

Математическое моделирование

Комплексная методика моделирования транспортных систем на основе моделей динамического распределения потоков

Д.С. МАЗУРИН

Аннотация. В статье представлена комплексная методика прогноза автотранспортных и пассажирских потоков в транспортной системе крупного города на основе моделей динамического распределения потоков по сети. Помимо расчета общих корреспонденций и их расщепления по способам передвижения методика позволяет формировать индивидуальные для каждой пары районов и способа передвижения распределения поездок по времени отправления. При этом учитывается связанность передвижений в цепочки и доступность различных способов передвижения для населения. Последующее динамическое распределение по сети полученных матриц корреспонденций позволяет определить реалистичную нестационарную картину загрузки сети в зависимости от времени и воспроизводить образование заторов в узких местах и их динамику.

Ключевые слова: моделирование транспортных потоков, матрица корреспонденций, динамическое распределение потоков по сети.

Введение

Транспортные проблемы являются одними из наиболее важных вопросов развития городов, и с ростом общего объема передвижений и уровня автомобилизации населения они продолжают усиливаться. Важнейшим инструментом, используемым при решении этих проблем, становятся математические модели, позволяющие осуществить прогноз автомобильных и пассажирских потоков в транспортных сетях и оценить эффективность различных инфраструктурных проектов, мер регулирования транспортного спроса или стратегий управления дорожным движением. В мировой практике доминирующее положение в решении подобных задач занимают модели на основе 4-шаговой схемы [1], которая предполагает оценку общих объемов прибытия и отправления для каждого района, расчет матриц корреспонденций согласно гравитационной модели, расщепление корреспонденций по способам передвижения и статическое

распределение корреспонденций по путям, отличающееся относительной простотой реализации [2]. Тем не менее, в случае недостаточной пропускной способности отдельных элементов сети статические модели дают неверное представление о ее загрузке и приводят к критическим ошибкам при оценке межрайонных времен. Таким образом, моделирование сильно загруженных транспортных сетей требует применения принципиально иных подходов, позволяющих воспроизводить динамику заторов в сети, явно учитывая пропускную способность ее элементов, и формировать изменяющуюся во времени картину потоков и скоростей. Модели динамического распределения потоков [3] учитывают зависимости транспортного спроса и предложения от времени при формировании динамической загрузки сети, используют имитационные модели различного класса для реалистичного воспроизведения динамики потоков в сети и, как следствие, позволяют точнее оценивать влияние

различных планируемых мероприятий на транспортную систему. Тем не менее, динамические модели зачастую не интегрированы в комплексные прогнозные модели, а являются лишь надстройкой к статическим моделям, то есть используют матрицы корреспонденций, рассчитанные с помощью статического распределения, и выполняют пост-процессинг результатов статического моделирования.

В данной работе представлена комплексная методика моделирования городских транспортных систем на основе моделей динамического распределения потоков по сети. Методика включает в себя оценку агрегированных межрайонных дальностей для групп населения с различной доступностью способов передвижения, расчет суточных матриц корреспонденций и их последующее согласованное расщепление по способам передвижения и времени отправления с учетом связанных цепочек передвижений.

1. Структура комплексной модели на основе динамического распределения потоков

Модели динамического распределения транспортных потоков принимают на вход зависящие от времени матрицы корреспонденций и выполняют их распределение по путям с воспроизведением динамики потоков в сети. Для включения такой модели в традиционную 4-шаговую схему можно поступить следующим способом. Он заключается в агрегировании зависящих от времени межрайонных времен и цен, расчете матриц корреспонденций различных слоев спроса для всего периода моделирования, и последующей «нарезке» этих матриц согласно заранее заданному распределению по времени. Такой подход требует минимальных усилий в его реализации, но имеет два существенных недостатка. Во-первых, при агрегировании временных зависимостей межрайонных времен и цен значительная часть информации из модели распределения потоков становится невосстановимой. Во-вторых, профиль распределения поездок по времени отправления в действительности отличается для различных пар районов, например, время отправления на работу зависит от удаленности места жительства от места работы. Кроме того, в прогнозных моделях существующие показатели удаленности районов могут изменяться как в сторону увеличения из-за роста численности населения, количества совершаемых передвижений и загрузки сети, так и в сторону уменьшения при реализации различных инфраструктурных проектов в сфере транспорта или стратегий управ-

ления транспортной системой. Таким образом, транспортная модель должна сама прогнозировать такие поведенческие решения, как изменение времени совершения поездки, и находить новое равновесие в транспортной системе с учетом этих аспектов транспортного поведения.

На рис. 1 представлена альтернативная структурная схема комплексной модели прогноза транспортных потоков в системе крупного города на основе динамического распределения потоков по сети. В модели используется дискретное время: период моделирования, например, целые сутки разбиваются на равные интервалы времени, длительностью порядка 15 минут. Далее интервал времени будем обозначать индексом t .

