

Структура данных для калибровки транспортной модели города*

Д. С. МАЗУРИН, В. И. ШВЕЦОВ

Аннотация. Представлена общая схема калибровки транспортной модели крупного города, в основе которой лежит иерархическая структура данных. Такая структура содержит данные разной степени агрегированности относительно разных аспектов работы транспортной системы и предполагает поэтапную калибровку модели, начиная с калибровки по суточным общегородским показателям, и в дальнейшем переходя к детализации по времени суток, зонам города и т. д. Описан банк данных для калибровки транспортной модели московской агломерации.

Ключевые слова: моделирование транспортных потоков, калибровка модели, структура данных.

Введение

Транспортные проблемы являются одними из наиболее важных проблем в развитии крупных городов, и их решение невозможно без применения математического моделирования. Модели транспортных потоков позволяют осуществить прогноз автомобильных и пассажирских потоков в транспортных сетях, оценить различные варианты развития транспортной инфраструктуры и оптимизировать работу транспортной системы.

Классическим подходом к решению задачи прогноза транспортных потоков в сети крупного города является четырехшаговая схема, включающая в себя:

- оценку объемов прибытия и отправления (trip generation);
- расчет матриц корреспонденций (trip distribution);
- расщепление корреспонденций по способам передвижений (modal split);
- распределение корреспонденций по транспортной сети (trip assignment).

Важной особенностью задачи является наличие в системе обратных связей, что делает вышеприведенные шаги тесно связанными друг с другом и приводит к необходимости организации итерационного процесса расчета равновесия. Более подробно о четырехшаговой схеме можно прочитать, например, в [1, 2].

Наиболее важным и сложным этапом разработки транспортной модели города является ее калиб-

ровка. На этом этапе проводятся работы по сопоставлению расчетных данных модели с фактически данными, полученными в ходе обследований. В случае их расхождения производится коррекция параметров модели, направленная на повышение степени соответствия модели наблюдениям.

Большая часть работ по калибровке транспортных моделей посвящена калибровке их отдельных элементов: гравитационной модели расчета межрайонных корреспонденций [3–5] или модели выбора способа передвижения [6, 7]. Что же касается калибровки модели расчета загрузки в целом, то здесь традиционный подход предполагает сравнение расчетных данных с фактическими на некоторой выборке элементов сети, а также расчет агрегированных показателей качества модели, таких как коэффициент корреляции, абсолютная и относительная средняя ошибка, абсолютная и относительная среднеквадратичная ошибка и другие (см., например, [8]). Однако этот метод не позволяет явно идентифицировать требующие коррекции параметры и представляется ненадежным в силу обычной зашумленности фактических данных.

В данной работе предлагается новый подход к калибровке транспортной модели, основанный на использовании иерархической структуры данных. Такая структура предполагает поэтапную калибровку модели «сверху вниз», начиная с калибровки по суточным общегородским показателям и в дальнейшем переходя к детализации по времени суток, зонам города и т. д. При этом на каждом этапе калибровки используются данные по разным аспектам работы транспортной системы, что обеспечивает

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

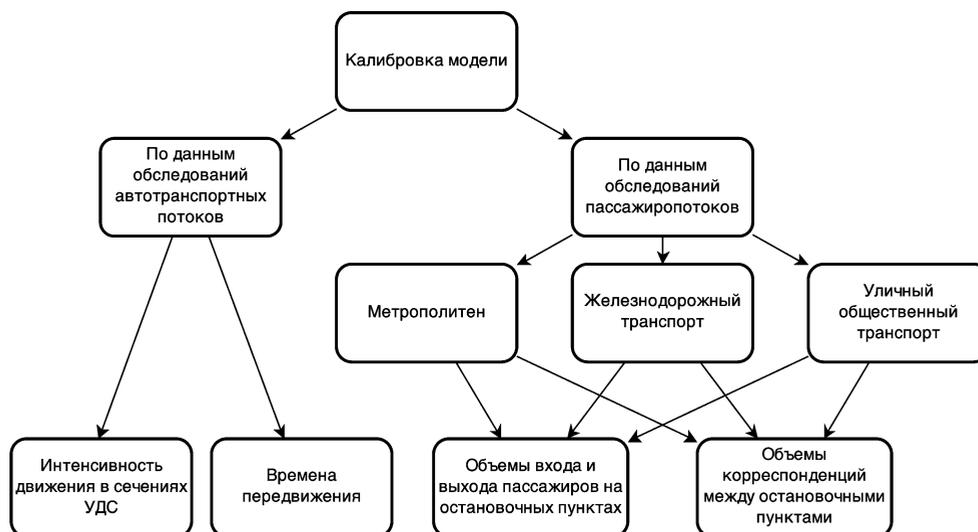


Рис. 1. Классификация данных для калибровки модели загрузки транспортной сети

комплексный контроль точности прогноза загрузки транспортной сети.

