

# Динамика макросистем

## Модель транспортных потоков на основе четырехшаговой схемы с учетом цепочек передвижений\*

А.С. Алиев, Д.С. Мазурин, В.И. Швецов

**Аннотация.** Дана методика моделирования автомобильных и пассажирских потоков в транспортной системе крупного города с практическим применением к Москве и Московской области. Методика основана на модификациях классической четырехшаговой схемы. Модальное расщепление производится с учетом связанных цепочек передвижений, а также различной загрузки в разное время суток. Предложена схема формирования псевдо-маршрутной системы на основе расписания для пригородных электропоездов.

**Ключевые слова:** моделирование транспортных потоков, матрица корреспонденций.

### Введение

В данной работе рассматривается задача прогноза транспортных и пассажирских передвижений в сети крупного города. Стандартным подходом к решению этой задачи является четырехшаговая схема [1,2], согласно которой последовательно оценивается общее количество совершаемых передвижений, рассчитывается матрица межрайонных корреспонденций, производится расщепление корреспонденций по видам транспорта и способам передвижения (модальное расщепление). Затем корреспонденции для каждого вида транспорта распределяются по путям в сети. Основное преимущество данной схемы состоит в простоте подготовки данных и программной реализации и относительно малых затратах вычислительных ресурсов, что позволяет моделировать крупные сети, например, сеть Москвы и Московской области, на обычном персональном компьютере [3].

Однако классическая четырехшаговая схема в целом ряде аспектов является слишком упрощенной и не учитывает некоторые важные аспекты процесса формирования транспортных потоков. Одним из таких аспектов является взаимная связанность передвижений, образующих цепочки. Основное влияние цепочек состоит в том, что все

звенья одной цепочки, как правило, совершаются одним видом транспорта. В настоящее время в мире разработаны модели, в которых явно моделируются цепочки передвижений (см., например, [4, 5]). Однако эти модели сложнее в реализации и требуют существенно больших вычислительных ресурсов. В настоящей работе предлагается комбинированный подход, позволяющий учесть основной вклад цепочек, сохраняя вычислительную простоту четырехшаговой схемы. Данный подход изложен в разделах 1 и 2.

Еще одна важная проблема, возникающая при моделировании большой сети, такой, как сеть крупного города или целой области, состоит в сложности системы общественного транспорта такого объекта. Основная сложность состоит в том, что в такой системе объединены подсистемы, требующие, вообще говоря, разного подхода при моделировании. Для внутригородских подсистем общественного транспорта, таких как метро или автобусы, характерна относительно высокая частота движения, так что пассажиры при выборе маршрутов поездок не учитывают расписания отправления, а ориентируются на средний интервал движения. Это дает возможность использовать для моделирования чрезвычайно эффективные быстроедействующие алгоритмы отыскания оптимальных путей и распределения корреспонденций по

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-01-12030.

путям, в частности, алгоритм оптимальных стратегий [6]. Пассажиры пригородных поездов или автобусов дальнего следования, наоборот, ориентируются на конкретное время отправления нужных им маршрутов. Для расчетов путей в этом случае применяются существенно более медленные алгоритмы. Проблема состоит в том, что для распределения потоков во всей системе должен использоваться единый алгоритм, поскольку в жизни все виды транспорта равнодоступны и используются для поездок между районами.

Обычно на практике к моделированию всей системы применяют медленный и ресурсоемкий алгоритм, явно учитывающий расписание, при этом для систем транспорта с высокой частотой создается псевдо-расписание. Например, для автобуса с интервалом 6 минут на вход алгоритма подается условное расписание: 08:00, 08:06, 08:12, и т.д. Основная причина ресурсоемкости алгоритмов, учитывающих расписание, состоит в том, что в них на начальном этапе формируется банк данных возможных путей, среди которых на следующих шагах ведется поиск оптимального варианта. Этот банк данных чрезвычайно велик, особенно для систем с большим количеством разных маршрутов, что приводит к критическому увеличению необходимой оперативной памяти и времени расчета. Особенно критичен этот недостаток для российских условий, поскольку, как показывает сравнение с другими странами, для российских городов характерно очень большое количество разных маршрутов. Например, количество маршрутов в Москве примерно на порядок превосходит количество маршрутов в Берлине. В этих условиях представляется целесообразным применение быстродействующих алгоритмов типа алгоритма оптимальных стратегий для всей системы, а вместо псевдо-расписаний для систем с высокой частотой движения, наоборот, создать псевдо-маршруты для максимально адекватного описания систем с низкой частотой движения. Методика создания такой системы маршрутов приведена в разделе 3. Методика разработана с применением к маршрутам общественного транспорта Московской области, однако может быть применена к любому крупному городу или области.

