



Семёнов В.В., Ермаков А.В.

Исторический анализ
моделирования
транспортных процессов и
транспортной
инфраструктуры

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Семёнов В.В., Ермаков А.В.
Исторический анализ моделирования транспортных процессов и транспортной инфраструктуры
// Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 3. 36 с. URL:
<http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-3>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

В.В. Семёнов, А.В. Ермаков

**Исторический анализ моделирования
транспортных процессов
и транспортной инфраструктуры**

Москва — 2015

Семёнов В.В., Ермаков А.В.

Исторический анализ моделирования транспортных процессов и транспортной инфраструктуры.

В работе приведен анализ истории развития подходов и методов математического, имитационного и системного моделирования транспортных процессов и транспортной инфраструктуры, типовых задач и состояния исследований.

Ключевые слова: транспортные потоки, математическое моделирование, городское транспортное планирование.

Vladislav Valerievich Semionov, Alexey Viktorovich Ermakov.

Historical analysis of modeling of transport processes and transport infrastructure.

The analysis of the history of the development of mathematical simulation and system modeling of transport processes and transport infrastructure, typical tasks and status of research are shown in this paper.

Key words: traffic flow, simulation, urban transportation planning.

Работа поддержана грантами РФФИ 13-01-12046 ОФИ_М и 13-01-00781 А.

Оглавление

Введение	3
Структура транспортных исследований	4
Генезис транспортных моделей	7
Транспортное планирование	9
Модели городского транспортного планирования	17
Фундаментальные основы моделирования.....	30
Выводы	32
Библиографический список.....	33

Введение

В настоящей работе приведены результаты исторического анализа моделирования транспортных процессов и инфраструктуры. Изучение сущности проблем транспортной перегруженности современных крупных городов и мегаполисов опиралось на два методологических принципа: принцип историзма и принцип системности.

Согласно принципу историзма основное внимание в анализе было уделено формированию, развитию и динамике изучаемых объектов. Анализ опирается на принцип историзма как методологическое выражение саморазвития действительности, включая изучение современного состояния, прошлого и процессов генезиса.

Принцип системности позволяет рассматривать городской транспорт как сложную систему. Причем здесь возможны различные подходы. Например, можно рассматривать городской транспорт как сложную систему с точки зрения [2]:

- 1) интенсивности движения по городским магистралям;
- 2) пропускной способности перекрестков;
- 3) оптимального регулирования и распределения транспортных потоков при помощи запрещающих и ограничивающих знаков.

В этом случае элементами сложной системы будут:

- городские магистрали и перекрестки;
- средства сигнализации и управления;
- транспортные средства.

Возможно изучать городской пассажирский транспорт как сложную систему из транспортных средств (троллейбусов, автобусов, трамваев, метрополитена, такси и др.), маршрутов движения, перекрестков и светофоров с учетом их загрузки другими видами транспорта, пассажиропотоками, формирующимися в различных пунктах города в зависимости от времени суток, диспетчерских пунктов, средств связи и сбора информации, органов планирования и управления, средств ремонта и заправки автомобилей и т.д. [2]. При таком подходе городской пассажирский транспорт как сложная система рассматривается с точки зрения качества обслуживания пассажиров, планирования маршрутов, распределения подвижного состава по маршрутам и определения оптимальных режимов движения (расписаний), планирования текущего и капитального ремонта транспортных средств.

Аналогично как сложную систему можно рассматривать городской грузовой транспорт. Вместо пассажиропотоков рассматриваются грузопотоки от постоянных и временных источников, требующие доставки в постоянные и временные пункты назначения. При исследовании такой сложной системы возникают вопросы предварительного и оперативного планирования перевозок, обеспечивающего своевременную и экономичную доставку грузов, а также проблемы, связанные с нормальной эксплуатацией транспортных средств [2].

Таким образом, транспортную систему можно определить как сложную систему, которая характеризуется стохастичностью – случайной величиной транспортного спроса, погодно-климатическими факторами, изменением характеристик улично-дорожной сети, аварийными ситуациями и износом дорожного покрытия.

Структура транспортных исследований

Ричард Олсоп (Richard Allsop), профессор лаборатории транспортных исследований Великобритании (Universities' Transport Study Group) определил транспорт как «способ преодолеть пространственное ограничение» [16], а транспортные исследования следующим образом: «Вся прелесть транспортной науки в том, что она показала наличие законов наподобие законов природы. Тогда они должны объяснять транспорт вместе, не раздельно. То есть экономические и социальные науки вместе с инженерными и естественными науками должны соединиться с публичной политикой и социальным заказом. Это и есть транспортные исследования».

Р. Олсоп провел анализ 1600 публикаций, связанных с транспортным моделированием по Великобритании за несколько десятилетий. По результатам этого исследования были построены тематическая структура (рис. 1) и распределение количества публикаций по темам (рис. 2).