В ходе реализации данной методики на каждом этапе подвергаются коррекции только те параметры модели, которые соответствуют уровню используемой на данном этапе информации в иерархии. На начальном этапе калибровки по суточным общегородским показателям калибруемые параметры носят глобальный характер: общая суточная подвижность и структура передвижений, параметры функции тяготения в гравитационной модели корреспонденций, параметры расщепления по видам транспорта, коэффициенты в ценовой функции дуги улично-дорожной сети (УДС) и т. д. По мере спуска по уровням иерархической структуры информации в калибровку включаются локальные параметры. При этом локальность может быть выражена как в пространственном контексте (емкости отдельных районов или характеристики отдельных дуг улично-дорожной сети), так и во временном (структура передвижений в утренний, дневной или вечерний час).

В разделе 3 изложены основные принципы формирования иерархической структуры данных для калибровки транспортной модели московской агломерации [9]. В качестве исходной информации используются замеры интенсивности автотранспортных потоков в сечениях улично-дорожной сети, времени движения по заданным маршрутам и объемов входа и выхода пассажиров на остановочных пунктах общественного транспорта.

1. Виды и источники исходных данных

Прежде чем перейти к описанию иерархической структуры данных для калибровки транспорт-

ной модели, перечислим виды используемых данных и их источники. Калибровка модели загрузки транспортной сети города может осуществляться по данным обследований автотранспортных и пассажирских потоков (рис. 1). Последние можно в свою очередь подразделить на потоки в метрополитене, потоки на железнодорожном транспорте и потоки на уличном общественном транспорте (автобусы, троллейбусы, трамваи).

Данные обследований автотранспортных потоков представляют собой замеры интенсивности движения в отдельных сечениях улично-дорожной сети. Как правило, эти замеры осуществляются автоматически с помощью детекторов транспорта, но возможен и вариант ручных замеров.

Обследования пассажиропотоков могут проводиться как на остановочных пунктах общественного транспорта, так и между ними. Наиболее распространен первый вариант: данные о входах и выходах пассажиров на станциях метрополитена или железнодорожных станциях, а также данные о посадке и высадке пассажиров на остановках уличного общественного транспорта. Второй же вариант подразумевает расчет фактических корреспонденций между станциями с помощью фиксации места отправления и места назначения пассажиров либо с помощью оценки наполненности салона транспорта.

Помимо вышеупомянутых источников данных для калибровки транспортной модели могут использоваться GPS-треки и геоданные операторов мобильной связи. Они позволяют сделать некоторые выводы о структуре передвижений: подвижности населения, расщеплении по способам передвижений, распределении дальности и длительности поездок, соотношении корреспонденций между районами и т. д.

Однако такие данные в настоящее время не являются широкодоступными.

2. Иерархическая структура данных

На основе описанных выше исходных данных формируется иерархическая структура показателей для калибровки модели. Эта структура содержит данные разной степени агрегированности относительно разных аспектов работы транспортной системы и предполагает поэтапную калибровку модели «сверху вниз».

Начальный этап калибровки представляет собой калибровку по суточным общегородским показателям — верхнему уровню иерархии информации. В качестве таких показателей можно выбрать общее число совершаемых за сутки поездок в метро, на железнодорожном транспорте или на уличном общественном транспорте. Также можно использовать суммарную интенсивность потока в ряде сечений УДС, если выборка сечений равномерно и достаточно плотно покрывает всю сеть. Выбор показателей здесь, как и всюду в дальнейшем, ограничивается имеющимися в распоряжении исходными данными. В зависимости от соотношения модельных и фактических показателей для различных видов транспорта может потребоваться либо изменение общего объема передвижений и их дальности за счет коррекции подвижности, структуры передвижений и параметров функции тяготения, либо перераспределение передвижений между видами транспорта за счет коррекции параметров модального расщепления и ценовых функций.