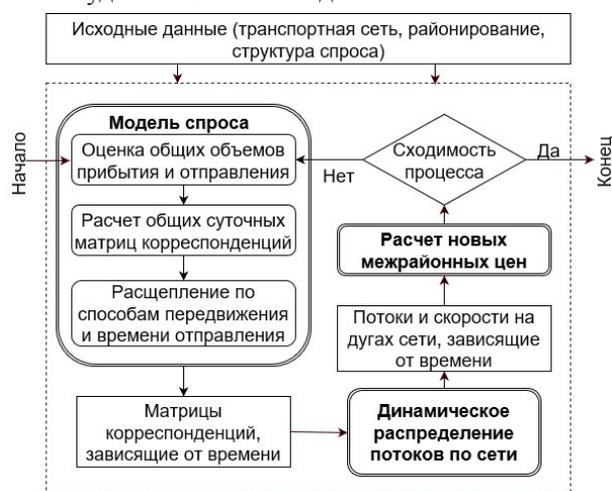


Рис. 1. Общая схема модели прогноза транспортных потоков

Модель спроса включает оценку общих объемов прибытия и отправления для каждого района по каждому сегменту спроса, расчет общих суточных матриц корреспонденций для каждого сегмента спроса и расщепление этих матриц по способам передвижения (на легковом автомобиле, на общественном транспорте или пешком) и времени отправления. В результате на выходе модели спроса имеем зависящие от времени матрицы корреспонденций $Q^m = \{Q_{ijt}^m\}$ для каждого способа передвижения m . Q_{ijt}^m есть количество отправок из района i в район j в интервале времени t способом передвижения m . Моделирование спроса производится с учетом связанности передвижений в составе цепочек [4]

Модель динамического распределения потоков по сети принимает на вход рассчитанные матрицы корреспонденций и выполняет распределение корреспонденций по путям сети вместе с воспроизведением динамики потоков в сети. В результате формируется загрузка сети, на основе

которой рассчитываются времена и обобщенные цены передвижений для каждой пары районов, интервала отправления и способа передвижения – t_{ijt}^m и c_{ijt}^m соответственно. В обобщенную цену передвижения, помимо времени движения, включаются различные добавки, такие как плата за проезд по платным участкам дорог, стоимость парковки, стоимость проезда в общественном транспорте и т.д. Рассчитанные межрайонные времена и обобщенные цены подаются на вход модели спроса для пересчета матриц корреспонденций. Для сходимости итерационного процесса расчета матриц корреспонденций и распределения корреспонденций по сети применяются процедуры усреднения выходных времен и цен с входными временами на каждой итерации. В случае, если различие выходных и входных времен и цен становится ниже определенного порогового значения, итерационный процесс завершает свою работу. Поскольку модель распределения потоков также имеет свой внутренний итерационный процесс поиска решения, итерации глобального процесса будем называть «большими» итерациями.

Исходными данными для моделирования являются:

- граф транспортной сети,
- размещение различных объектов по территории области моделирования,
- структура транспортного спроса:
 - какие цепочки передвижений и в каком количестве совершаются населением?
 - каково желаемое время и длительность посещения различных объектов?

2. Модель спроса

2.1. Сегменты спроса

Элементарной единицей транспортного спроса при расчете матриц корреспонденций мы будем считать цепочку передвижений, обеспечивая тем самым согласованность поездок в составе цепочки, которая проявляется в следующих формах:

- цепочка передвижений заканчивается в том же районе, где она началась;
- для всех поездок в составе цепочки используется один способ передвижения;
- все поездки в составе цепочки согласованы по времени, и следующая поездка цепочки не может быть начата, пока не завершилась предыдущая.

Время и способ совершения передвижений в составе цепочки зависят от районов планируемого посещения, предпочтений пользователя относительно желаемого времени и продолжительности посещения различных объектов и загрузки транс-

портной сети в различное время суток. Будем называть сегментом спроса совокупность всех цепочек передвижений между объектами определенного типа (например, Дом – Работа – Дом), совершаемых пользователями с одинаковыми предпочтениями относительно желаемого времени и продолжительности посещения (например, работающие с 09:00 до 18:00). Пользователи из одного сегмента спроса одинаково оценивают полезность совершения цепочки передвижений между заданными районами в заданное время. Для каждого сегмента спроса будем рассчитывать отдельную матрицу корреспонденций в зависимости от времени. В дальнейшем изложении ограничимся рассмотрением простых цепочек передвижений, которые включают всего два звена.

2.2. Расчет суточной матрицы корреспонденций

При моделировании спроса будем исходить из того, что значительная часть населения не имеет возможности совершать передвижения на легковом автомобиле и может передвигаться только на общественном транспорте или пешком. Поэтому в случае плохой общественной связи между районами оценка межрайонной дальности у таких пользователей будет сильно отличаться от оценки межрайонной дальности у владельцев автомобилей. Как правило, этот фактор не учитывается в моделях спроса должным образом, а используется агрегированная оценка межрайонной дальности в виде линейной комбинации обобщенных цен передвижения на автомобиле и на общественном транспорте. В результате ухудшение общественной связи между районами приводит к увеличению агрегированной межрайонной дальности и снижению полной корреспонденции между этими районами, что может вызвать снижение корреспонденции автомобилистов. Кроме того, возникает проблема с расщеплением корреспонденций по способам передвижения, поскольку доля отправок, приходящаяся на легковые автомобили, оказывается ничем не ограничена. Чтобы устранить эти недостатки моделей, мы рассмотрим несколько групп пользователей с различной оценкой межрайонных дальностей, введем балансовые ограничения на отправление пользователей различных групп из районов проживания и рассчитаем отдельные матрицы корреспонденции для каждой группы пользователей. При этом в районах посещения никаких дополнительных балансовых ограничений не возникает: все пользователи, вне зависимости от принадлежности к какой-либо группе, в одинаковой мере конкурируют за емкости объектов посещения.