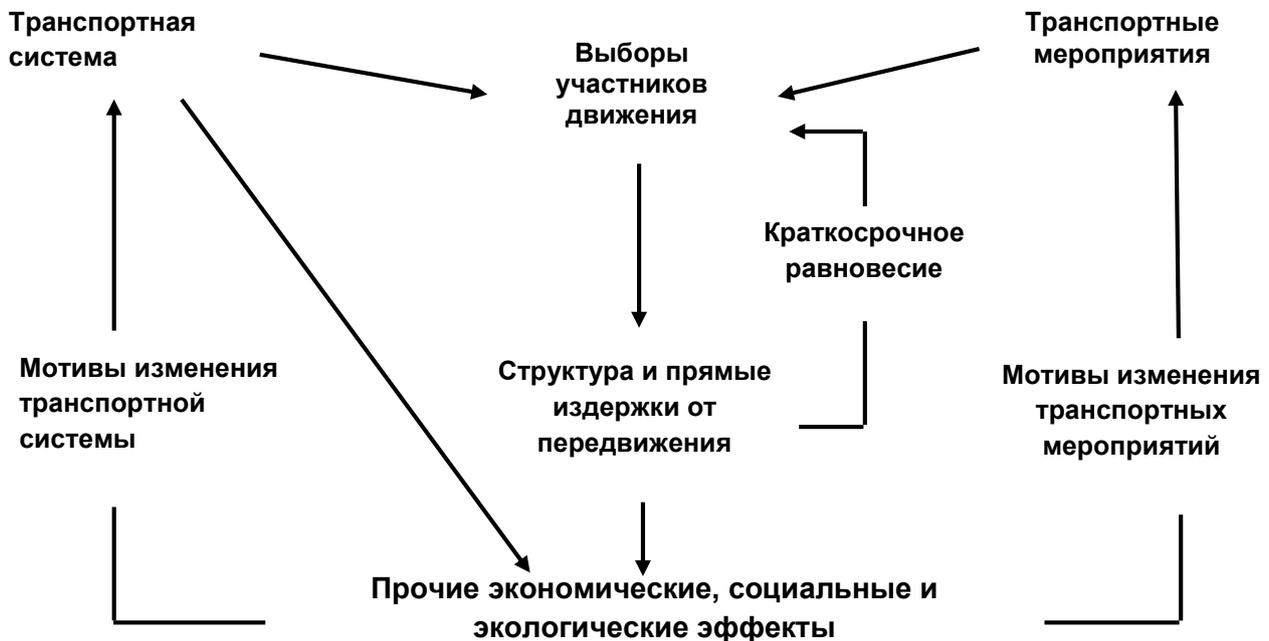


Рис. 1. Тематическая структура транспортных исследований.



Рис. 2. Тематическое распределение транспортных исследований

Работы на русском языке по этим темам в основном представлены в доверенной литературе такими значительными именами, как Дубелир, Зильберталь, Шелейховский (публикации 1920—1930-х годов).

Так, российский учёный, специалист по городскому планированию, в 1910-е годы выполнивший пионерские исследования по адаптации городской планировки к неизбежному резкому увеличению количества автомобилей¹, профессор Григорий Дмитриевич Дубелир (1874–1942) писал о том, что «возрастание интенсивности движения экипажей, и в особенности автомобилей, должно приниматься как важнейший фактор развития городов, подлежащий учету в проектной практике» [1].

А вот о чем писал Георгий Владимирович Шелейховский (1892–1946), выдающийся русский инженер и ученый в области урбанистики: «...мы не будем строить никаких гипотез относительно темпов автомобилизации наших городов... улицы должны проектироваться на срок порядка 50 лет. Имея дело с подобными сроками, мы не имеем никаких оснований для каких бы то ни было ограничений автомобиля как средства передвижения. И проектируя город, мы обязаны проверить его магистрали на пропуск максимально возможного потока автомобильного движения. ...Определим именно предельный охват движения автомобильным транспортом, следуя норме - машина на семью...» [15].

¹ Из лекции «Транспорт в городе, удобном для жизни» М.Я. Блинкина (доступна по адресу - <http://polit..ru/article/2010/10/14/transport/>).

Ученый-урбанист, работавший над вероятностными методами расчета внутригородского и группового расселения Георгий Владимирович Шелейховский, говорил о «... синтезе, по меньшей мере, четырех узловых задач планировки — расселения, транспорта, уличной сети и формы городского плана». Абрам Зильберталь утверждал, что «... решение вопросов движения не является чисто математической задачей, а действительно зависит от того, как высоко общество оценивает свое время и свои удобства» [4].

Публикации советского периода в основном касаются только транспортной системы (красный сегмент на рис 2).

Можно выделить следующие основные вехи транспортных исследований:

1912 г. – русский ученый профессор Г.Д. Дубелир заложил основы математического моделирования дорожного движения, изучая пропускную способность магистралей и их пересечений.

