рабочего дня.

Дальнейшая работа может быть связана с моделированием различий в структуре передвижений в разные дни недели и разное время года. Такое моделирование возможно в рамках разработанной методики после проведения необходимых обследований и сбора более подробных данных о размещении объектов прибытия и отправления, в том числе в Московской области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wilson A. G.* A statistical theory of spatial distribution models // *Transpn. Res.* 1967. V. 1. P. 253–270.
2. *Попков Ю. С., Посохин М. В., Гутнов А. Э., Шмульян Б. Л.* Системный анализ и проблемы развития городов. М.: Наука, 1983.
3. *Sheppard E. S.* Gravity parameter estimation // *Geographical Anal.* 1979. V. 11. P. 120–132.
4. *Лившиц В. В., Стрельников А. И.* Калибровка и проверка гравитационной статистической модели трудовых корреспонденций. М.: ЦНИИП градостроительства, 1983. С. 79–101.
5. *Sen A.* Maximum likelihood estimation of gravity model parameters // *J. Regional Sci.* 1986. V. 26. P. 461–474.
6. *Wardrop J. G.* Some theoretical aspects of road traffic research // *Proc. Inst. Civil Engin.* II. 1952. P. 325–378.
7. *Sheffy Y.* *Urban Transportation Networks.* Englewood Cliffs. N.J: Prentice-Hall, 1985.
8. *Швецов В. И.* Математическое моделирование транспортных потоков // *АиТ.* 2003. № 11. С. 3–46.
9. *Spiess H., Florian M.* Optimal strategies: a new assignment model for transit networks // *Transpn. Res. B.* 1989. V. 23. P. 83–102.
10. *Алиев А. С., Попков Ю. С., Швецов В. И.* Моделирование транспорта в ИСА РАН // *Компьютерные модели развития города.* СПб.: Наука, 2003. С. 78–89.

Показатель		Откл. %
Метро: входы-выходы	сутки	-1,3
	утро	0,6
	день	1,1
	вечер	-1,9
ЖД: въезд в Москву	утро	14,4
ЖД: выезд из Москвы	утро	3,0
Работа в ул.-дор. сети (авт * км), утро	легковой	3,1
	грузовой	0,9
Уличный ОТ (избранные сечения)	сутки	-21,7
	утро	-27,0
	день	-21,4
	вечер	-17,0

Таблица 1. Сравнение расчетных данных и данных обследований.

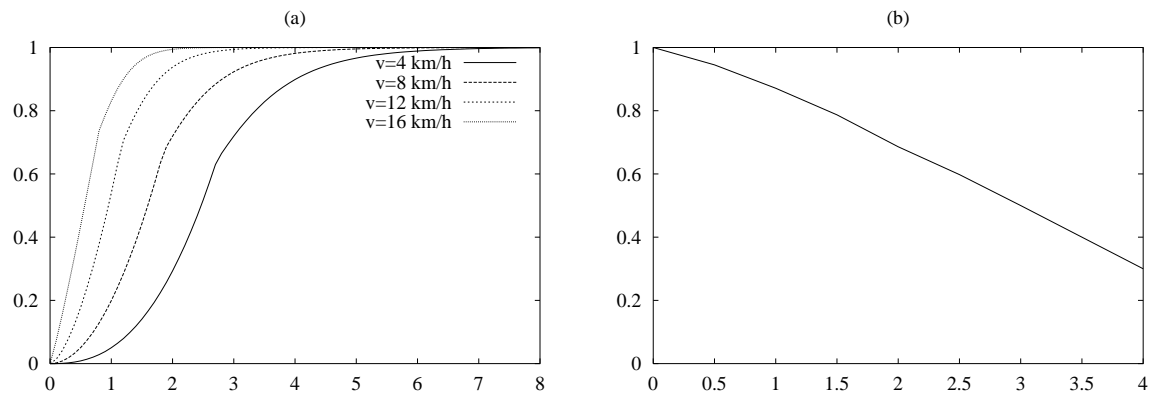


Рис. 1. (а) Коэффициент пользования транспортом. (б) Коэффициент расщепления.