## 1. Цепочки передвижений

Передвижения людей формируют цепочки, начинающиеся и заканчивающиеся в одном месте, обычно дома. Будем далее рассматривать только цепочки двух типов: простые цепочки, состоящие из двух поездок (звеньев), вида  $Дом \rightarrow Объект$

$\rightarrow Дом$ , и сложные цепочки, состоящие из трех поездок, вида  $Дом \rightarrow Объект 1 \rightarrow Объект 2 \rightarrow Дом$ . Помимо этих двух типов достаточно широко распространенными являются цепочки вида  $Дом \rightarrow Объект 1 \rightarrow Объект 2 \rightarrow Объект 1 \rightarrow Дом$ , причем в качестве первой цели обычно выступает работа. Такие цепочки мы будем раскладывать на две простые цепочки:  $Дом \rightarrow Объект 1 \rightarrow Дом$  и  $Объект 1 \rightarrow Объект 2 \rightarrow Объект 1$ . Опросы показывают, что доля других цепочек в структуре передвижений мала, поэтому ими можно пренебречь и ограничиться рассмотрением только цепочек из двух и трех звеньев.

Совокупность цепочек передвижений с определенными целями, совершаемых в определенные периоды времени, будем называть элементом спроса (например, элементом спроса является  $Дом \xrightarrow{Утро} Работа \xrightarrow{Вечер} Дом$ ). В нашей модели используется следующее деление суток на периоды времени, для каждого из которых рассчитывается загрузка сети:

- Раннее утро (6:00 – 8:00)
- Утро (8:00 – 10:00)
- День (10:00 – 17:00)
- Вечер (17:00 – 19:00)
- Поздний вечер (19:00 – 22:00)
- Ночь (22:00 – 06:00)

Распределения цепочек по элементам спроса используются на этапе расчета часовых матриц корреспонденций по способам передвижения и являются исходными данными в представленной модели. В результате обработки различного статистического материала (результаты исследований подвижности за рубежом [5,7], собственные опросы [8]) и экспертных оценок авторов были сформированы распределения цепочек по элементам спроса для каждой цепочки в модели. На рис. 1–3 приведены используемые распределения поездок цепочек по времени суток для трех цепочек:  $Дом \rightarrow Работа \rightarrow Дом$ ,  $Дом \rightarrow БКБ \rightarrow Дом$ ,  $Дом \rightarrow ДКБ \rightarrow Дом$ .

Распределение поездок цепочки  $Дом \rightarrow Работа \rightarrow Дом$  по времени суток (рис. 1) характеризуется концентрацией времени совершения поездки на работу в первой половине дня и длительным интервалом между совершением первой и второй поездки цепочки. Наибольший вес в составе этой цепочки имеет элемент спроса  $Дом \xrightarrow{Утро} Работа \xrightarrow{Вечер} Дом$ , хотя продолжительность как утреннего, так и вечернего периода суток составляет всего два часа. Распределение поездок цепочки  $Дом \rightarrow БКБ \rightarrow Дом$  характеризуется наименьшим интервалом между временами совершения первой и второй поездки