1955 г. – как приложение популярных в то время начально-краевых задач для уравнений типа закона сохранения независимо в работах Лайтхилла, Уизема, Ричардса была предложена, по-видимому, первая макроскопическая модель однополосного транспортного потока, названная впоследствии моделью Лайтхилла-Уизема-Ричардса. В модели поток транспортных средств рассматривается как поток одномерной сжимаемой жидкости. Позднее был предложен ряд модификаций: модель Танака, модель Уизема, модель Пэйна и другие.

1960 г. – вышла первая в мировой литературе монография по теории транспортных потоков известного американского специалиста Ф. Хейта. В книге Хейт систематизировал накопленные к тому времени результаты исследований и фактически дал начало Traffic Science – математической теории транспортных потоков, новой отрасли знания, которая близка теории массового обслуживания, но не разработана так широко, как последняя.

1970 г. – государственные и муниципальные транспортные органы и крупные компании ведущих капстран проявили интерес к притоку новых идей в теорию ТП: появилось дополнительное финансирование, к исследованиям подключились крупные ученые – И. Пригожин, М. Атанс, Л. Брейман.

Конец 1970-х – начало 1980-х гг. – в нашей стране на механико-математическом факультете МГУ началось изучение динамики автотранспортных потоков в связи с подготовкой к Олимпийским играм 1980 г. в Москве. Результаты этих исследований неоднократно докладывались В.Н. Беловым на научно-исследовательском семинаре И.Н. Зверева. В настоящее время изучение автотранспортных потоков на механико-математическом факультете МГУ ведется под руководством Н.Н. Смирнова и А.Б. Киселева, результаты опубликованы в целом ряде работ [6 - 12]. Частью проблемы движения транспорта является движение по расписанию, исследования в этом направлении велись под руководством С.А. Регирера [13].

В конце 80-х – начале 90-х в США проблемы исследования транспортных систем были возведены в ранг проблем национальной безопасности. Современный уровень науки о транспорте хорошо описывается словами из отчета

Техасского института транспорта «An Analysis of the Relationship Between Highway Expansion and Congestion in Metropolitan Areas. Lessons from the 15-Year Texas Transportation Institute Study», 2007 год: «Новые дороги и транспортные развязки в США уже не помогают избавиться от автомобильных пробок. Деньги, потраченные на традиционные средства борьбы с заторами, выброшены на ветер»².

Генезис транспортных моделей

Происхождение и развитие города в зарубежной литературе связывают со стадиями экономического развития транспортных систем [21]. В основе этого подхода лежит следующая гипотеза: **город является пространственным выражением определенной экономической структуры производственных отношений.**

Первоначально центр города становится центром промышленного производства. Происходит усиление социального расслоения и демографический рост. Центр города становится общественным центром, управляемым частными лицами, центром финансов и рекламы.

Выделяют следующие пространственные эффекты промышленного капитализма [21]:

- расширение города;
- многофункциональное использование земельных участков;
- массовая перевозка грузов (в том числе, для обеспечения производства).

Города традиционно являются транспортными узлами. С началом колонизации функцией городов стало обеспечение передачи потоков богатства нового мира на рынки старого мира. Так, например, главные города США – Нью-Йорк, Бостон, Сан-Франциско и Новый Орлеан – были расположены в местах впадения рек в океан, создавая максимальную выгоду транзиту грузов по воде. Мир был усеян малыми городами, которые обслуживали сельскохозяйственные районы. Поскольку транспортные расходы были велики, это делало обоснованным наличие коммерческих и производственных центров, физически близких к огромному большинству работающих на земле людей.

Постепенно железные дороги сократили транспортные издержки и сделали расположение городов более гибким. В конце 19 века такие города, как Чикаго и Сан-Паулу, выросли как железнодорожные транспортные узлы.

В 20 веке этот процесс продолжился. Рост железных дорог позволил существенно сократить транспортные расходы. Преимущества водного транспорта, в частности для внутринациональных перевозок, стали нивелироваться. Результаты подобной трансформации видны во всем мире. В 19 столетии городские

² Отчет опубликован в сети Интернет и доступен по адресу: <http://www.daclarke.org/AltTrans/analysis.html>

территории хорошо развивались, если они давали преимущества для производителей.

В связи с этим национальная транспортная инфраструктура становится чрезвычайно важной с точки зрения изменения городского ландшафта. Продолжающееся улучшение в транспортной сфере естественным образом продолжит рост городов.

С развитием автомобильной промышленности, в основном после Первой мировой войны, возникло новое поколение занятости городской территории, предусматривающее развитие дорог, вызванное ростом автомобильного производства. Рост производства автобусов и развитие общественного транспорта привели к росту городской периферии, расширению дорожной сети и росту спроса на парковки.

Быстрый рост в городах количества транспортных средств индивидуального транспорта с середины 50-х годов 20 столетия привел к тому, что индивидуальный транспорт начал выступать в своеобразной роли «наркотического средства в функционировании городской экономической системы» [21]. Как следствие этого наблюдаются:

- рост проблем перегруженности и безопасности движения;
- уменьшение транспортной доступности центра города;
- рост временных потерь на движение;
- изменения в землепользовании, связанные с ростом спроса на городскую транспортную сеть, что влечет согласованность с обслуживающим сектором;
- провисание центральных площадей.