Разделим население области моделирования на две группы: население первой группы ($k=1$) может использовать автомобиль для совершения передвижений (в качестве водителя или пассажира), в то время как население второй группы ($k=2$) такой возможности не имеет и осуществляет выбор способа передвижения только из двух альтернатив – на общественном транспорте или пешком. Пусть κ_i – доля цепочек передвижений из района i , для которых у пользователя есть возможность использовать автомобиль (эта величина связана с уровнем автомобилизации в районе, т.е. количеством собственных легковых автомобилей на 1000 человек). Тогда общее отправление из района можно разделить на отправление представителей первой и второй групп населения:

$$O_i^1 = \kappa_i O_i, O_i^2 = (1 - \kappa_i) O_i.$$

Гравитационная модель для расчета общих суточных матриц корреспонденций примет следующий вид:

$$Q_{ij}^k = a_i^k O_i^k b_j D_j f(C_{ij}^k),$$

$$\sum_j Q_{ij}^k = O_i^k, \sum_{i,k} Q_{ij}^k = D_j,$$

где $f(C)$ – убывающая функция межрайонной дальности, O_i^k и D_j – общие объемы отправления и прибытия в районах, a_i^k и b_j – балансировочные коэффициенты. Принцип расчета межрайонных дальностей C_{ij}^k для каждой группы населения будет рассмотрен в следующем разделе.

2.3. Выбор способа передвижения и времени отправления

Будем рассматривать два типа объектов посещения. Посещение одних объектов обычно жестко привязано ко времени (работа, школа, ВУЗ), в то время как для других (магазины, объекты досуга) обычно существуют лишь весьма гибкие временные рамки.

Рассмотрим сначала цепочки Дом – Работа – Дом, где посещение жестко привязано ко времени, то есть существует желаемое время прибытия на работу и желаемое время отправления с работы, и будем считать, что желаемое время прибытия на работу задано интервалом $[t_1'; t_1'']$, сместив который на продолжительность рабочего дня можно получить интервал желаемого времени отправления с работы $[t_2'; t_2'']$. Длительность этих интервалов совсем небольшая и они могут включать лишь один интервал времени модели, например, при 15-минутной дискретизации и времени начала рабочего дня 10:00 интервал желаемого времени прибытия

может быть задан как [9:45; 10:00]. Отклонение от этого графика нежелательно и влечет штрафную добавку к обобщенной цене. Пользователь минимизирует обобщенную цену с учетом этой штрафной добавки, и может отклониться от графика, если экономия обобщенных затрат окажется больше штрафной добавки. Например, пользователь может приехать на работу на 15 минут раньше, если при этом проведет на 10 минут меньше времени в пути, либо при проезде платного участка дороги на своем пути заплатит по гораздо более низкому тарифу. Запишем обобщенные затраты совершения цепочки передвижений $i \xrightarrow{t_1'} j \xrightarrow{t_2''} i$ способом m (отправление из района i в район j в интервале времени t_1' , отправление для возвратной поездки из j в i в интервале времени t_2''):

$$C_{ijt_1t_2}^m = \alpha c_{ijt_1}^m + \beta \max(t_1' - (t_1 + \tau_{ijt_1}^m), 0) +$$

$$+ \gamma \max((t_1 + \tau_{ijt_1}^m) - t_1'', 0) +$$

$$+ \alpha c_{jit_2}^m + \gamma \max(t_2' - t_2, 0) + \beta \max(t_2 - t_2'', 0).$$

Коэффициенты α , β и γ определяют чувствительность линейной штрафной функции к отклонению от желаемого расписания. Поскольку опоздание на работу или ранний уход с работы крайне нежелателен или вовсе невозможен, а более раннее прибытие на работу или более позднее отправление с работы с целью избежать пробки является типичным для крупных городов с более чем двукратным увеличением времени в пути в пиковые часы в сравнении со свободными временами, коэффициенты обычно удовлетворяют условию $\beta < \gamma < \alpha$.