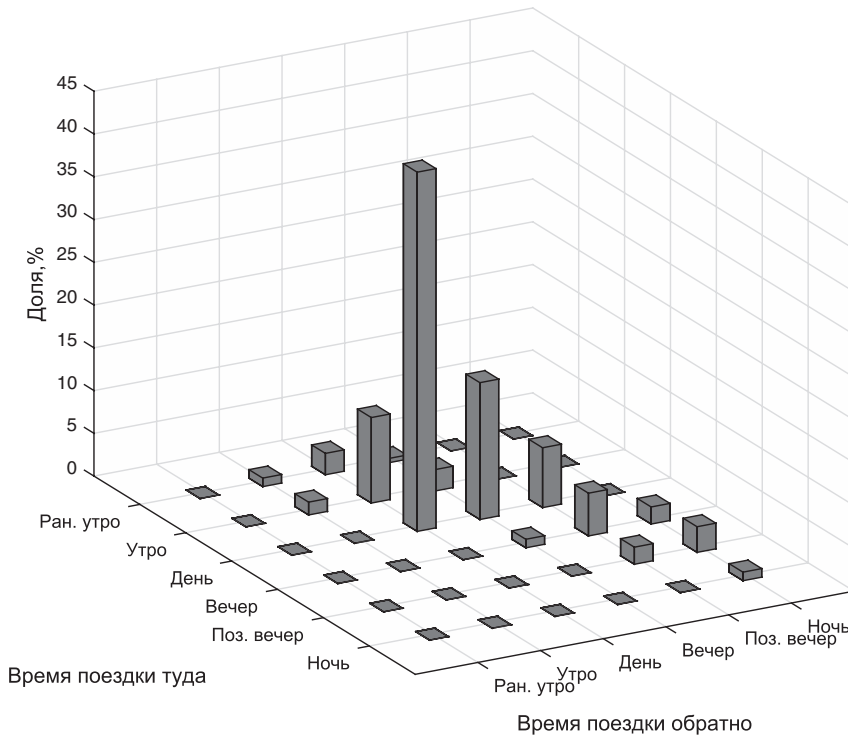


Рис 3. Распределение поездок цепочки Дом → ДКБ → Дом по времени суток

и основной концентрацией поездок на диагонали (как прямая, так и обратная поездки укладываются в один период суток). Более чем в половине случаев (55%) обе поездки в составе цепочки совершаются днем.

### 2. Модифицированная схема расчета

Первым шагом обычной четырехшаговой схемы расчета является оценка абсолютных объемов прибытия и отправления для каждого транспортного района с использованием данных статистики (размещение населения и объектов притяжения по территории области моделирования) и коэффициентов подвижности (количество передвижений по каждому слою на 1000 человек). Рассматривая передвижения в составе цепочек, можно определить согласованные друг с другом коэффициенты подвижности для каждого слоя передвижений. Обозначим через  $\mu^{XYX}$  и  $\mu^{XYZX}$  количество совершаемых цепочек  $X \rightarrow Y \rightarrow X$ ,  $X \rightarrow Y \rightarrow Z \rightarrow X$  соответственно на 1000 человек, где  $X, Y$  и  $Z$  обозначают объекты различного типа (в т. ч.  $H$  – Дом). Звенья цепочек дают вклад в соответствующие слои передвижений, так что коэффициенты подвижности  $m^{XY}$  (количество передвижений из  $X$  в  $Y$  на 1000 человек), вычисляются по следующим формулам:

$$m^{HX} = \mu^{HXH} + \sum_Y \mu^{HXYH}, \quad X \neq H,$$

$$m^{XH} = \mu^{HXH} + \sum_Y \mu^{HXYH}, \quad X \neq H,$$

$$m^{XY} = \mu^{XYX} + \mu^{YXY} + \mu^{HXYH}, \quad X \neq H, Y \neq H.$$

Следующий шаг методики – расчет суточных матриц корреспонденций – с введением цепочек не предполагает каких-либо существенных изменений: матрицы рассчитываются на основе сформированных оценок объемов прибытия и отправления по каждому слою с использованием гравитационной модели и итерационных алгоритмов балансировки.

