

# Модель грузовых передвижений с применением к транспортной сети Московской области \*

Мазурин Д.С., Федотов А.А., Швецов В.И.

## Аннотация

Представлена методика моделирования грузовых автомобильных потоков в транспортной системе крупного города с практическим применением к транспортной сети Москвы и Московской области. Методика основана на модификациях классической четырехшаговой схемы, учитывающих связанные цепочки грузовых передвижений. Предложена структура грузовых передвижений, включающая описание объектов притяжения грузового автотранспорта, цепочек передвижений, слоев спроса, распределения поездок по времени суток. Описаны методы оценки объемов прибытия и отправления грузовых потоков, расчет суточных и часовых матриц корреспонденций, их распределение по сети и другие аспекты.

**Ключевые слова:** моделирование транспортных потоков, грузовые передвижения, цепочки передвижений, матрица корреспонденций.

## 1 Введение

Основное внимание при моделировании транспортных систем крупных городов обычно уделяется передвижениям населения, включая пассажирские передвижения в системе общественного транспорта, поездки на легковом автомобиле и передвижения пешком. Грузовые передвижения в городских транспортных моделях часто отходят на второй план. В основном это объясняется тем, что моделирование грузовых передвижений во многих отношениях является более сложным, чем моделирование пассажирских передвижений. Тем не менее грузовые передвижения оказывают существенное влияние на пассажирские передвижения, и от корректного воспроизведения грузовых передвижений в модели зависит точность прогноза пассажирских потоков. Также грузовые потоки оказывают существенное влияние на окружающую среду, являясь основным источником загрязнений и шума и нанося существенный вред дорогам. Таким образом, моделирование потоков грузового автотранспорта является в настоящее время одной из наиболее важных задач транспортного моделирования, в особенности в таких крупных грузовых транспортных узлах, как Московский транспортный узел.

Существующие подходы к моделированию грузовых передвижений в большинстве своем предполагают адаптацию пассажирских моделей к грузовому спросу [1]. Наиболее часто используется классическая четырехшаговая схема, но в силу особенностей специфики грузовых передвижений, входящих в состав сложных логистических цепочек, точность таких упрощенных моделей остается невысокой. С другой стороны, предлагаются дезагрегированные (микроэкономические) подходы, основанные

---

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

на применении теории дискретного выбора [2]. Грузовой спрос в таких моделях рассматривается как совокупность партий различных грузов с индивидуальными характеристиками, перед транспортировкой которых грузоотправители принимают ряд решений, трактуемых как дискретный выбор из нескольких альтернатив (откуда и куда везти, сколько, когда, на каком виде транспорта). Далее в соответствии с совершенным выбором перевозчики осуществляют выбор маршрутов для доставки груза. Такие модели едва ли могут быть использованы на практике для моделирования автомобильных потоков в крупной транспортной сети ввиду своей вычислительной сложности и необходимости сбора большого объема исходных данных.

Помимо описанных выше моделей, использующих данные о пространственном распределении грузогенерирующих и грузопоглощающих объектов, на практике часто применяются модели на основе фактических данных об интенсивностях движения грузового автотранспорта (методы восстановления матрицы корреспонденций) [3], однако они могут сильно исказить структуру и логику грузовых передвижений и не позволяют учитывать изменения в структуре передвижений в расчетах на перспективу. Для учета логики совершаемых грузовых передвижений возможно проведение придорожных опросов, однако данное мероприятие является слишком трудозатратным и в условиях интенсивного городского движения едва ли возможно.

В последние годы была предложена методика прогноза автомобильных и пассажирских потоков в крупных транспортных системах, которая позволяет учесть многие аспекты транспортного поведения, связанные с цепочками передвижений, распределением передвижений по времени суток и др., оставаясь в рамках классической четырехшаговой схемы [4, 5]. В настоящей работе представлены результаты дальнейшего развития указанной методики, связанного с более детальным описанием грузовых автомобильных потоков в транспортной системе крупного города.