Таким образом, движущей силой развития городской транспортной сети в западных странах было массовое использование личного автотранспорта как средства развития городской экономической системы. Этот вид транспорта обеспечивал [21]:

- рост доступности потребительского сектора;
- отсутствие помех для потоков товаров;
- увеличение влияния городских центров;
- появление новых районов города (большой город с пригородами, городская агломерация).

Одновременно транспортные системы общего пользования (особенно рельсовые – метрополитен и городской трамвай) получают новый импульс развития в больших городах, как правило, более всего перегруженных личным автотранспортом.

Транспортное планирование

Задача транспортной системы - перемещение людей, а не транспортных средств.

Вукан В. Вучик

В США при оценке улично-дорожной сети применяется интегральный критерий – показатель уровня обслуживания (Level of Service, сокращенно LOS) [3]. Этот критерий распространяется на планирование, проектирование и эксплуатацию, используется для оценки разных видов потоков (транспортных средств, пешеходных потоков), разных видов сетей (внегородских дорог общего пользования, городских улиц и автомагистралей), различных элементов сетей (перегонов, пересечений, тротуаров, пешеходных переходов).

Также важно учитывать интегрированность транспорта в городскую жизнь как средство доступа к экономическим, социальным и культурным ресурсам. Такого рода потребности, требования и тенденции, удовлетворяемые с помощью транспортной системы, трудно формализуемы. Таким образом, транспортное планирование выступает, прежде всего, как вопрос политики и требует разрешения зачастую противоречивых требований различных групп и основных экономических, социальных и политических интересов.

Поэтому транспортное планирование не может рассматриваться иначе как процесс принятия решений, осуществляющийся при взаимном влиянии разных сторон. При этом стороны состоят из отдельных лиц и групп, проектировщиков и лиц, принимающих решения.

Разработки транспортного плана с позиций инженерного подхода применяют вычислительные методы и средства. Они предлагают в качестве эффективного средства вычислительные алгоритмические методы. Кроме того, предполагается, что поведение городских и транспортных систем предсказуемо, а при построении прогнозов в качестве основы могут использоваться строгие закономерности. И, наконец, предполагается, что участники процесса планирования являются автономными лицами, обладающими знаниями универсальных принципов проектирования, и что их участие в процессе планирования может касаться анализа, оценки и принятия решений. В такой модели принятия решений деятельность по планированию направлена на анализ вопросов моделирования и прогнозирования, анализа последствий и экономической оценки (рис. 3-4).



Рис. 3. Общий алгоритм моделирования



Рис. 4. Общая схема транспортного моделирования городской улично-дорожной сети

Распределение землепользования на городской территории (жилые дома, офисы, магазины и развлекательные объекты) создает спрос, например, в поездке на работу, магазин. Эти поездки осуществляются на автомобильном, железнодорожном транспорте, велосипеде или как пешие прогулки по транспортной сети, плюс они воздействуют на окружающую среду. Есть два важных вида обратной связи (рис. 5):

- влияние транспортной доступности на выбор планировщиками местоположения офисов и домашних хозяйств;
- экологические факторы (например, чистый воздух, отсутствие шума от уличного движения и проч.) могут влиять на принятие решений о планируемом местоположении.

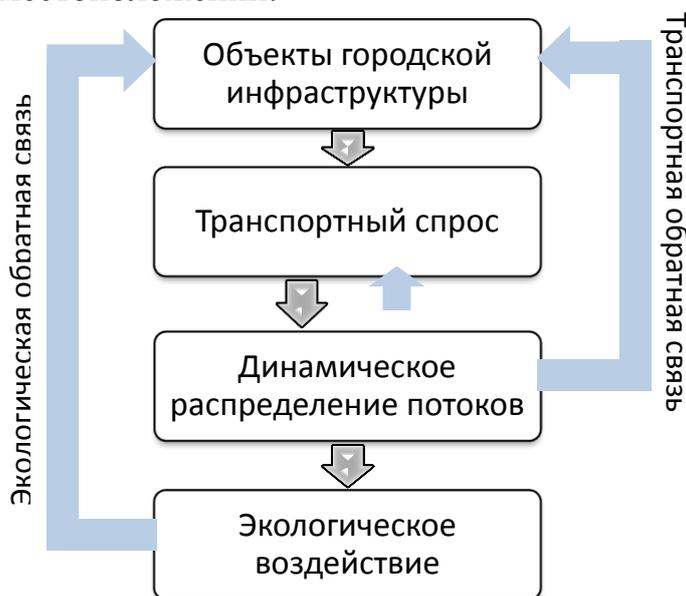


Рис. 5. Обратные связи в модели транспортного планирования

Крупным урбанистом Вуканом В. Вучиком, профессором Пенсильванского университета, бывшим экспертом Министерства транспорта США³, предлагается классификация распространенных сегодня подходов в осуществлении различных планировочных мероприятий на улично-дорожной сети (далее – УДС) города.