Для цепочек передвижений с целью посещения объектов второго типа будем считать заданным интервал желаемого время прибытия к объекту $[t_1'; t_1'']$, гораздо более продолжительный, чем для объектов первого типа, и интервал желаемой длительности посещения объекта $[\Delta'; \Delta'']$. В таком случае штрафная функция для первой поездки останется без изменений, однако для второй поездки желаемое время отправления теперь не является жестко заданным, а определяется фактическим временем прибытия (начало посещения объекта) и длительностью посещения объекта. Обобщенные затраты на совершение цепочки передвижений $i \xrightarrow{t_1'} j \xrightarrow{t_2''} i$ способом m тогда можно записать в следующем виде:

$$C_{ijt_1t_2}^m = \alpha c_{ijt_1}^m + \beta \max(t_1' - (t_1 + \tau_{ijt_1}^m), 0) +$$

$$+ \gamma \max((t_1 + \tau_{ijt_1}^m) - t_1'', 0) +$$

$$+ \alpha c_{jit_2}^m + \gamma \max((t_1 + \tau_{ijt_1}^m + \Delta') - t_2, 0) +$$

$$+ \beta \max(t_2 - (t_1 + \tau_{ijt_1}^m + \Delta''), 0).$$

Для согласованности времен совершения первой и второй поездки цепочки необходимо при $t_2 < t_1 + \tau_{ijt_1}^m$ положить $C_{ijt_1t_2}^m = \infty$. Вообще методика позволяет использовать штрафные функции произвольного вида, так что в них можно отразить дополнительные более жесткие ограничения, например минимальную и максимальную продолжительность посещения объекта.

Расщепление корреспонденций по способам передвижения и времени отправления осуществляется с использованием модели дискретного выбора [5]. Здесь мы будем использовать простейшую логит-модель Multinomial Logit Model, для которой можно записать вероятность выбора альтернативы в следующей форме:

$$p_{ijt_1t_2}^{km} = \frac{e^{-\Theta C_{ijt_1t_2}^m}}{\sum_{m \in M_k} \sum_{t_1} \sum_{t_2} e^{-\Theta C_{ijt_1t_2}^m}}, m \in M_k,$$

где $p_{ijt_1t_2}^{km}$ – вероятность выбора способа и времени отправления для совершения цепочки передвижений $i \xrightarrow{t_1} j \xrightarrow{t_2} i$ пользователями группы k ; M_k – множество способов передвижения, доступных для пользователей группы k ; Θ – дополнительный параметр масштаба в логит-модели. Коэффициенты расщепления рассчитываются отдельно для каждой группы населения k , так что для поездок представителей первой группы доступны три альтернативы – на автомобиле, на общественном транспорте и пешком, а для поездок представителей второй группы населения – только последние две.

Для расчета общих суточных матриц корреспонденций сегмента спроса для различных групп пользователей нам было необходимо определить агрегированную оценку межрайонной дальности для каждой пары районов и группы пользователей. В рамках используемой нами модели дискретного выбора агрегированная оценка полезности передвижения из района i в район j для пользователей группы k определяется следующим соотношением:

$$e^{-\Theta C_{ij}^k} = \sum_{m \in M_k} \sum_{t_1} \sum_{t_2} e^{-\Theta C_{ijt_1t_2}^m}.$$

В итоге мы получили схему расчета матриц корреспонденций для каждого сегмента спроса, изображенную на рис. 2. При этом расчет коэффициентов расщепления $p_{ijt_1t_2}^{km}$ и агрегированных межрайонных дальностей C_{ij}^k может проводиться в едином цикле по всем парам районов. На выходе этой схемы мы имеем матрицу корреспонденций сегмента спроса для каждого интервала отправления и способа передвижения, после чего остается только сложить матрицы, соответствующие различным сегментам спроса.

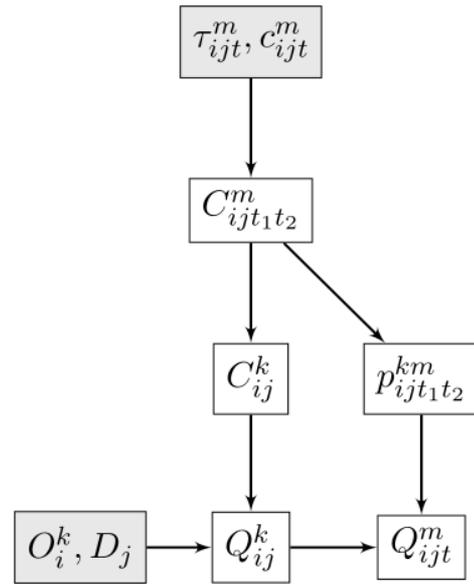


Рис. 2. Схема расчета матриц корреспонденций для одного сегмента спроса

3. Динамическое распределение корреспонденций по сети

Модель динамического распределения автотранспортных потоков состоит из двух структурных блоков, объединенных в единую итерационную процедуру поиска решения, – модели распределения корреспонденций по путям и модели динамической загрузки сети. Модель распределения корреспонденций по путям определяет зависящие от времени потоки (количество отправок по каждому пути) на основе цен путей. Среди различных принципов распределения корреспонденций наиболее часто используется метод детерминированного динамического равновесного распределения [6]. При таком распределении для каждой пары районов и интервала отправления ни один пользователь не может уменьшить фактическую обобщенную цену своего передвижения, изменив маршрут (предполагается, что все пользователи обладают полным и совершенным знанием условий движения в сети). Для поиска решения используются различные эвристические процедуры переноса части спроса с неоптимальных путей на оптимальные пути, наиболее эффективные из которых на текущий момент представлены в [7].