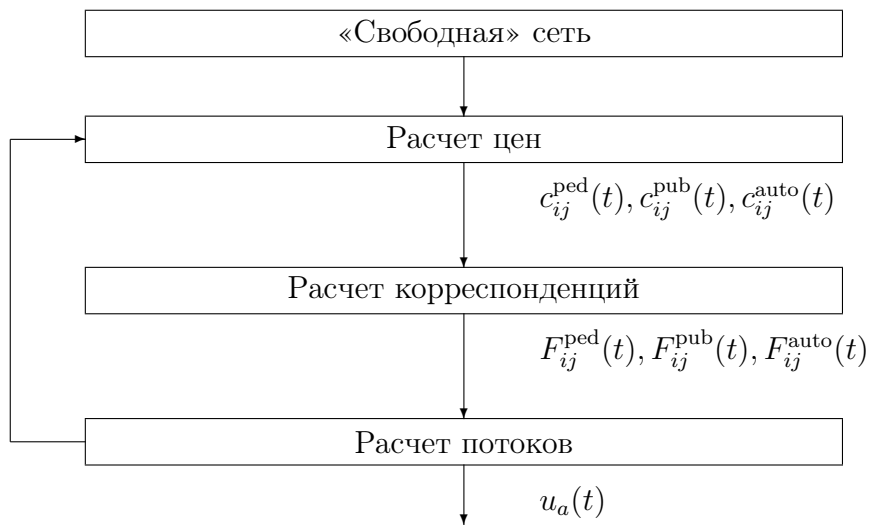


Рис. 2. Схема «больших» итераций.