Вукан В. Вучик предлагает разделить процесс на четыре ступени [1] или уровня транспортного планирования (рис. 6).

³ Вукан В. Вучик – первый человек, награжденный медалью доктора Фридриха Ленера, которая вручается людям, посвятившим свою жизнь развитию систем городского общественного транспорта и преуспевшим в этом, получил награду Уилбурга С. Смита за выдающиеся преподавательские достижения в сфере транспорта.



Рис. 6. Четыре уровня транспортного планирования (по В. Вучику)

Тогда фактически все мероприятия в городах, не использующих современной концепции развития, – это мероприятия, относящиеся к отдельным объектам инфраструктуры (**4 уровень** по предлагаемой Вучиком классификации), которые включают планирование мероприятий для отдельных объектов инфраструктуры, таких как:

- отдельный участок УДС (мост, тоннель, развязка);
- отдельный маршрут общественного транспорта;
- отдельная пешеходная зона.

Третий уровень – отдельно взятая транспортная система, маршрутная сеть или система одного вида транспорта:

- уличная сеть;
- сеть трамвайных маршрутов;
- система пригородных железных дорог;
- сеть велосипедных дорожек.

Работа на **2 уровне** производится редко – это интермодальная координированная транспортная система: все виды сообщений в городе, рассмотренные на уровне взаимодействий, взаимосвязей, взаимозаменяемостей. Интермодальная координированная система города (агломерации) включает:

- улично-дорожную сеть;
- частные автомобили;
- все виды общественного транспорта;
- систему пешеходных сообщений и т.д.

И наконец, **1 уровень** – уровень взаимосвязи города (агломерации) и транспортной системы, направленный на достижение координации со всеми прочими аспектами функционирования города (экономикой, экологией, расселением и жилищной сферой, социальными процессами и др.)

Рассматриваемые в данной работе модели охватывают с 4-ого по 2-ой уровни проектирования.

Пространственная динамика землепользования и транспорт

Наилучшим путем понимания и развития транспортной системы является знание о пространственной динамике землепользования и транспорта [21] (рис. 7).



Рис. 7. Пространственная динамика землепользования и транспорт

Компоненты пространственной динамики землепользования можно описать следующим образом [21]:

- землепользование – каждая единица пространства, используемая в городском или аграрном цикле, вызывает спрос на движение, который порождает необходимость в поездках в целях бизнеса, работы или досуга;
- передвижения в пределах жилой, рабочей или деловой зон и между ними;
- транспортный спрос – социально-экономическая деятельность, приводящая к необходимости в передвижении, которая порождает спрос на транспортную систему;

- транспортные ресурсы как основные системные качества, к которым относятся пропускная способность транспортных сетей всех видов транспорта и провозная способность транспортных средств, которые используют эти сети.
- доступность – транспортная доступность отдельных районов на охваченной транспортной сетью территории;
- стоимость земли – компромисс снижению транспортных издержек и росту стоимости земли, изменяющих роль деятельности и создающих новое землепользование.

Теория взаимодействия транспорта и землепользования

Распределенная в пространстве деятельность человека создает потребность в перемещении и транспортировке грузов, возрастает роль городов в развитии общества. Все это создает предпосылки к урбанизации – росту в городах промышленности, развитию культурных и политических функций городов, углублению территориального разделения труда, росту городского населения и его мобильности. Обратное влияние транспорта на землепользование до настоящего времени изучено мало.

Сегодня распространено представление о том, что средневековый город образовался на базе компактно размещенного на малой территории ремесленного производства, где вся мобильность населения носила пеший тип. Постепенно средневековый город вырос до современной агломерации с огромными объемами регионального трафика, который образовался на базе железной дороги с развитием частной системы транспорта. Однако, как именно развитие транспортной системы влияет на решения о местоположении землевладельцев, инвесторов, компаний или домовладений, не совсем понятно даже планировщикам городского пространства. Установлено, что решения о поездках и местоположение зависят друг от друга и, таким образом, транспорт и планирование землепользования должны быть скоординированы, что приводит к представлению о так называемой петле обратной связи между землепользованием и транспортом⁴.

⁴ Источник: http://tfresource.org/Land_Use-Transport_Modeling.