Далее на основе суточных матриц корреспонденций для каждого слоя передвижений рассчитываются часовые матрицы корреспонденций по способам передвижения за каждый период времени. Здесь под разными способами передвижения понимаются передвижение пешком, на легковом автомобиле и на общественном транспорте. При этом мы будем считать, что в ходе совершения цепочки передвижений способ передвижения не меняется: если человек утром поехал на работу на автомобиле, то вечером он

почти всегда будет возвращаться также на автомобиле. Следовательно, необходимо применять одинаковые коэффициенты расщепления для всех входящих в цепочку поездок. Сами коэффициенты расщепления зависят от соотношения обобщенных затрат для различных способов передвижения, а поскольку мы рассматриваем связанные цепочки передвижений, то и обобщенные затраты будем использовать суммарные для всей цепочки.

Ограничимся далее описанием расщепления по способам передвижения для простых цепочек (другие потребуют привлечения трехиндексных массивов вместо матриц) и рассмотрим элемент спроса (Дом  $\xrightarrow{t_1}$  Объект  $\xrightarrow{t_2}$  Дом). Обозначим  $(c_{t_1 t_2}^k)_{ij}$  обобщенные затраты на совершение цепочки передвижений (Район  $i \xrightarrow{t_1}$  Район  $j \xrightarrow{t_2}$  Район  $i$ ) для способа передвижения  $k$ , приведенные на одну поездку:

$$(c_{t_1 t_2}^k)_{ij} = \frac{(c_{t_1}^k)_{ij} + (c_{t_2}^k)_{ji}}{2}, \quad (1)$$

где  $(c_t^k)_{ij}$  – обобщенные затраты на передвижение из  $i$  в  $j$  в период времени  $t$ , используя способ передвижения  $k$ .

Все население области моделирования разделим на имеющих возможность использовать автомобиль для совершения передвижений и не имеющих такой возможности. Обозначим  $\gamma$  долю поездок, в которых у пользователя есть возможность использовать автомобиль. Будем считать ее напрямую связанной с уровнем автомобилизации, т.е. средним количеством собственных легковых автомобилей на 1000 человек. В таком случае доли каждого из способов передвижения рассчитываются следующим образом:

$$s_{t_1 t_2}^k = \gamma s_{t_1 t_2}^{k(\text{авт.})} + (1 - \gamma) s_{t_1 t_2}^{k(\text{неавт.})}, \quad (2)$$

где  $s_{t_1 t_2}^{k(\text{авт.})}$  и  $s_{t_1 t_2}^{k(\text{неавт.})}$  – доли способов передвижения для поездок «автомобилизированного» и «неавтомобилизированного» населения.

Поездки пользователей первой группы расщепляются по способам передвижений следующим образом:

$$s_{t_1 t_2}^{k(\text{авт.})} = \frac{e^{U_{t_1 t_2}^k}}{\sum_k e^{U_{t_1 t_2}^k}}, k \in \{\text{car}; \text{pub}; \text{ped}\}. \quad (3)$$

Для поездок остальных пользователей доля передвижений на легковом автомобиле равна 0, и

поездки расщепляются между двумя способами передвижения:

$$s_{t_1 t_2}^{k(\text{неавт.})} = \frac{e^{U_{t_1 t_2}^k}}{\sum_k e^{U_{t_1 t_2}^k}}, k \in \{\text{pub}; \text{ped}\}. \quad (4)$$

В формулах (3), (4) используется функция полезности  $U_{t_1 t_2}^k = -\alpha^k c_{t_1 t_2}^k + \beta^k$ , коэффициенты  $\alpha^k$  и  $\beta^k$  определяются в специальных исследованиях.

Для разных видов цепочек используются разные коэффициенты  $\alpha^k$ ,  $\beta^k$  и  $\gamma$ . Например, деловые поездки (Работа  $\rightarrow$  Объект  $\rightarrow$  Работа) согласно социологическим опросам являются более автомобилизированными, то есть при прочих равных доля общественного транспорта для таких поездок ниже.

Окончательно, часовая матрица корреспонденций для каждого способа передвижения и каждого периода суток складывается из отщепленных матриц для всех элементов спроса.

### 3. Формирование псевдо-маршрутной системы на основе расписаний

Для расчета загрузки общественного транспорта могут использоваться различные модели. Выбор модели определяется исходя из имеющихся данных о движении общественного транспорта, необходимой точности расчета и вычислительных возможностей [9].