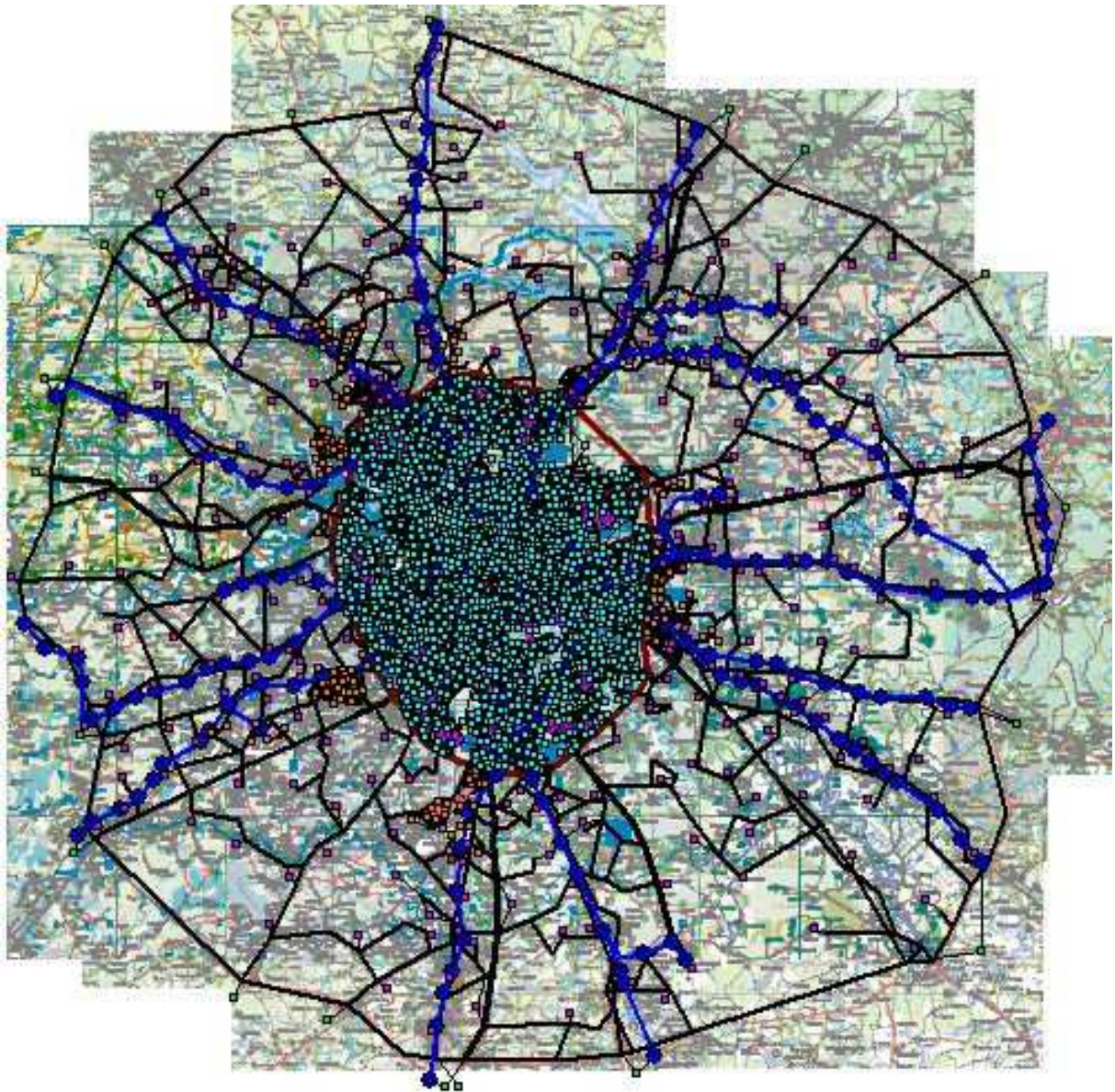


Рис. 3. Транспортная сеть Московской агломерации и система районов прибытия и отправления.

**Выходы из метро (тыс. пассажиров/час)**

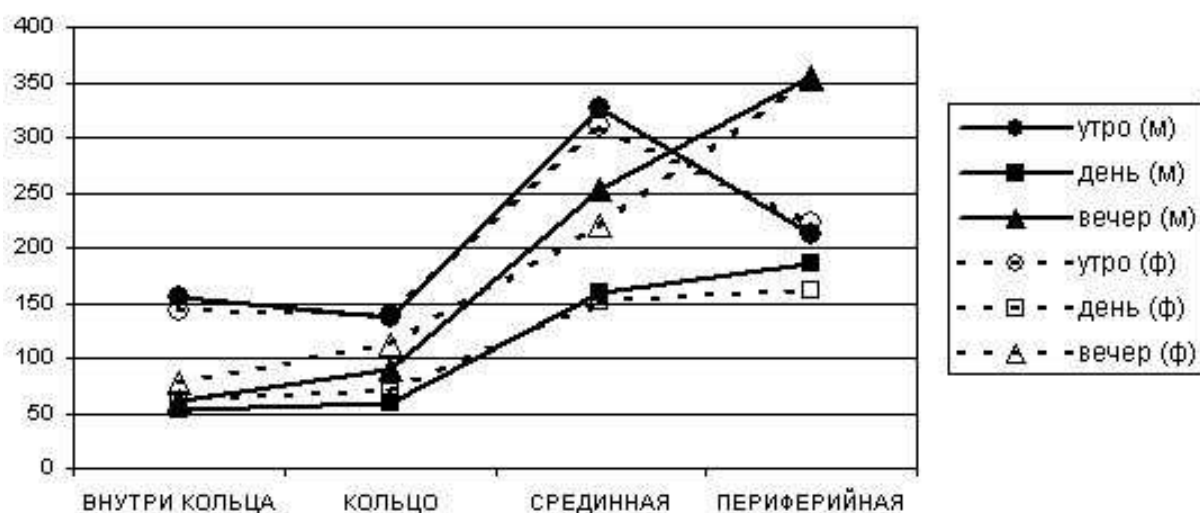


Рис. 4. Суммарные объемы выхода со станций метро в разных зонах города. Сплошными линиями показаны расчетные данные, пунктирными линиями - фактические данные.