Для дальнейшей калибровки модели необходимо детализировать суточные общегородские показатели. Самой простой является детализация данных по времени суток. Каждый показатель в таком случае будет относиться к конкретному времени суток: утреннему, дневному или вечернему часу. Такая детализация необходима для коррекции распределения поездок с различной целью по времени суток, которое используется при расчете часовых матриц корреспонденций.

Помимо детализации данных по времени суток, показательна и легко осуществима пространственная детализация по зонам города. Все исходные данные наблюдений могут быть отнесены к узлам (объемы входа и выхода пассажиров на остановочных пунктах), к дугам (интенсивность движения в сечениях УДС) или к маршрутам (времена передвижения по заданным маршрутам или объемы корреспонденций между остановочными пунктами). В соответствии с этим будут различаться принципы

агрегирования исходных данных (эта процедура эквивалентна детализации уже агрегированных общегородских параметров) по территориальному признаку. Данные, отнесенные к узлам, группируются по признаку принадлежности узлов к различным зонам. Число классов в таком случае будет совпадать с числом территориальных зон. Для данных, отнесенных к дугам, количество классов равно количеству упорядоченных пар граничащих между собой территориальных зон (z_1, z_2) , и данные по всем дугам, ведущим из зоны z_1 в зону z_2 , агрегируются в один показатель. Аналогично для данных, отнесенных к маршрутам (здесь территориальные зоны в паре уже не обязательно должны граничить между собой).

Для калибровки модели грузовых потоков может использоваться детализация автотранспортных потоков по типам. Современные детекторы транспорта способны классифицировать проезжающие транспортные средства по длине, что позволяет условно разделить поток на легковой и грузовой (сюда же будет отнесен и уличный общественный транспорт).

Детализация показателей в различных направлениях может осуществляться как последовательно, так и параллельно. К примеру, при последовательной детализации по времени суток и зонам города сначала рассчитываются показатели для утреннего, дневного и вечернего часа, каждый из которых затем расшифровывается с использованием показателей по зонам. При аналогичной параллельной детализации суточные общегородские показатели расшифровываются отдельно и независимо друг от друга как по времени суток, так и по территориальному признаку.

Последний, самый детальный уровень иерархической структуры информации — это исходные данные по отдельным элементам сети: дугам УДС, остановочным пунктам общественного транспорта, маршрутам. На основе этой информации могут быть скорректированы локальные параметры модели: характеристики дуг УДС (количество полос, свободная скорость, пропускная способность на полосу), разрешенные в узлах повороты и их стоимости, емкости отдельных районов и т. д. Данный этап калибровки рекомендуется осуществлять только в том случае, если используемые методы и средства сбора данных гарантируют высокую степень их достоверности.

3. Применение к модели московской агломерации

Для иллюстрации изложенного выше подхода опишем структуру информации, которая использу-