Классическая 4-шаговая схема моделирования транспортных и пассажирских потоков представляет только общий подход к расчетам и предполагает последовательное выполнение следующих операций: оценка общего количества совершаемых передвижений, расчет матриц межрайонных корреспонденций, расщепление корреспонденций по видам транспорта или способам передвижений, распределение корреспонденций по сети. Представленная методика предлагает конкретные решения по подготовке данных и всем шагам расчета, направленные на сохранение относительной вычислительной простоты, присущей 4-шаговой схеме. Применение таких решений не предполагает глубокой детализации параметров транспортной системы, что позволяет, во-первых, существенно сократить время моделирования существующих транспортных систем и, во-вторых, использовать их при разработке моделей для целей долгосрочного градостроительного и территориального планирования (когда не известны значения многих параметров сети). Методика разработана с применением к комплексной модели транспортной системы Москвы и Московской области, описана соответствующая структура грузовых потоков.

## **2 Структура грузовых передвижений**

### **2.1 Объекты притяжения грузового автомобильного транспорта**

Предлагаемая методика моделирования грузовых передвижений представляет собой модификацию стандартной 4-шаговой схемы. Исходными данными для прогноза потоков является информация о распределении объектов притяжения грузового ав-

тотранспорта по территории моделирования (Москва и Московская область) и мощности таких объектов.

В методике приняты следующие, агрегированные по характерным функциональным признакам, типы объектов притяжения (цели грузовых поездок):

- стоянка (места стоянок грузового автомобильного транспорта),
- склад (объекты оптовой торговли, складские площади для хранения продовольственных и непродовольственных товаров, включая логистические центры),
- предприятие (объекты строительства, обрабатывающей промышленности, сельского хозяйства, растениеводства, животноводства, добычи полезных ископаемых),
- таможня (складские объекты под таможенным контролем — склады временного хранения и таможенные склады),
- магазин (мелкие объекты розничной торговли — торговые точки),
- ТЦ — торговый центр (крупные объекты розничной торговли — торговые центры и гипермаркеты).

Рассматривается также еще один тип объектов — транспортно-производственная зона (ТПЗ), который сам по себе не является отдельным типом объектов, но включает в себя объекты из принятой классификации — склады и предприятия, компактно расположенные на одной площадке/территории с общими подъездными путями.

Для определения мест расположения стоянок в методике принимается следующая гипотеза: наряду с непосредственными (выделенными) местами стоянок грузовой автотранспорт базируется на территориях транспортно-производственных зон, складов и предприятий (исключение может быть сделано для районов, приближенных к центру города, например, для Москвы предполагается, что стоянки грузовиков отсутствуют в пределах Третьего транспортного кольца).

Под мощностью объектов притяжения понимается либо площадь помещений, либо площадь занимаемой объектом территории. Например, для оценки объектов типа *склад* используются площадь складских помещений, для ТПЗ — площадь территории, на которой расположены склады и предприятия. Для объектов *стоянка*, за исключением площадей непосредственных мест стоянок грузового автотранспорта, применяются экспертные оценки коэффициентов приведения к площадям стоянок от площадей ТПЗ, складов и предприятий. Несколько иной подход используется для объектов типа *магазин*: вместо оценки пространственного размещения отдельных объектов и их мощностей для расчета относительных емкостей транспортных районов сразу используется агрегированный показатель — население транспортного района.

## 2.2 Цепочки грузовых передвижений

Определенным недостатком 4-шаговой модели является расчет матриц корреспонденций независимо друг от друга, в связи с чем для адекватного отражения в модели реальной структуры грузовых поездок необходимо учитывать факт объединения поездок в цепочки. Цепочки начинаются и заканчиваются либо в кордонных районах, либо на стоянках грузовых автомобилей. Например, типичными являются цепочки *кордон* → *магазин* → *кордон*, *стоянка* → *склад* → *торговый центр* → *стоянка*.

Будем рассматривать следующие (наиболее распространенные) виды цепочек:

1. кордон → кордон
2. кордон → объект → кордон
3. стоянка → объект 1 → объект 2 → стоянка

В таблице 1 представлены принимаемые в методике типы грузовых цепочек, выбор которых осуществлялся на основе экспертных оценок авторов.