Модель динамической загрузки сети воспроизводит распространение потоков по сети при заданном распределении корреспонденций по путям и дает на выходе цены дуг и путей, которые затем используются на следующей итерации динамического распределения для оценки новых потоков

по путям. Для расчета загрузки сети при заданном распределении корреспонденций по путям могут использоваться, например, макрокопические модели первого порядка СТМ (Cell Transmission Model) [8] и LТМ (Link Transmission Model) [9], вместе с моделью [10], определяющей потоки в узлах сети.

Для системы общественного транспорта серьезные задержки в пути и образование очередей характерны в меньшей степени, а проблема недостаточной провозной способности линии в некоторых случаях может быть легко решена увеличением количества рейсов или вместимости подвижного состава, поэтому для распределения пассажирских потоков можно использовать статические алгоритмы на основе интервалов движения [11]. Динамические модели распределения пассажирских потоков могут потребоваться для моделирования сильно перегруженных систем общественного транспорта или систем с движением по расписанию вместо интервального движения, а также в задачах, где важна не средняя, а пиковая нагрузка на транспортную инфраструктуру, например, при проектировании транспортно-пересадочных узлов для оценки необходимой пропускной способности линий турникетов. Кроме того, при калибровке моделей в фактических данных обычно можно наблюдать расхождение общего входа и выхода за рассматриваемый период (например, утренний час пик) на станциях для какого-либо маршрута или системы транспорта (например, для метрополитена), в то время как статические модели предполагают стационарное распределение пассажиропотока. Динамические модели позволяют воспроизводить нестационарные явления, но потребуют большей детализации исходных данных, и для крупных сетей становится слишком трудоемкими. В [12] представлен обзор последних достижений в области моделирования общественного транспорта.

4. Вычислительные эксперименты

4.1. Исходные данные

Для проведения вычислительных экспериментов была использована небольшая тестовая сеть, изображенная на рис. 3, включающая 134 узла (в том числе 18 районов) и 276 дуг (в том числе 36 дуг-связей). Толстыми линиями на рисунке выделены магистральные дороги с четырьмя полосами движения в каждом направлении, пропускной способностью 1800 авт./час на полосу и свободной скоростью 80 км/ч. Остальные подъездные дороги имеют 2-3 полосы движения в каждом на-

правлении, пропускную способность 1200 авт./час на полосу и свободную скорость 40 км/ч. Поскольку основной целью тестовых расчетов является демонстрация дополнительных возможностей предлагаемой методики в сравнении с традиционными 4-шаговыми моделями, в тестовой модели рассматривается только один способ передвижения – на легковом автомобиле. Период моделирования составлял 14 часов с 7.00 до 21.00 с дискретизацией по 10-минутным интервалам. Расчет загрузки сети в модели динамического распределения потоков производился с помощью модели LТМ с шагом в 30 секунд.

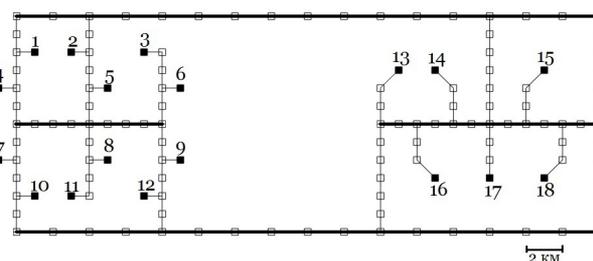


Рис. 3. Сеть для вычислительных экспериментов

Перейдем к описанию структуры транспортного спроса. В тестовой модели предполагается, что население города совершает простые цепочки передвижений, состоящие из двух звеньев, на работу и в прочие объекты. Трудовые поездки жестко привязаны ко времени, и для них задано распределение желаемого времени прибытия на работу (08:50-09:00 – 20%, 09:20-09:30 – 10%, 09:50-10:00 – 40%, 10:20-10:30 – 10%, 10:50-11:00 – 20%) и продолжительность рабочего дня (8 часов). Для прочих, культурно-бытовых поездок, задан промежуток желаемого времени посещения объекта (с 10:00 до 18:00) и желаемая продолжительность посещения (1,5 часа). Большая часть населения области моделирования сосредоточена в левой части сети в районах 1–12 (80%), большая часть рабочих мест – в районах 13–18 правой части сети (70%), емкости прочих объектов распределены по всем районам равномерно. Общее число передвижений выбрано таким образом, чтобы обеспечить образование заторов в узлах и их распространение по сети в пиковые часы.