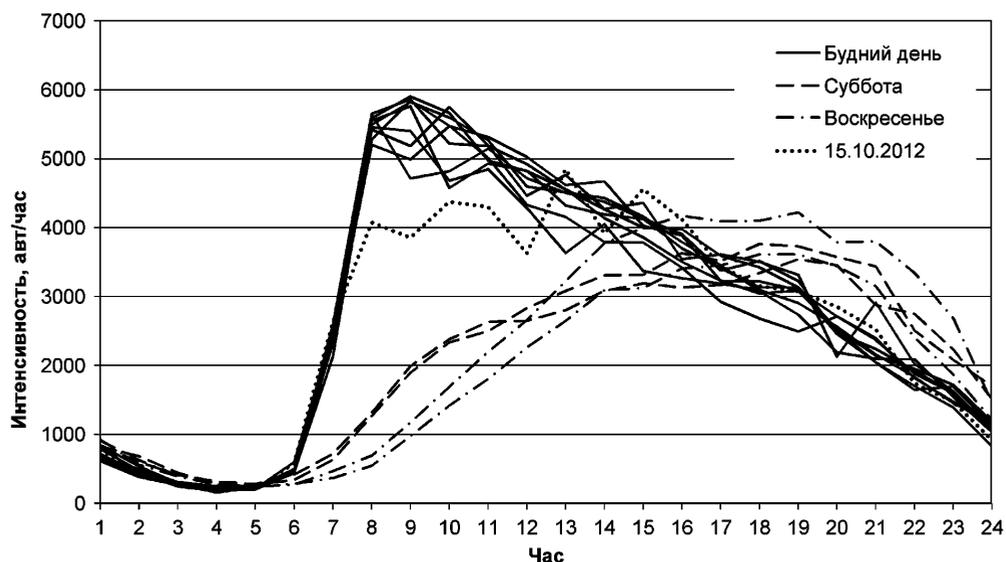


Рис. 2. Типичные графики часовых потоков по дням для направления в центр

ется нами в настоящее время для калибровки транспортной модели московской агломерации.

3.1. Автотранспортные потоки

Сбор данных об интенсивности автотранспортных потоков осуществляется автоматически с помощью детекторов, которые позволяют помимо интенсивности потока определять среднюю скорость движения и занятость дороги по полосам и осуществлять классификацию транспортных средств по длине. Для получения наиболее достоверных данных обследования рекомендуется проводить в апреле или октябре — это минимизирует влияние на результаты погодных условий и сезонных колебаний подвижности.

После сбора данных об интенсивности потоков за различные дни необходимо провести усреднение полученных значений. Выходные и праздничные дни сразу исключаются из выборки. Кроме того, результаты замеров, проводимых в пятницу, обычно немного отличаются от результатов за остальные рабочие дни. Таким образом, в усреднении лучше всего использовать только данные за рабочие дни, кроме пятницы. На рис. 2 изображены графики часовых потоков по дням для одного из сечений УДС по направлению в центр. Для графика от 15.10.2012 (понедельник) характерно значительное отклонение интенсивности потока в промежутке с 7.00 до 12.00 от обычной интенсивности потока в это время в будний день, что может быть вызвано возникновением нетипичного затруднения дорожного движения в данном сечении в результате дорожно-транспортных происшествий или ремонтных работ. Такие дни также необходимо исключить

из усреднения. На основании усредненных за различные дни часовых потоков производится расчет средних потоков для утреннего (с 8.00 до 10.00), дневного (с 10.00 до 17.00) и вечернего (с 17.00 до 19.00) часа.

Ввиду ярко выраженной радиально-кольцевой структуры дорожной сети в Москве естественно в качестве территориальных зон выбрать кольцевые зоны. Три кольцевые магистрали — Садовое кольцо, Третье транспортное кольцо (ТТК) и Московская кольцевая автомобильная дорога (МКАД) — разбивают Московскую агломерацию на четыре кольцевые зоны: центральную (внутри Садового кольца), срединную (между Садовым кольцом и ТТК), периферийную (между ТТК и МКАД) и областную (за МКАД). Будем придерживаться этого территориального деления, дополнительно разделив периферийную зону на две промежуточным контуром, на севере и востоке совпадающим с Малым кольцом Московской железной дороги (рис. 3).

Вместе с тремя буферными зонами, включающими кольцевые магистрали с развязками, имеем восемь кольцевых зон и семь замкнутых контуров (на рис. 3 они пронумерованы), разграничивающих эти зоны. При этом каждой кольцевой магистрали соответствуют два контура — один с внешней стороны и один с внутренней. На карте-врезке на рис. 3 изображены внешний и внутренний контуры для МКАД (пересечение с Новорязанским шоссе) и отмечены по два детектора для каждого контура: один фиксирует транспортные средства, движущиеся по направлению в центр, другой — в область. Семь контуров и два возможных направления