Таблица 1: Классификация цепочек грузовых передвижений

| №  | Цепочки |             |             |         |
|----|---------|-------------|-------------|---------|
|    | 1       | кордоны     | -           | -       |
| 2  | кордоны | -           | магазины    | кордоны |
| 3  | кордоны | -           | тц          | кордоны |
| 4  | кордоны | -           | склады      | кордоны |
| 5  | кордоны | таможни     | тц          | кордоны |
| 6  | кордоны | таможни     | склады      | кордоны |
| 7  | кордоны | таможни     | предприятия | кордоны |
| 8  | стоянки | склады      | кордоны     | стоянки |
| 9  | стоянки | склады      | магазины    | стоянки |
| 10 | стоянки | склады      | тц          | стоянки |
| 11 | стоянки | склады      | склады      | стоянки |
| 13 | стоянки | склады      | предприятия | стоянки |
| 14 | стоянки | предприятия | склады      | стоянки |
| 15 | стоянки | предприятия | тц          | стоянки |

Для цепочек, начинающихся и заканчивающихся на стоянках, первое звено цепочки соответствует передвижению от места стоянки к месту погрузки (склад или предприятие), второе — от места погрузки к месту разгрузки (магазин, ТЦ, другой склад или предприятие), третье — возвращение к месту стоянки. Для промежуточного звена цепочки может указываться кратность, которая учитывает в модели одну из двух типичных ситуаций: развоз грузов по нескольким однотипным объектам или цикличное движение транспортного средства от места погрузки к месту разгрузки и обратно.

Для учета факта развоза грузов по нескольким однотипным объектам указывается соответствующая средняя кратность мест разгрузки в цепочке. В результате, например, цепочка *Кордон → Магазин → Кордон* при кратности промежуточного звена, равной 3, трансформируется в цепочку *Кордон → Магазин 1 → Магазин 2 → Магазин 3 → Кордон*.

Для учета работы грузовых автомобилей по одному маршруту между одними и теми же объектами притяжения указывается средняя кратность циклов погрузки-разгрузки. Например, в цепочке *Стоянка → Предприятие → Склад → Стоянка* кратность второго звена, равная 2, трансформирует цепочку в *Стоянка → Предприятие → Склад → Предприятие → Склад → Стоянка*.

Общее количество цепочек каждого типа определяется в ходе калибровки и используется в дальнейшем в качестве константы. В расчетах на перспективу обычно принимаются гипотезы о росте или падении общего количества грузовых поездок в системе, но методика позволяет учитывать и изменение самой структуры передвижений.

## 2.3 Классы грузовых автомобилей

При прогнозировании автомобильных потоков обычно производится деление грузовых автомобилей на несколько классов по грузоподъемности, длине или иным характеристикам. Выбор классификации грузовых автомобилей может быть обусловлен решаемыми задачами (в каких группах автомобилей необходимо получить прогноз) либо имеющимися данными (в каких группах доступны замеры интенсивности движения). Например, автоматические приборы учета интенсивности движения позволяют классифицировать транспортные средства по длине. При прогнозировании интенсивности движения на платных дорогах актуальной для модели становится классификация транспортных средств по тарифным группам (в качестве классификационных признаков обычно используется высота транспортного средства и количество осей).

Для принятой классификации грузовых автомобилей производится оценка расщепления цепочек по классам: для каждой цепочки  $i$  и класса грузовиков  $k$  определена величина  $s_i^k$  — доля цепочек типа  $i$ , которая совершается классом грузовиков  $k$  ( $\sum_k s_i^k = 1$ ). В результате для каждого класса грузовиков  $k$  получено количество совершаемых цепочек каждого типа  $i$   $N_i^k = N_i * s_i^k$ . При последующем разложении цепочек на отдельные поездки для каждой пары типов объектов  $X$  и  $Y$  и для каждого класса грузовиков  $k$  формируется матрица межцелевых корреспонденций  $Q_{XY}^k$ , представляющая общее количество передвижений по слою  $X \rightarrow Y$ . Для представленной выше номенклатуры цепочек передвижений некоторые слои спроса оказываются нулевыми, например, слои *стоянка*  $\rightarrow$  *магазин* или *стоянка*  $\rightarrow$  *ТЦ*.