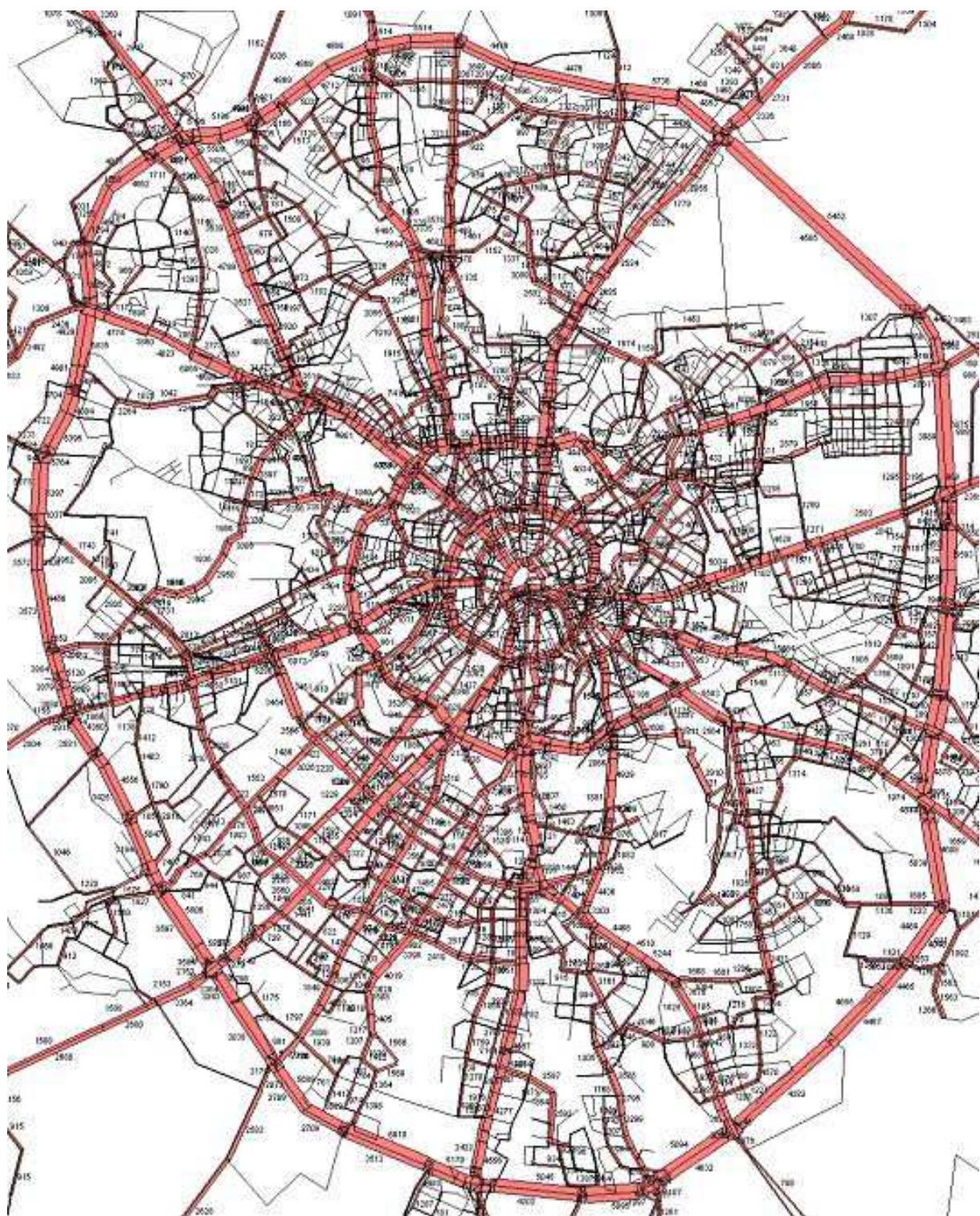


Рис. 5. Расчетные потоки на улично-дорожной сети в пределах Московской кольцевой автодороги.