4.2. Сходимость модели

Рассмотрим для начала общую сходимость «больших» итераций нашей схемы. Для этого начнем итерационный процесс с затрат по пустой сети, что, очевидно, является не самым лучшим начальным приближением, и на каждой итерации будем рассчитывать агрегированный показатель

сходимости – относительную разность суммарных входных и выходных затрат (до их усреднения с входными затратами):

$$R = \frac{\sum_{i,j,t} Q_{ijt} |c_{ijt}^{out} - c_{ijt}^{in}|}{\sum_{i,j,t} Q_{ijt} c_{ijt}^{in}}$$

На рис. 4 приведен график этой величины в зависимости от номера итерации (ряд «Расчет 1»). После 6 итераций при старте с пустой сети был достигнут уровень сходимости порядка 10^{-2} , а после 20 итераций 10^{-3} , при этом в пиковые утренние и вечерние часы отдельные участки сети были серьезно перегружены. В другом расчете (ряд «Расчет 2»), который будет описан в разделе 4.4, пропускная способность дорог, соединяющих правую и левую части города была увеличена, загрузка сети снизилась, и уровень сходимости после 20 итераций достиг значения $2 \cdot 10^{-5}$. Полученные результаты тестовых расчетов показывают, что уровень сходимости, который может быть достигнут в модели, является достаточным для оценки с ее помощью влияния различных изменений в транспортной системе.

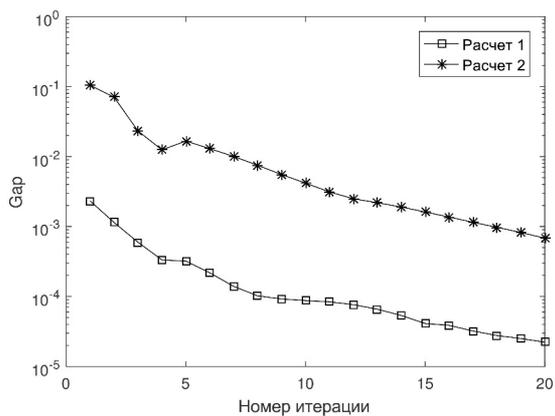


Рис. 4. Сходимость «больших» итераций модели

4.3. Распределение поездок по времени отправления

На рис. 5 приведены диаграммы распределения поездок цепочек Дом-Работа-Дом и Дом-Прочее-Дом по времени отправления для всех районов. Поездки Дом-Работа оказались более равномерно распределены по времени отправления, чем возвратные поездки ввиду различий межрайонных времен. При этом распределение поездок Дом-Работа по времени прибытия оказывается схожим с распределением возвратных поездок по времени отправления и сконцентрировано вблизи заданных нами желаемых интервалов прибытия на работу. Поездки Дом-Прочее-Дом могут совершаться в

широком диапазоне времен, потому их распределение сосредоточено во внепиковые часы. Благодаря таким «гибким» поездкам в транспортной системе может в определенные часы устанавливаться стационарное распределение потоков, даже при высоком уровне загрузки и наличии заторов в сети, длина которых в течение длительных интервалов времени будет оставаться постоянной.

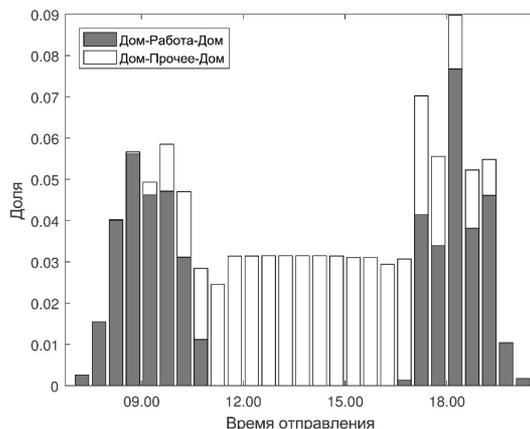


Рис. 5. Распределение поездок по времени отправления для различных цепочек

4.4. Оценка влияния изменений в транспортной системе

Изменения в транспортной системе могут носить самый различный характер:

- изменения в транспортной сети, например, строительство новых дорог, реконструкция существующих дорог, изменение пересечений дорог (режим работы светофорных объектов, устройство транспортных развязок, изменение приоритетов движения на перекрестках), изменение режима платности дорог и т.д.
- изменения транспортного спроса, например, изменение общего количества совершаемых передвижений (изменение численности населения или подвижности), изменение структуры транспортного спроса (количество цепочек передвижений, совершаемых с определенными целями, желаемое время посещения различных объектов) и т.д.
- изменения пространственного размещения различных объектов по территории области моделирования, например, строительство нового жилого района, крупного торгово-развлекательного комплекса и т.д.

Транспортные модели позволяют производить расчет различных вариантов изменений и сравнивать их между собой для выбора самого оптимального решения. Использование динами-

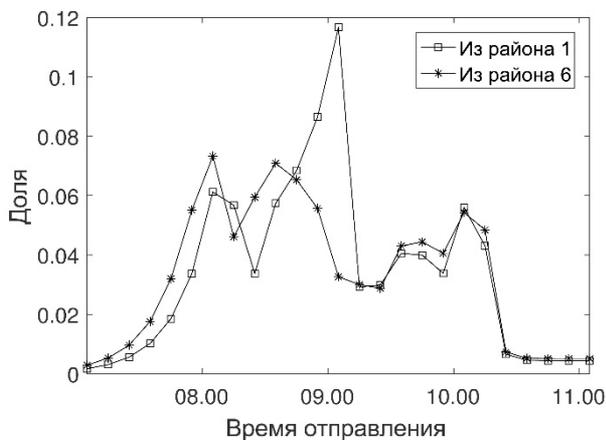
ческого распределения в моделях позволяет как расширить спектр изменений, которые могут быть протестированы в модели (например, могут тестироваться схемы взимания платы в зависимости от времени суток), так и повысить точность прогноза благодаря более реалистичной модели загрузки сети и моделированию дополнительных аспектов транспортного поведения, связанных с выбором времени отправления.