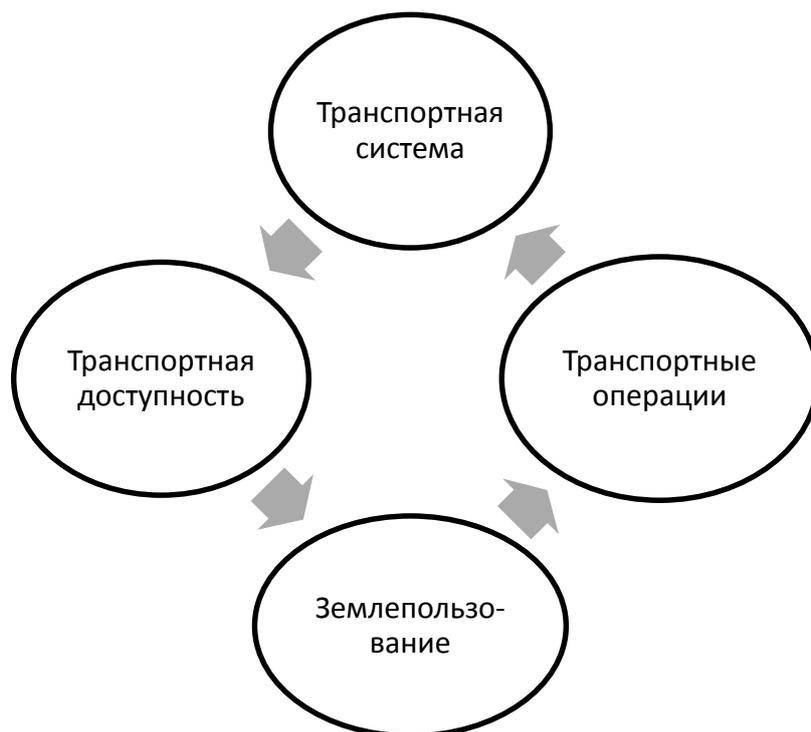


Рис. 8. Петля обратной связи «землепользование-транспорт»

Начиная с нижнего звена цикла – блока «Землепользование» (места расположения населения и мест занятости) – определяют направление перемещения пассажиропотоков: от начального пункта к пункту назначения – для моделирования транспортных операций по передвижению транспортных потоков. Моделирование транспортной системы позволяет вычислить транспортную доступность – показатель временной достижимости определенного места в городе с помощью передвижения по сети на автомобиле, общественном транспорте, пешком. Транспортная доступность должна быть решающим фактором в формировании политики землепользования, поскольку, наряду с другими факторами, на выбор мест проживания, работы, расположения офисных зданий влияет близость к существующим и строящимся транспортным коммуникациям.

Сегодня имеется много теоретических подходов, объясняющих взаимодействия землепользования и транспорта в городской агломерации, например, инженерно-технические теории (теория городских транспортных систем), экономические теории (концепции города-рынка) и социальные теории (общественное и городское пространство).

В конце 19 столетия было сформулировано несколько «идеальных» с точки зрения оптимальности решений для городского землепользования и городских транспортных систем. Эти решения зависят от пространственной структуры, плотности заселения жилого района, распределения землепользователей и преобладающего вида перевозок. Попытки определить «идеальную» с точки зрения землепользования транспортную систему в современных городах приводят к различным результатам. Результаты эмпирического исследования взаимодействия землепользования и транспорта позволяют заключить, что плот-

ность заселения жилых районов находится в обратной зависимости от продолжительности поездок [29].

Моделирование территориального развития городов

Сегодня существует множество теорий пространственной организации города. В этих теориях внимание сосредотачивается на двух пространственных измерениях экономической жизни: расстоянии и площади. Роль расстояния проявляется в том, что транспортные издержки не только увеличивают рыночные цены перевозимых товаров, но и оказывают влияние на размещение производственных объектов. Роль площади в том, что рынки отдельных товаров представляют собой районы, расположенные в определенных географических пределах.

В качестве примера приведем краткое описание наиболее известных моделей города.

Модель фон Тюнена (1830-е годы)

Исходными допущениями модели были следующие [22]:

- город расположен в центре однородной равнины;
- сельское хозяйство ведется на равнине, город служит рынком;
- почва обладает свойствами однородности и изотропности по плодородию;
- равные издержки производства;
- расстояние равнозначно объему производимой продукции;
- отсутствует эффект масштаба производства (земельные участки равны).

Кроме того, у модели фон Тюнена имеются скрытые допущения:

- 1) товар с худшей транспортабельностью должен стоить дороже;
- 2) правило Дана: система цен устанавливается в городе таким образом, чтобы дать пространство каждому товару в тех пропорциях, которые нужны горожанам.

Модель фон Тюнена стала первой моделью цены земли и родоначальником целого класса моделей под названием «очаг воздействия».

Другие модели территориальной организации города

Большое значение имеет гипотеза концентрических зон, предложенная Эрнестом Берджессом (1925 г.). Согласно этой гипотезе, развитие города сопровождается формированием концентрических колец или зон. В каждом кольце сосредоточены определенные экономические и жилые структуры. В городе имеются следующие основные зоны, начинающиеся от центра.

- 1) *Центральный деловой район*, в котором расположены основные коммерческие предприятия, магазины и увеселительные заведения. Служащие и потребители этого района здесь не проживают.

- 2) *Смешанная зона*, в которой расположены жилые дома и коммерческие предприятия. Именно здесь обычно формируются этнические общности: «маленькая Италия», «китайский квартал» и т.п.
- 3) *Рабочий район* с жилыми домами рабочих. Жилые кварталы рабочих отличаются стабильностью, в них постоянно проживают семьи.
- 4) *Жилая зона представителей среднего класса*, где сосредоточены семейные особняки, небольшое число многоквартирных домов и отелей.
- 5) *Привилегированная зона*, где проживают, главным образом, представители среднего и высшего класса, а также высокопоставленные администраторы и творческая элита. Это скорее пригород.