Таблица 2: Матрица межцелевых корреспонденций

| Итого       | Кордоны  | Стоянки  | Склады   | Предпр-я | Таможни  | ТЦ       | Магазины |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Кордоны     | $Q_{00}$ | $Q_{01}$ | $Q_{02}$ | $Q_{03}$ | $Q_{04}$ | $Q_{05}$ | $Q_{06}$ |
| Стоянки     | $Q_{10}$ | $Q_{01}$ | $Q_{12}$ | $Q_{13}$ | $Q_{14}$ | $Q_{15}$ | $Q_{16}$ |
| Склады      | $Q_{20}$ | $Q_{01}$ | $Q_{22}$ | $Q_{23}$ | $Q_{24}$ | $Q_{25}$ | $Q_{26}$ |
| Предприятия | $Q_{30}$ | $Q_{01}$ | $Q_{32}$ | $Q_{33}$ | $Q_{34}$ | $Q_{35}$ | $Q_{36}$ |
| Таможни     | $Q_{40}$ | $Q_{01}$ | $Q_{42}$ | $Q_{43}$ | $Q_{44}$ | $Q_{45}$ | $Q_{46}$ |
| ТЦ          | $Q_{50}$ | $Q_{51}$ | $Q_{52}$ | $Q_{53}$ | $Q_{54}$ | $Q_{55}$ | $Q_{56}$ |
| Магазины    | $Q_{60}$ | $Q_{61}$ | $Q_{62}$ | $Q_{63}$ | $Q_{64}$ | $Q_{65}$ | $Q_{66}$ |

Для упрощения модели часть слоев передвижений агрегируется в более крупные — в один слой объединяются передвижения с общим по типу объектом прибытия, совершаемые из различных по типу объектов отправления. Для представленной классификации типов объектов используются два агрегированных типа объектов отправления: в первый, условно *объект 1*, объединены типы *склад*, *предприятие*, *таможня*, а во второй, *объект 2* — типы *ТЦ* и *магазин*. В результате формируется следующая система слоев передвижений с абсолютными объемами передвижений по каждому слою (таблица 3).

Таблица 3: Матрица межцелевых корреспонденций с агрегированием исходных слоев

| Итого    | Кордоны                             | Стоянки  | Склады   | Предпр-я | Таможни  | ТЦ       | Магазины |
|----------|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Кордоны  | $Q_{00}$                            | $Q_{01}$ | $Q_{02}$ | $Q_{03}$ | $Q_{04}$ | $Q_{05}$ | $Q_{06}$ |
| Стоянки  | $Q_{10}$                            | $Q_{11}$ | $Q_{12}$ | $Q_{13}$ | $Q_{14}$ | $Q_{15}$ | $Q_{16}$ |
| Объект 1 | $Q_{70} = Q_{20} + Q_{30} + Q_{40}$ | $Q_{71}$ | $Q_{72}$ | $Q_{73}$ | $Q_{74}$ | $Q_{75}$ | $Q_{76}$ |
| Объект 2 | $Q_{80} = Q_{50} + Q_{60}$          | $Q_{81}$ | $Q_{82}$ | $Q_{83}$ | $Q_{84}$ | $Q_{85}$ | $Q_{86}$ |

## 2.4 Распределение поездок по времени суток

Структура грузовых автомобильных потоков существенно меняется в течение суток. На ее формирование оказывают влияние такие факторы, как структура пассажирских потоков и уровень загрузки дорожной сети, ограничения движения для отдельных классов грузовых автомобилей и др.

Методикой предусмотрен прогноз грузовых потоков (в разбивке по разным классам грузовиков) для следующих периодов времени в течение суток:

- 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).

В отличие от пассажирской модели [5], где наличие расщепления по способам передвижения обуславливает необходимость распределения цепочек по элементам спроса, в грузовой модели такой необходимости нет. Намного проще и удобнее работать с суточными распределениями отдельных поездок в составе цепочек. При этом необходимо следить, чтобы распределения времени совершения поездок в составе цепочек оставались согласованы друг с другом, т.е. вторая поездка в составе цепочки не могла начаться раньше, чем первая. Распределения времени совершения поездок будут использованы на этапе расчета часовых матриц корреспонденций. На основе экспертных оценок авторов сформированы распределения времени совершения поездок для каждой грузовой цепочки отдельно для каждого класса грузовиков (легких, средних и тяжелых).