Рассмотрим следующее потенциальное изменение в нашей транспортной системе: строительство новой дороги, связывающей две части города по его главной горизонтальной оси, соединяющей осевые магистрали в двух различных частях. В результате строительства новой дороги происходит перераспределение потоков и изменение зависящих от времени отправления межрайонных цен и матриц корреспонденций. При этом изменяются как полные суточные корреспонденции, так и индивидуальные распределения корреспонденций по времени отправления для каждой пары районов. Так, общее отправление из района 6 в правую часть города увеличилось на 57% вследствие существенного сокращения времени в пути. Общее отправление из района 1 в правую часть города, напротив, снизилось на 25% ввиду того, что до строительства новой дороги район 1 был одним из наиболее близких к правой части города в смысле обобщенной цены передвижения, а после строительства стал одним из самых удаленных. Тем самым его относительная удаленность от правой части города в сравнении с другими районами увеличилась, что привело к снижению корреспонденции (появились более близкие места жительства для работающих в правой части города, например, район 6). На рис. 6, б приведены распределения по времени отправления

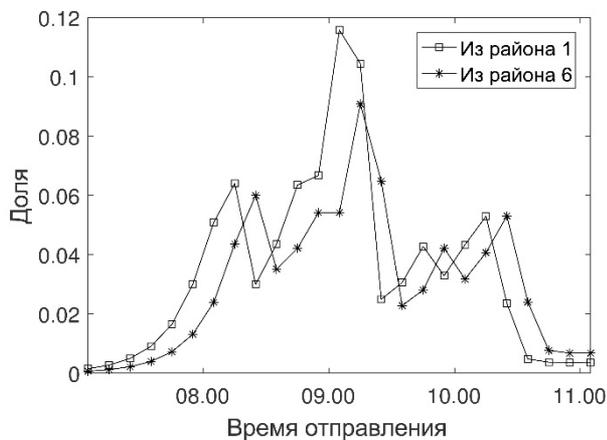
для поездок в правую часть города из районов 1 и 6 после строительства новой дороги. Видно, что временной профиль отправлений для района 6 сильно сдвинулся в правую сторону относительно профиля отправлений до изменений (рис. 6, а) ввиду снижения времени поездки в правую часть города в среднем на 21 минуту с 49 до 28. Среднее время поездки из района 1 при этом также снизилось, но не существенно – с 44 до 39 минут.

Заключение

В работе представлена комплексная методика прогноза потоков в транспортной системе крупного города на основе динамического распределения корреспонденций по сети. Предложена модифицирующая стандартной четырехшаговой схемы, позволяющая рассчитывать матрицы корреспонденций в сильно загруженных транспортных сетях, где цена передвижений зависит от времени отправления, и формировать индивидуальные временные профили отправлений для каждой пары районов и способа передвижения. Расчет матриц корреспонденций производится с учетом доступности способов передвижения для различных групп населения и связанности передвижений в цепочки. Предлагаемая модель позволяет прогнозировать потенциальные изменения корреспонденций и загрузки транспортной сети и производить оценку эффективности различных инфраструктурных проектов, мер регулирования транспортного спроса и стратегий управления дорожным движением. В дальнейшем планируется провести работу по повышению вычислительной эффективности предлагаемой модели и ее практической реализации для одного из крупных российских городов.



а)



б)

Рис. 6. Распределение поездок по времени отправления в утренние часы из различных районов в левой части города в районы в правой части: а – до предполагаемых изменений; б – после предполагаемых изменений