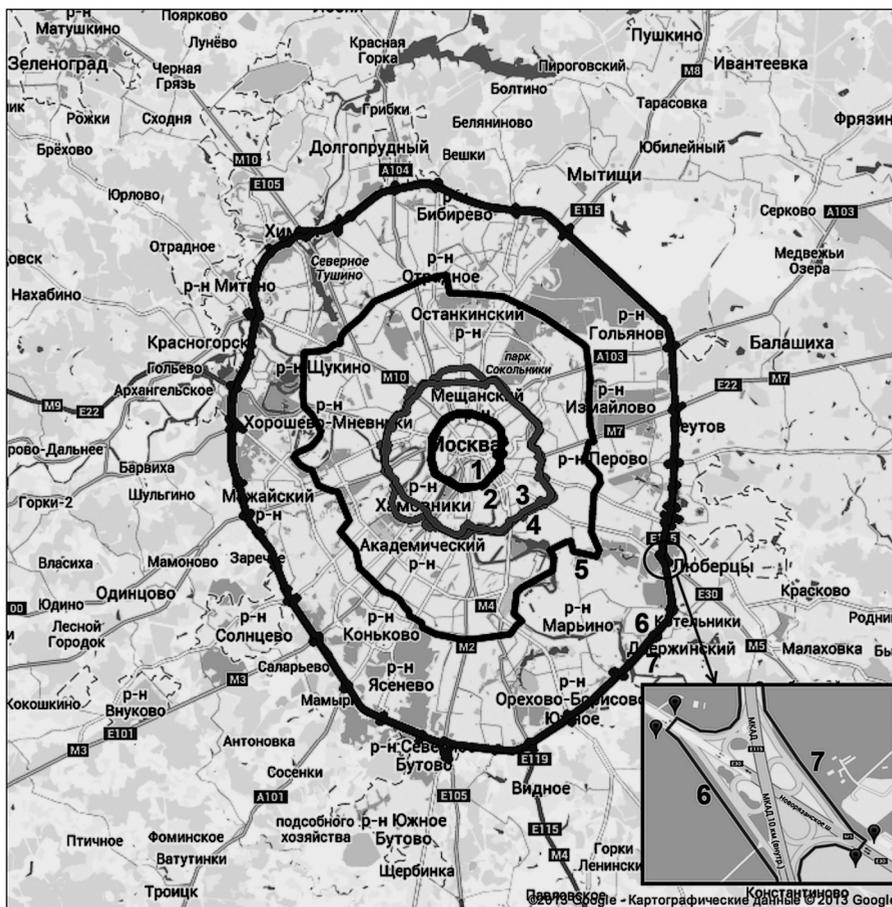


Рис. 3. Кольцевые зоны и расположение детекторов

их пересечения формируют классификацию детекторов из 14 групп.

Вместе с потоками между кольцевыми зонами также в калибровке модели московской агломерации используются значения интенсивности движения по самим кольцевым магистралям, которые рассчитываются как сумма интенсивностей потоков на множестве обследованных дуг.

Описанные выше показатели формируют структуру данных, представленную на рис. 4. Верхний уровень включает один показатель — суммарную суточную интенсивность потока на множестве обследованных дуг, следующие два уровня представляют дальнейшую детализацию по времени суток и территориальным зонам.

Стоит отметить, что расчетные значения загрузки сети в статической модели представляют собой не реальную интенсивность потока (как данные обследований), а транспортный спрос, который может превышать пропускную способность магистралей. Поэтому превышение расчетных потоков над фактическими — это вполне допустимое явление,

которое можно объяснить ограниченной пропускной способностью дорог и возникновением заторов.

Помимо обследований интенсивности автотранспортных потоков в калибровке модели московской агломерации используются и замеры времени движения по различным маршрутам. Эти замеры производятся с помощью информационных сервисов (Яндекс. Карты и Google Maps), предоставляющих возможность расчета времени движения по маршруту с учетом текущей загруженности дорог. При этом фактический проезд по маршруту не требуется. Такая информация вместе с данными об интенсивности потоков позволяет калибровать параметры ценовых функций дуг УДС.

3.2. Пассажирские потоки

Основой системы общественного транспорта в Москве является метрополитен, пассажиры которого совершают около 9 миллионов поездок в сутки. Для калибровки модели используются данные об объемах входа и выхода пассажиров. Сбор данных о входе пассажиров осуществляется автоматически с помощью турникетов, которыми оборудованы все