В таблице 4 приведен пример используемого в методике распределения поездок по времени суток для легких грузовиков в цепочке *кордон* → *магазин* → *кордон*.

Таблица 4: Распределение времени совершения поездок в цепочке *кордон* → *магазин* → *кордон*

|                                 | Раннее утро | Утро  | День  | Вечер | Поздний вечер | Ночь  |
|---------------------------------|-------------|-------|-------|-------|---------------|-------|
|                                 | 06-08       | 08-10 | 10-17 | 17-19 | 19-22         | 22-06 |
| <i>кордон</i> → <i>магазин</i>  | 0,10        | 0,14  | 0,52  | 0,06  | 0,06          | 0,12  |
| <i>магазин</i> → <i>магазин</i> | 0,08        | 0,11  | 0,52  | 0,08  | 0,09          | 0,12  |
| <i>магазин</i> → <i>кордон</i>  | 0,05        | 0,09  | 0,52  | 0,10  | 0,12          | 0,12  |

Можно видеть, что большая часть передвижений в составе данной цепочки совершается днем, причем более половины цепочек к вечеру оказываются полностью завершенными. Распределение каждой последующей поездки смещено на более поздние часы относительно предшествующей поездки. Интервал смещения следующей поездки зависит от времени погрузки/разгрузки и определяется классом используемых грузовиков. Для слоя передвижений *магазин* → *магазин*, отражающих развоз грузов по нескольким промежуточным целям, используется единое распределение по времени суток вместо индивидуального для каждого отдельного звена *магазин 1* → *магазин 2*, *магазин 2* → *магазин 3* и т.д. Для калибровки распределений поездок по времени суток могут использоваться замеры интенсивности движения на улично-дорожной сети.

## 3 Схема расчета

### 3.1 Оценка объемов прибытия и отправления грузовых потоков

Оценка объемов прибытия и отправления в каждом расчетном районе производится на основе пространственного размещения объектов притяжения, рассмотренных в разделе 2.1 статьи, для трех классов грузовиков. Наполнение данного района теми или иными объектами, взятое в сравнении с наполнением других районов, определяет приходящуюся на него долю от общего объема прибытия и отправления. Таким образом, на оценку прибытия и отправления влияют только относительные емкости разных районов друг к другу, представляющие собой доли мощностей объектов в данном районе от общего объема мощности объектов во всех районах. Особый случай представляет тип объектов *магазин*, для которого, как было сказано выше, вместо оценки согласно набору точечных объектов используется оценка по населению района.

Если имеется сразу несколько показателей, характеризующих размещение объектов определенного типа, можно взвешивать относительные емкости, рассчитанные по этим показателям. Например, для объектов типа Склад относительная емкость района получается путем взвешивания относительных мощностей логистических и складских комплексов и относительных мощностей транспортно-производственных зон, на территории которых, согласно гипотезе, также могут размещаться складские помещения. Также предусмотрена возможность использовать индивидуальные оценки относительных емкостей районов для разных классов пользователей. Например, для легких грузовиков достаточно характерна стоянка в жилых районах, чего нельзя сказать о средних и тяжелых грузовиках. Поэтому для легких грузовиков в качестве относительной емкости районов по типу объектов Стоянка с некоторым весом можно взять население.

После оценки относительных емкостей районов по всем типам объектов абсолютное суточное грузовое отправление и прибытие в каждом районе получают путем умножения относительных емкостей районов на общее количество грузовых поездок по каждому слою отдельно для каждого класса грузовиков. На следующем шаге методики осуществляется расчет матриц межрайонных корреспонденций.

### 3.2 Расчет матриц корреспонденций

После того, как определены суточные объемы отправления и прибытия для всех районов по каждому слою передвижений и классу грузовиков, необходимо рассчитать матрицы корреспонденций для каждого класса грузовиков для среднего часа каждого периода суток из раздела 2.4. Процедура расчета подразделяется на два этапа: сначала для каждого слоя спроса рассчитываются суточные матрицы корреспонденций, а затем отщеплением от суточных матриц с соответствующими коэффициентами рассчитываются часовые матрицы.