Литература

1. Алиев А. С., Мазурин Д. С., Максимова Д. А., Швецов В. И. Структура комплексной модели транспортной системы г. Москвы // Труды ИСА РАН. 2015. Т. 65, № 1. С. 3–15.
2. Sheffi Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods. Prentice-Hall. 1985.
3. Peeta S., Ziliaskopoulos A. K. Foundations of Dynamic Traffic Assignment: The Past, the Present and the Future // Networks and Spatial Economics. 2001. Vol. 1, no. 3. P. 233–265.
4. Алиев А. С., Мазурин Д. С., Швецов В. И. Модель транспортных потоков на основе 4-шаговой схемы с учетом цепочек передвижений // Труды ИСА РАН. 2016. Т. 66, № 1. С. 3–9.
5. Ben-Akiva M., Bierlaire M. Discrete choice models with applications to departure time and route choice. In Handbook of Transportation Science, 2nd edition. – Kluwer. 2003. P. 7-38.
6. Szeto W. Y., Wong S. C. Dynamic traffic assignment: model classifications and recent advances in travel choice principles // Central European Journal of Engineering. 2012. Vol. 2, no. 1. P. 1–18.
7. Gentile G. Solving a Dynamic User Equilibrium model based on splitting rates with Gradient Projection algorithms // Transportation Research Part B: Methodological. 2016. Vol. 92. P. 120–147.
8. Daganzo C. F. The cell transmission model, part II: Network traffic // Transportation Research Part B: Methodological. 1995. Vol. 29, no. 2. P. 79–93.
9. Yperman I. The Link Transmission Model for Dynamic Network Loading: Ph.D. thesis / Katholieke Universiteit Leuven. 2007.
10. Tampère C. M., Corthout R., Catrysse D., Immers L. H. A generic class of first order node models for dynamic macroscopic simulation of traffic flows // Transportation Research Part B: Methodological. 2011. Vol. 45, no. 1. P. 289–309.
11. Spiess H., Florian M. Optimal strategies: A new assignment model for transit networks // Transportation Research Part B: Methodological. 1989. Vol. 23, no. 2. P. 83–102.
12. Gentile G., Noekel K. Modelling Public Transport Passenger Flows in the Era of Intelligent Transport Systems: COST Action TU1004 (TransITS). Springer Tracts on Transportation and Traffic. Springer International Publishing, 2016. ISBN: 978-3-319-25082-3.

Мазурин Дмитрий Сергеевич. Математик, ИСА ФИЦ ИУ РАН. Окончил в 2013 г. МФТИ. Количество печатных работ: 7. Область научных интересов: моделирование транспортных потоков.
E-mail: mazurin@isa.ru

Integrated transport demand modeling based on dynamic traffic assignment

D. S. Mazurin

Abstract. The article presents an integrated modeling framework for predicting traffic and passenger flows in large city transport system based on dynamic assignment models. Besides trip distribution and modal choice, the model incorporates departure time choice and produces individual departure time distributions for each origin-destination pair and transport mode. The model takes into account trip chaining and transport modes availability to produce consistent origin-destination matrices. Dynamic traffic assignment plays a crucial role in the proposed model formulation and can produce realistic time-dependent network loading with congestion spillback.

Keywords: *transport modeling, origin-destination matrix, dynamic traffic assignment*

References

1. *Aliev A. S., Mazurin D. S., Maksimova D. A., Shvetsov V. I.* Struktura kompleksnoj modeli transportnoy sistemy g. Moskvy [The structure of the complex model of the transport system of Moscow] // Trudy ISA RAS [ISA RAS Proceedings]. 2015. Vol. 65, no. 1. P. 3–15.
2. *Sheffi Y.* Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods. Prentice-Hall, 1985.
3. *Peeta S., Ziliaskopoulos A. K.* Foundations of Dynamic Traffic Assignment: The Past, the Present and the Future // Networks and Spatial Economics. 2001. Vol. 1, no. 3. P. 233–265.
4. *Aliev A. S., Mazurin D. S., Shvetsov V. I.* Model' transportnyh potokov na osnove 4-shagovoy shemy s uchetom cepochek peredvizhenij [Model of traffic flows based on the 4-step scheme with the chains of trips] // Trudy ISA RAS [ISA RAS Proceedings]. 2016. Vol. 66, no. 1. P. 3–9.
5. *Ben-Akiva M., Bierlaire M.* Discrete choice models with applications to departure time and route choice. In Handbook of Transportation Science, 2nd edition. – Kluwer. 2003. P. 7-38.
6. *Szeto W. Y., Wong S. C.* Dynamic traffic assignment: model classifications and recent advances in travel choice principles // Central European Journal of Engineering. 2012. Vol. 2, no. 1. P. 1–18.
7. *Gentile G.* Solving a Dynamic User Equilibrium model based on splitting rates with Gradient Projection algorithms // Transportation Research Part B: Methodological. 2016. Vol. 92. P. 120–147.
8. *Daganzo C. F.* The cell transmission model, part II: Network traffic // Transportation Research Part B: Methodological. 1995. Vol. 29, no. 2. P. 79–93.
9. *Yperman I.* The Link Transmission Model for Dynamic Network Loading: Ph.D. thesis / Katholieke Universiteit Leuven. 2007.
10. *Tampère C. M., Corthout R., Cattrysse D., Immers L. H.* A generic class of first order node models for dynamic macroscopic simulation of traffic flows // Transportation Research Part B: Methodological. 2011. Vol. 45, no. 1. P. 289–309.
11. *Spiess H., Florian M.* Optimal strategies: A new assignment model for transit networks // Transportation Research Part B: Methodological. 1989. Vol. 23, no. 2. P. 83–102.
12. *Gentile G., Noekel K.* Modelling Public Transport Passenger Flows in the Era of Intelligent Transport Systems: COST Action TU1004 (TransITS). Springer Tracts on Transportation and Traffic. Springer International Publishing, 2016. ISBN: 978-3-319-25082-3.

Mazurin Dmitry Sergeevich. Mathematician, ISA FRC CSC RAS. Scientific papers: 7. Research interests: transport modeling. E-mail: mazurin@isa.ru