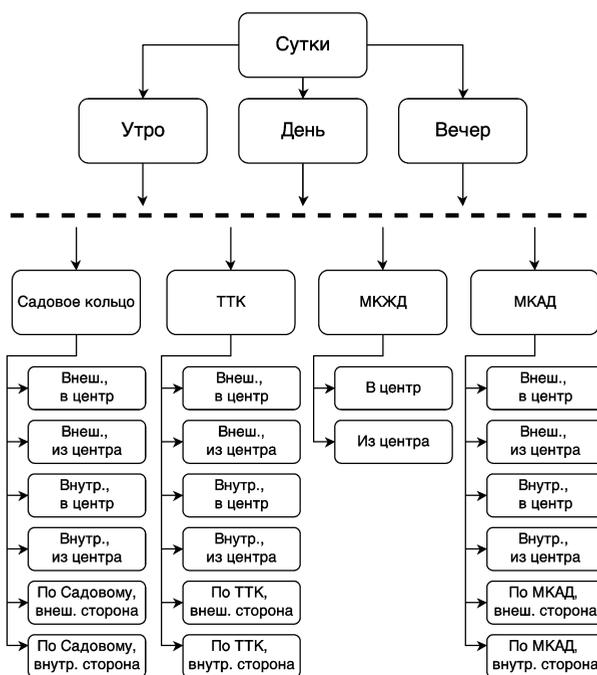


Рис. 4. Структура данных для калибровки модели (автотранспортные потоки)

станции Московского метрополитена, о выходе — вручную.

Предлагаемая структура информации о пассажиропотоках в метрополитене изображена на рис. 6. Верхний уровень иерархической структуры данных включает один показатель — общее количество совершаемых за сутки поездок в метрополитене. Следующий уровень соответствует детализации по времени суток и аналогичен соответствующему уровню в структуре данных по автотранспортным потокам. Московский метрополитен, так же как и улично-дорожная сеть, имеет радиально-кольцевую структуру. Этим обусловлен выбор для пространственной детализации кольцевых зон: станции внутри Кольцевой линии, станции Кольцевой линии (и связанные с ними переходами), станции срединной зоны (в пределах 4–5 станций от Кольцевой линии) и станции периферийной зоны (см. рис. 5). Для каждой из зон «Срединная» и «Периферийная» также введена дальнейшая детализация на подзоны «Север», «Восток», «Юг», «Запад».

В отличие от метрополитена, в котором установлена единая стоимость проезда между любыми двумя станциями, на железнодорожном транспорте пассажиры обычно приобретают разовые или абонементные билеты от станции отправления до станции назначения. Исключение составляют некоторые абонементы, позволяющие без ограничения числа поездок перемещаться между любыми станциями в пределах зоны действия этих абонементов (напри-

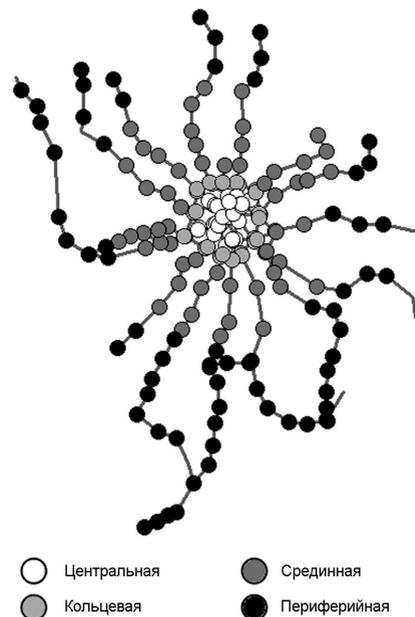


Рис. 5. Классификация станций метрополитена по кольцевым зонам

мер, абонемент «Большая Москва»). Как разовые, так и абонементные билеты используются пассажирами для прохода через турникеты на входе и на выходе. Такая система теоретически позволяет определить фактические корреспонденции между любыми двумя станциями. Однако большинство железнодорожных станций Московского транспортного узла

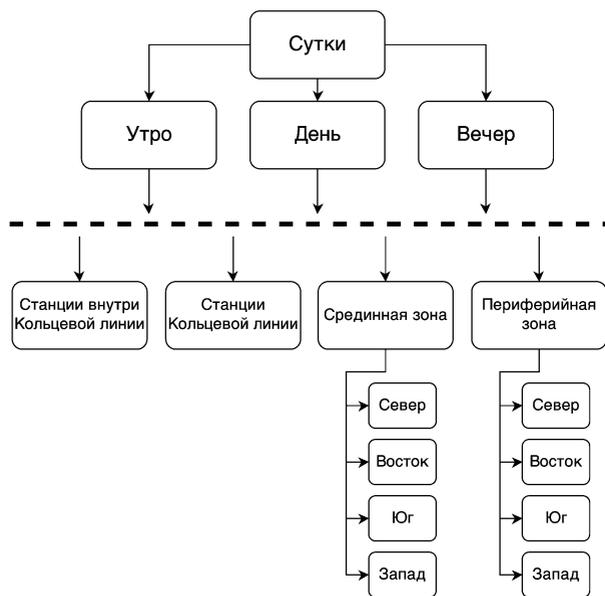


Рис. 6. Структура данных для калибровки модели (метрополитен)

не оборудовано турникетами для входа и выхода пассажиров, поэтому в настоящее время структуру передвижений возможно определить только по приобретенным разовым билетам.