Гипотеза неплохо объясняет основные формы развития городов. Уолтер Фири (1945 г.) критиковал ее за то, что в ней не приняты во внимание «эмоциональный и символический аспекты», придающие особую самобытность некоторым районам. По мнению Фири, эти факторы влияют на выбор места жительства.

Теория секторов Хомера Хойота (Homer Hoyt, 1939 г.) основное внимание уделяет анализу длительных изменений, происходящих в городах. В то время как Э. Берджесс ввел модель внешнего расширения городов, Хойот принял за основу развития секторы или квадранты [5] (рис. 9). Направление расширения городских территорий обычно соответствует специфике транспортных путей и уже застроенных районов. Развитие секторов в определенном направлении продолжается в течение примерно 30 лет или дольше. Теория секторов дополняет упрощенную концепцию концентрических зон.

Модели Э. Берджесса и Х. Хойота предполагают существование одного центрального делового района, однако во многих современных городах имеется несколько деловых центров, а также промышленных и жилых районов. Учитывая новые тенденции развития городов, Чонси Хэррис и Эдвард Ульман (1945 г.) предложили теорию множества центров, или теорию многоядерности.

Иногда в городах возникают конфликты по поводу использования земли. Стоимость земли в значительной мере влияет на характер ее использования. На территории, прилегающей к коммерческому району, наподобие Чикагской окружной дороги, невыгодно строить промышленные и жилые здания – это слишком дорого. Но она вполне пригодна для сооружения административных зданий. Все эти принципы вносят некоторую упорядоченность в сложную динамику развития городов, хотя она не всегда соответствует моделям, предложенным Э. Берджессом и Х. Хойотом (Уилсон, Шульц, 1978 г.) [14].

Модели городского транспортного планирования

Первое комплексное изучение городской транспортной системы было осуществлено в США в 1953 году в Детройте, затем в 1956 году в Чикаго. С тех пор общий подход к исследованиям в своей основе не изменился – комплексная четырехстадийная компьютеризированная транспортная модель (aggregate four-stage computerized transport model).

В развитии транспортных моделей можно выделить 4 периода:

1. В 1950 – 1960 гг. развитие в ответ на ускоряющееся строительство автомагистралей и совершенствование компьютеров;
2. В 1970 – 1980 гг. развитие в ответ на критику комплексных методов;
3. В 1980 – 1990 гг. развитие в ответ на критику статических методов анализа маршрутов (trip-based analysis);
4. В 1990-е гг. развитие в ответ на загрязнение окружающей природной среды и политику управления транспортным спросом (travel demand management).

До 1950-х годов для анализа поездок использовали данные с транспортных счетчиков. Такой подход был адекватен только при рассмотрении дневных периодов, любые прогнозы были грубы и основаны на рассмотрении трендов. В 1950-х строительство дорог, особенно в США, ускорилося, а вместе с ним возросла потребность в более сложных инструментах предсказания и экономических прогнозах. Развитие компьютеров в течение того периода времени дало средства обработки больших объемов данных, необходимых для моделирования всей городской системы. Разработчиками первых моделей были в основном инженеры с «позитивистскими» взглядами, применявшие физические закономерности для планирования городских систем (например, гравитационное взаимодействие использовалось для моделирования распределения транспортных потоков по сети). Ключевой методикой, получившей развитие в этот период, стала «комплексная четырехстадийная модель» [23] (рис. 9).

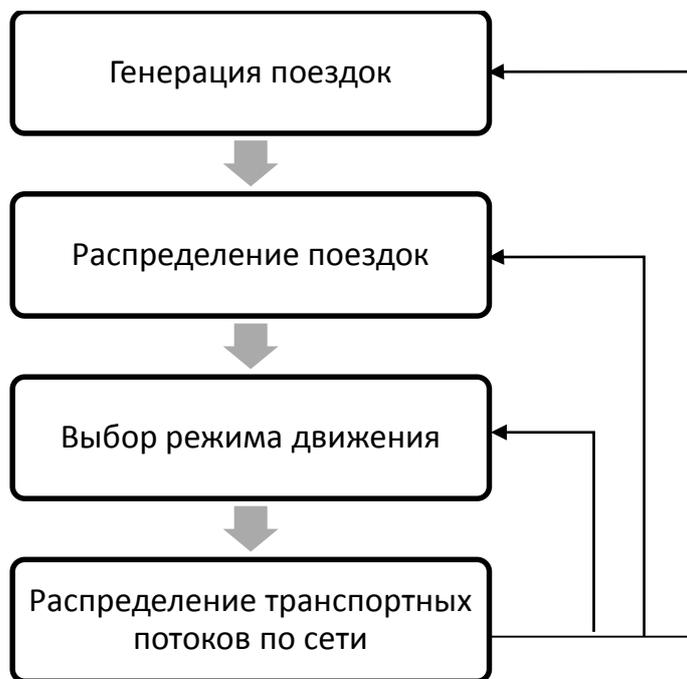


Рис. 9. Классическая четырехстадийная транспортная модель

Базовыми предположениями разработчиков четырехстадийной модели были приведенные ниже утверждения.