#### 3.2.1 Расчет суточных матриц корреспонденций

Для расчета суточных матриц корреспонденций используется гравитационная модель, в которой в качестве межрайонных дальностей используются оценки обобщенных затрат. Процедура расчета суточных матриц корреспонденций одинакова для всех слоев спроса и классов пользователей, поэтому соответствующие индексы  $XU$  и  $c$  далее будем опускать. В оценку обобщенных затрат  $T_{ij}(t)$  на передвижение из

района  $i$  в район  $j$  в период времени  $t$  входят как временные затраты (время движения и различные дополнительные задержки в пути), так и денежные затраты, переведенные в единицы времени (затраты на топливо, сбор за пользование платными участками дорог или въезд в определенные районы города и др.). Используя эту оценку определим  $\bar{c}_{ij}$  – транспортную удаленность районов  $i$  и  $j$ , в качестве которой будем использовать средневзвешенную сумму обобщенных затрат передвижения из  $i$  в  $j$  и обратно в разные времена суток.

Тогда суточные матрицы корреспонденций рассчитываются следующим образом:

$$K_{ij} = A_i O_i B_j D_j g(\bar{c}_{ij}), \quad i, j = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Убывающая функция  $g(t)$  показывает снижение вероятности поездки с ростом обобщенных затрат. Здесь будем использовать следующую функцию:

$$f(t) = \left( 1 + \left( \frac{t}{a} \right)^b \right)^{-c}. \quad (2)$$

Гравитационная функция 2 описывают убывание вероятности совершения поездки с увеличением дальности. Часто в качестве гравитационной функции выбирают экспоненциально убывающую функцию с одним калибровочным параметром — коэффициентом в экспоненте. Недостатком экспоненциальной функции является слишком быстрое убывание как при малых, так и при больших значениях аргумента. Более реалистичное описание предполагает, что при малых значениях дальности функция мало меняется, т.е. на начальном участке графика  $g(t)$  должна быть «полочка». При больших значениях дальности слишком быстрое убывание приводит к полному исчезновению длинных поездок в прогнозе, в то время как в реальности они наблюдаются. Функция 2 позволяет снять эти проблемы, поскольку она имеет больше параметров для калибровки. Коэффициенты  $b$  и  $c$  определяют форму функции  $f(t)$ , в частности, позволяют задать правильное поведение на краях, а коэффициент  $a$  — ее масштаб. Для различных слоев спроса эти коэффициенты устанавливаются индивидуально.

Коэффициенты  $A_i$  и  $B_j$  в формуле 1 определяются из условий нормировки

$$\sum_i K_{ij} = D_j, \quad \sum_j K_{ij} = O_i, \quad (3)$$

и для их нахождения используется итерационный алгоритм балансировки.

### 3.2.2 Расчет часовых корреспонденций

Для каждой цепочки передвижений задается некоторое распределение времени совершения поездок в составе этой цепочки (раздел 2.4). В результате для каждого слоя передвижений из распределений поездок этого слоя в составе различных цепочек формируется общее распределение времени совершения поездок данного слоя:

$$\mu_{ij}^c(t) = \frac{N_{ij}^c(t)}{N_{ij}^c}, \quad \sum_t \mu_{ij}^c(t) = 1,$$

где  $N_{ij}^c(t)$  — количество передвижений класса пользователей  $c$  по слою спроса  $ij$  в период времени  $t$ , а  $N_{ij}^c = \sum_t N_{ij}^c(t)$  — суточное количество передвижений класса пользователей  $c$  по слою спроса  $ij$ .

Тогда для каждого слоя передвижений можно рассчитать часовую матрицу для периода времени  $t$ :

$$K_{ij}^c(t) = \frac{1}{n_t} \times \mu_{ij}^c(t) \times K_{ij}^c,$$



где  $n_t$  — количество часов в периоде времени  $t$ .