Если точная система маршрутов вовсе неизвестна, используется сетевая модель загрузки общественного транспорта. В этом случае пассажиры передвигаются не по заранее определенным маршрутам, а по системе дуг, на которых предусмотрено движение общественного транспорта. Для каждой такой дуги указывается частота и скорость движения транспортных средств (при этом общественный транспорт не подразделяется на различные подсистемы (автобусы, троллейбусы, маршрутные такси), а представляется обобщенным транспортом с унифицированными характеристиками). Сетевая модель распределяет корреспонденции по оптимальным путям, соединяющим каждую пару районов. Ее результаты могут быть использованы для разработки или улучшения системы маршрутов общественного транспорта.

На практике ситуация с отсутствием данных о маршрутной сети встречается редко, а появление больших объемов открытых данных в последние годы предоставляет новые широкие возможности для разработчиков транспортных моделей. В



связи с этим для расчета загрузки общественного транспорта чаще всего используются маршрутные модели, предполагающие явное описание маршрутов и их характеристик. Среди них можно выделить модели на основе расписаний и модели на основе интервалов.

Модели на основе расписаний предполагают детальное описание всех маршрутов движения – последовательность остановок и время прибытия и отправления для каждой остановки каждого рейса маршрута. Такой подход позволяет принять во внимание изменение спроса и предложения в течение периода моделирования и чаще используется в динамических моделях, нежели чем в статических, поскольку для больших сетей становится очень трудоемким и вычислительно сложным.

Альтернативный подход к описанию маршрутной сети предполагает, что каждый маршрут имеет постоянный интервал движения, поэтому вместо расписания каждого рейса маршрута достаточно указать только скорость и частоту движения (количество отправок в час). Модели загрузки общественного транспорта на основе интервалов гораздо проще в реализации, требуют меньшего объема исходных данных и вычислительных ресурсов и лучше подходят для моделирования крупных городов, где большая часть маршрутов имеет высокую частоту движения и интервальное расписание. Тем не менее, для отдельных маршрутов и даже целых систем транспорта данное утверждение оказывается неверным. Например, рейсы пригородных электропоездов обычно не формируют каких-либо маршрутов и в расписании описываются независимо друг от друга, поэтому для этой системы общественного транспорта понятия маршрута и его частоты оказываются неопределенными. Таким образом, возникает задача построения системы псевдо-маршрутов для пригородных электропоездов, которые бы с приемлемой точностью отражали реальное расписание и ключевые параметры (скорость, частота и др.).

Для формирования системы маршрутов предлагается следующий алгоритм действий:

- Для каждой встречающейся в расписании пары начального и конечного остановочных пунктов электропоездов производится выборка всех рейсов между этими пунктами. Начальный и конечный пункты выбранных рейсов и есть начальный и конечный пункты формируемого псевдо-маршрута.
- Множество остановок псевдо-маршрута включает все остановочные пункты, которые являются остановками хотя бы для одного рейса из выборки.

- Частота движения псевдо-маршрута для каждого периода суток определяется как количество рейсов выборки, попадающих в данный период суток к длительности данного периода суток. Для отнесения рейса к какому-либо периоду суток необходимо выбрать точечную оценку времени совершения рейса (например, время прохождения рейса (отправления/прибытия) через вокзал Москвы).
- Скорость движения рассчитывается отдельно по перегонам из нескольких станций сразу для всех псевдо-маршрутов, проходящих через перегон.

Чтобы учесть тот факт, что на некоторых станциях останавливаются далеко не все проходящие через эти станции электропоезда, введем параметр «частота остановки» для остановок нашего псевдо-маршрута, который определяется как доля рейсов, относящихся к данному псевдо-маршруту, которые останавливаются в данном пункте от общего числа рейсов псевдо-маршрута. Отсутствие остановки у некоторых рейсов можно учесть, если ввести штрафную функцию на дугах-посадках и дугах-высадках, зависящую от «частоты остановки».

Например, если в утренний период (с 8:00 до 10:00) из пункта  $A$  в пункт  $B$  следуют по одному и тому же пути два электропоезда: первый с маршрутом  $A \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow B$ , а второй с маршрутом  $A \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow B$ , будет сформирован псевдо-маршрут  $A \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow B$  с частотой остановки, равной 1 для станции  $S_2$  и 0,5 для станций  $S_1$  и  $S_3$ .