Для калибровки модели используется более доступная информация — данные об объемах входа и выхода пассажиров на железнодорожных станциях, оборудованных турникетами. Помимо железнодорожных вокзалов это главным образом станции, связанные удобными пересадками с метрополитеном. Количество таких станций в Москве невелико, поэтому детализация по зонам не осуществляется, и иерархическая структура включает всего два уровня: суточные и детализированные по времени суток суммарные объемы входа и выхода на обследованных станциях.

Последним видом общественного транспорта в модели является уличный общественный транспорт (автобусы, троллейбусы и трамваи). В качестве исходных данных для калибровки используются информация об объемах входа и выхода пассажиров на остановочных пунктах у станций метрополитена. В связи с этим иерархическая структура данных для калибровки аналогична описанной выше структуре для метрополитена.

4. Заключение

В работе представлена схема калибровки транспортной модели крупного города, в основе которой лежит иерархическая структура данных различной

степени агрегированности. Такая структура предполагает поэтапную калибровку модели, начиная с калибровки по суточным общегородским показателям, и в дальнейшем переходя к детализации по времени суток, зонам города и т. д. При этом на каждом этапе калибровки используются данные по разным аспектам работы транспортной системы, что обеспечивает комплексный контроль точности прогноза загрузки транспортной сети. Предлагаемый метод калибровки модели «сверху вниз» позволяет легче обнаружить проблемные места модели и идентифицировать требующие коррекции параметры.

Более подробно рассмотрена реализация предлагаемого подхода для калибровки транспортной модели московской агломерации. Используемые на момент написания работы исходные данные для калибровки модели включают в себя:

- данные об интенсивности автотранспортных потоков;
- данные об объемах входа и выхода пассажиров на станциях метрополитена;
- данные об объемах входа и выхода пассажиров на железнодорожных станциях;
- данные об объемах посадки и высадки пассажиров на остановках общественного транспорта вблизи станций метрополитена;
- данные о времени передвижения по заданным маршрутам.

Также в работе обсуждаются возможности сбора и использования для калибровки модели других типов данных.

Литература

1. Швецов В. И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. Vol. 11. P. 3–46.
2. Ortuzar J. de D., Willumsen L. G. Modelling Transport, Wiley, 2011.
3. Hyman G. M. The calibration of trip distribution models // Environment and Planning A. 1969. Vol. 1, № 1. p. 105–112.
4. Evans S. P., Kirby H. R. A three-dimensional Furness procedure for calibrating gravity model // Transportation Research. 1974. Vol. 8 № 2, P. 105–122.
5. Erlander S., Stewart N. F. The Gravity Model in Transportation Analysis: Theory and Extensions. Topics in Transportation. Taylor & Francis, 1990.
6. Lerman S. R., Manski C. F. Alternative sampling procedures for calibrating disaggregate choice models // Transportation Research Record. 1969. Vol. 592. P. 24–28.
7. Train K. E. Discrete Choice Methods with Simulation. Cambridge Books. 2nd edition. Cambridge University Press, 2009.

8. *Якимов М. Р.* Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов. М.: Логос, 2013. в крупном городе с применением к московской агломерации // Автоматика и телемеханика. 2005. Т. 11, С. 113–125.
9. *Алиев А. С., Стрельников А. И., Швецов В.И., Шершевский Ю. З.* Моделирование транспортных потоков

Мазурин Дмитрий Сергеевич. Исследователь ИСА РАН (математик). Окончил в 2013 г. МФТИ. Количество печатных работ: 2. Область научных интересов: математическое моделирование транспортных потоков. E-mail: mazurin@isa.ru

Швецов Владимир Иванович. Вед. н. с. ИСА РАН. К. ф.-м. н. Окончил в 1983 г. МГУ. Количество печатных работ: 35. Область научных интересов: математическое моделирование транспортных потоков. E-mail: Vl.Shvetsov@mail.ru