Итоговая часовая матрица для каждого периода времени  $t$  и класса пользователей  $c$  есть сумма соответствующих часовых матриц по всем слоям спроса:

$$K^c(t) = \sum_{ij} K_{ij}^c(t).$$

### 3.3 Распределение корреспонденций по сети

Распределение корреспонденций по сети выполняется одновременно для всех классов пользователей, включая легковые автомобили, матрицы корреспонденций для которых рассчитываются согласно методике, представленной в [5]. Особенностью распределения грузовых корреспонденций по сети являются ограничения на въезд и движение грузового автотранспорта в определенных зонах города. На конец 2015 года в Москве действовали следующие ограничения [6]:

- С 6.00 до 22.00 ограничен въезд и движение по территории города Москвы, ограниченной Третьим транспортным кольцом (ТТК), и движение по ТТК грузового автотранспорта грузоподъемностью более 1 тонны.
- С 6.00 до 22.00 ограничен въезд и движение по территории города Москвы, ограниченной Московской кольцевой автомобильной дорогой (МКАД), и движение по МКАД грузового автотранспорта разрешенной максимальной массой более 12 тонн.

Помимо этого действовали ограничения движения грузовых транспортных средств согласно их экологическим характеристикам.

Движение грузового автотранспорта в зонах ограничения допускается при наличии специального разрешения (пропуска). Право на въезд и передвижение грузового автотранспорта в зонах ограничения его движения в городе Москве предоставляется в целях обеспечения непрерывного технологического цикла предприятий и жизнедеятельности города, а также потребностей населения.

Для моделирования ограничений движения грузовых транспортных средств используется условное разделение соответствующих классов пользователей на классы «с пропуском» и «без пропуска», для каждого из которых рассчитывается своя матрица корреспонденций. В матрицу корреспонденций класса пользователей «с пропуском» включается определенная и устанавливаемая в ходе калибровки доля корреспонденции из/в районы внутри МКАД и в ближайшей 5-километровой зоне. Остальные корреспонденции включаются в матрицу корреспонденций класса пользователей «без пропуска», причем корреспонденции из/в районы внутри МКАД, не вошедшие в матрицу класса пользователей «с пропуском», переносятся в матрицу класса пользователей «без пропуска» со смещением на ночной период с 22.00 до 6.00.

## 4 Заключение

В работе предложена методика прогноза потоков грузового автотранспорта в транспортной системе крупного города. Методика основана на 4-шаговой схеме прогноза и сохраняет ее вычислительную эффективность. Основные модификации стандартной схемы заключаются в следующем:

- Определены основные объекты притяжения грузового автотранспорта. Грузовой спрос рассматривается как совокупность цепочек передвижений грузовых автотранспортных средств различных классов между объектами притяжения.
- Более сложные цепочки с повторяющимися поездками, характерные для грузового автотранспорта, сводятся к простым цепочкам с помощью «кратных» промежуточных звеньев.
- Для каждой цепочки передвижений и класса грузовых автомобилей определяется индивидуальное распределение времени совершения каждой поездки в составе цепочки.
- Часовые матрицы корреспонденций складываются из отщепленных суточных матриц по различным слоям спроса в соответствии с временными распределениями.

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] Ortuzar J. de D., Willumsen L. G. *Modelling Transport*. Wiley, 2011.
- [2] Mazzarino M. A critical review of freight transport demand models // *Scientific Technical Journal for Traffic Theory and Practice*. 1998. no. 5-6. P. 203–213.
- [3] Якимов М. Р. *Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов*. М.: Логос, 2013.
- [4] 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. Т. 65, № 1. С. 3–15.
- [5] Алиев А. С., Мазурин Д. С., Швецов В. И. Модель транспортных потоков на основе 4-шаговой схемы с учетом цепочек передвижений // *Сб. Трудов ИСА РАН «Прикладные проблемы управления макросистемами»*. 2015. Принято к печати.
- [6] Постановление Правительства Москвы от 22 августа 2011 г. N 379-ПП «Об ограничении движения грузового автотранспорта в городе Москве и признании утратившими силу отдельных правовых актов Правительства Москвы» (с изменениями и дополнениями).