Экспрессные рейсы электропоездов помимо множества остановочных пунктов значительно отличаются скоростью движения, стоимостью проезда и другими характеристиками, поэтому для них формируются отдельные псевдо-маршруты.

## Заключение

В работе предложена методика прогноза транспортных и пассажирских потоков, ориентированная для применения к очень большим транспортным сетям, таким, как сеть Москвы и Московской области. Методика основана на четырехшаговой схеме прогноза и сохраняет ее вычислительную эффективность. При этом стандартная схема расчетов была усовершенствована в следующих основных направлениях:

- Модальное расщепление передвижений производится с учетом связанных цепочек передвижений, а также различной загрузки в разное время суток в разных частях транспортной сети.

- Предложена схема формирования псевдо-маршрутной системы на основе расписания для пригородных электропоездов. Данная схема позволяет моделировать сложную сеть общественного транспорта крупного города, включающую как пригородный, так и внутригородской транспорт, используя вычислительно эффективный алгоритм, основанный на средних интервалах и не учитывающий явно расписания отправления транспортных средств.

Предложенная методика применена для моделирования транспортной сети такого сложного объекта, как Московская область (включая подробную сеть Москвы). В настоящее время ведется работа по калибровке модели, созданной на основе описанной методики.

### Литература

1. *Швецов В. И.* Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и Телемеханика. 2003. no. 11. P. 3–46.
2. *Ortuzar J. d. D., Willumsen L. G.* Modelling Transport. Wiley, 2011.
3. *Алиев А. С., Мазурин Д. С., Максимова Д. А., Швецов В. И.* Структура комплексной модели транспортной системы г. Москвы // Сб. Трудов ИСА РАН «Прикладные проблемы управления макросистемами». 2015. Vol. 65, no. 1. P. 3–15.
4. *Activity-Based Travel Demand Models: A Primer:* Tech. rep.: Transportation Research Board, 2015. URL: [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp2/SHRP2\\_S2-C46-RR-1.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp2/SHRP2_S2-C46-RR-1.pdf).
5. *John L. Bowman.* Activity Based Travel Demand Model System with Daily Activity Schedules. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
6. *Spiess H., Florian M.* Optimal strategies: a new assignment model for transit networks // Transpn. Res. B. 1989. Vol. 23. P. 83–102.
7. *Forschungsprojekt «Mobilitat in Stadten - SrV».* URL: [http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/srv/2008/berichte\\_08](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/srv/2008/berichte_08).
8. *Опрос: передвижения жителей Москвы и области.* URL: <http://www.isa.ru/survey/survey1.htm>.
9. *Transport Analysis Guidance. Unit M3-2. Public Transport Assignment.* 2014. URL: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/427126/webtag-tag-unit-m3-2-public-transport-assignment-modelling.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/427126/webtag-tag-unit-m3-2-public-transport-assignment-modelling.pdf).

**Алиев Александр Семенович.** С.н.с. ИСА ФИЦ ИУ РАН. К.т.н. Окончил в 1980 г. Московский институт инженеров железнодорожного транспорта. Количество печатных работ: 20. Область научных интересов: математическое моделирование транспортных потоков. E-mail: [aliev2@orc.ru](mailto:aliev2@orc.ru).

**Мазурин Дмитрий Сергеевич.** Математик ИСА ФИЦ ИУ РАН. Окончил в 2003 г. МФТИ. Количество печатных работ: 4. Область научных интересов: математическое моделирование транспортных потоков. E-mail: [mazurin@isa.ru](mailto:mazurin@isa.ru).

**Швецов Владимир Иванович.** Зав. лабораторией ИСА ФИЦ ИУ РАН. К.ф.-м.н., с.н.с. Окончил в 1983 г. МГУ. Количество печатных работ: 35. Область научных интересов: математическое моделирование транспортных потоков. E-mail: [Vl.Shvetsov@mail.ru](mailto:Vl.Shvetsov@mail.ru).