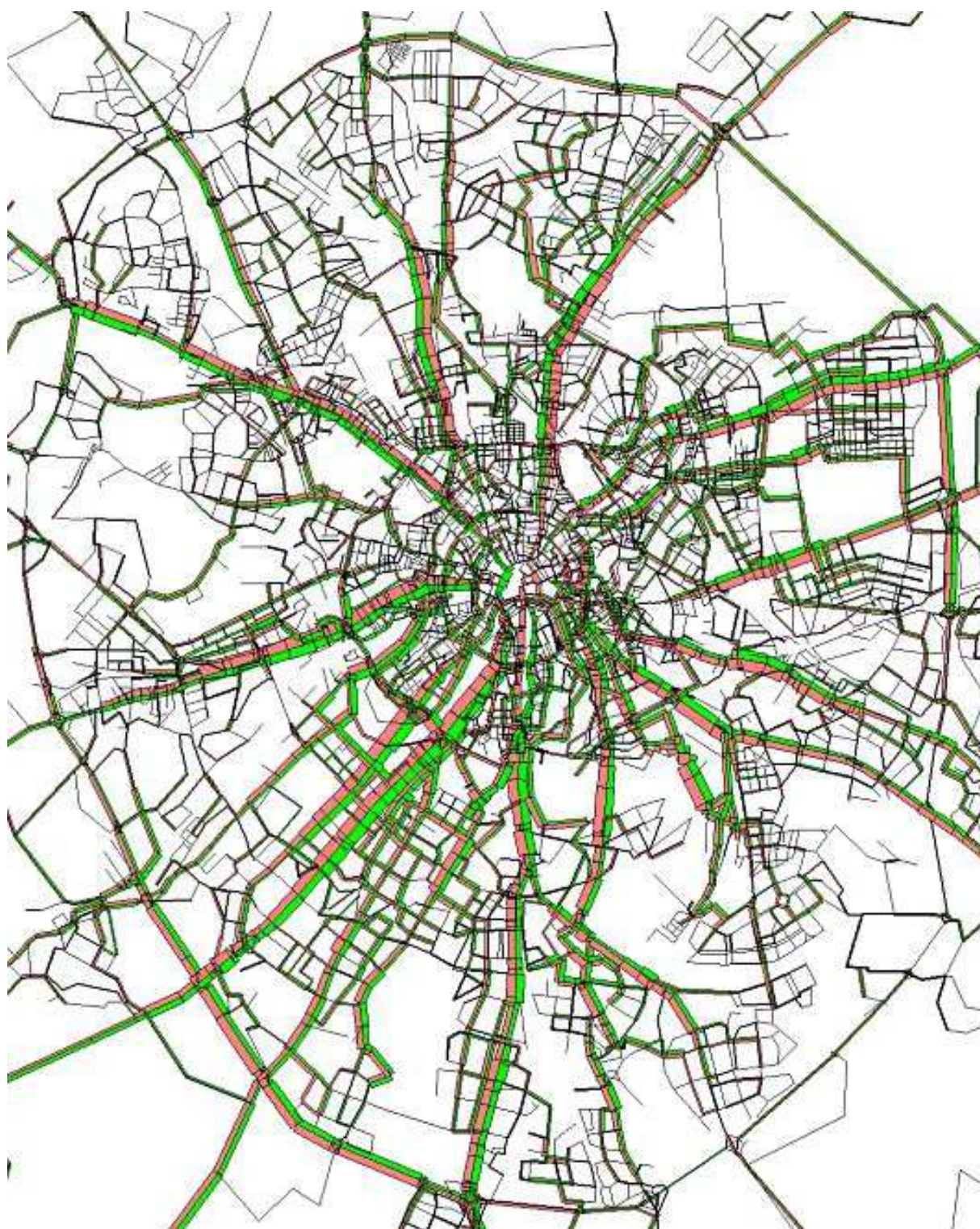


Рис. 6. Сравнение вечерних и утренних расчетных потоков на улично-дорожной сети.