- Прогноз будущих схем землепользования возможен независимо от изменений в транспортной системе.
- Предсказать поведение водителей можно на основе данных о домохозяйствах, собранных с определенной территории (городской зоны).
- Взаимосвязь между характеристиками домохозяйств и водительским поведением будет оставаться неизменной во времени.
- Водители выбирают маршрут поездки, стремясь минимизировать время и стоимость поездки.
- Связи между городскими зонами, усредненные характеристики типичного буднего дня и часов пик позволяют создать адекватную картину для целей улучшения транспортной системы.

В 1970-х годах на фоне политических кризисов во всем развитом мире окончание послевоенного бума, нехватка топлива и высокая инфляция в Великобритании привели к гражданским беспорядкам, в том числе и из-за транспортных проблем. В этот период возник новый подход к исследованиям [17], менее зависимый от компьютера, более открытый для участия общественности, который включал более широкий спектр критериев оценки, таких как экологические вопросы и вопросы социальной справедливости (поскольку в предыдущий период развития внимание было сосредоточено в значительной степени на экономических оценках). Однако, несмотря на некоторые изменения в процессе транспортного планирования, используемые компьютерные модели в своей основе остались прежними (комплексная четырехстадийная модель, разработанная в предыдущие десятилетия).

В 1973 году Ли опубликовал критическую статью, в которой подчеркнул семь фундаментальных недостатков: чрезмерная комплексность, вычислительная грубость, большие объемы входных данных, несовпадение используемой в моделях теорией с фактическим поведением участников движения, трудности в интерпретации результатов моделирования, необходимость корректировки модели для получения реалистичных результатов, высокая стоимость. В ответ на критику через некоторое время возникло три новых аналитических метода:

- 1) модели взаимодействия транспорта и землепользования, описывающие взаимное влияние транспорта и землепользования;
- 2) разукрупнение методов – построение моделей выбора маршрутов на основе индивидуальных целей поездок, а не зонирования территории;
- 3) методы микромоделирования – усовершенствование комплексной процедуры распределения спроса с учетом поведения водителя на уровне отдельного транспортного средства или небольшой группы транспортных средств.

Несмотря на улучшения технологий моделирования 1970-х и начала 1980-х годов, на практике продолжали использоваться комплексные четырехступенчатые модели. Поэтому в 1986 году Аткинс выступил с новыми критическими замечаниями об избыточности, неэффективности и расточительности основных методов в транспортном планировании. В 1980-х и 1990-х годах в ответ на эту критику были разработаны новые средства моделирования:

- динамические методы (dynamic methods);
- методы, основанные на активности (activity-based methods).

В подходе, основанном на активности, наблюдение за поездкой заменяется на подробное рассмотрение деятельности, приводящей к поездке. В основу была положена следующая гипотеза: чтобы понять (и повлиять на) водительское поведение, необходимо понимать деятельность человека, использующего транспортную систему. Таким образом, эти методы сосредоточены на деятельности членов домохозяйства, а не на поездках как изолированных событиях.

Динамические методы были разработаны в противовес «статичности» предыдущих подходов. Анализ поездок основывался на данных одного сечения за один временной отсчет, но критики утверждали, что транспортное поведение меняется с течением времени и транспортные потоки также будут меняться.

Период развития в 1990-е годы был связан с коренными изменениями в транспортной политике в развитых странах мира, в том числе с Дополнением к Закону о чистоте атмосферного воздуха (CAAA, 1990) и Законом об эффективности наземных перевозок с взаимодействием различных видов транспорта (ISTEA, 1991) в США. Эти два Акта предусматривают расширение системы общественного транспорта, предоставление выделенных полос, устранение зааторов и внедрение тарифов на платный проезд, противодействие проблемам загрязнения, гибкости в передаче финансовых средств между фондами инвестиций в магистральное строительство и инвестиций в общественный транспорт. CAAA и ISTEA стали вызовом профессионалам-транспортникам, требуя прогнозы размеров загрязнения атмосферы выхлопными газами. Для развития транспортного моделирования Правительство США запустило крупномасштабную программу: Travel Model Improvement Programme (TMIP). Хотя работа еще продолжается, уже довольно подробно разработана модель микромоделирования TRANSIMS, которая позволяет рассчитывать прогнозы распространения выбросов выхлопных газов и их распределения в городском пространстве [24].

Современная четырехстадийная процедура транспортного моделирования

Современные модели состоят, как правило, из следующих взаимосвязанных структурных блоков:

1. модели объемов транспортного спроса;
2. модели структуры транспортного спроса;
3. модели транспортных потоков на дорожной сети.

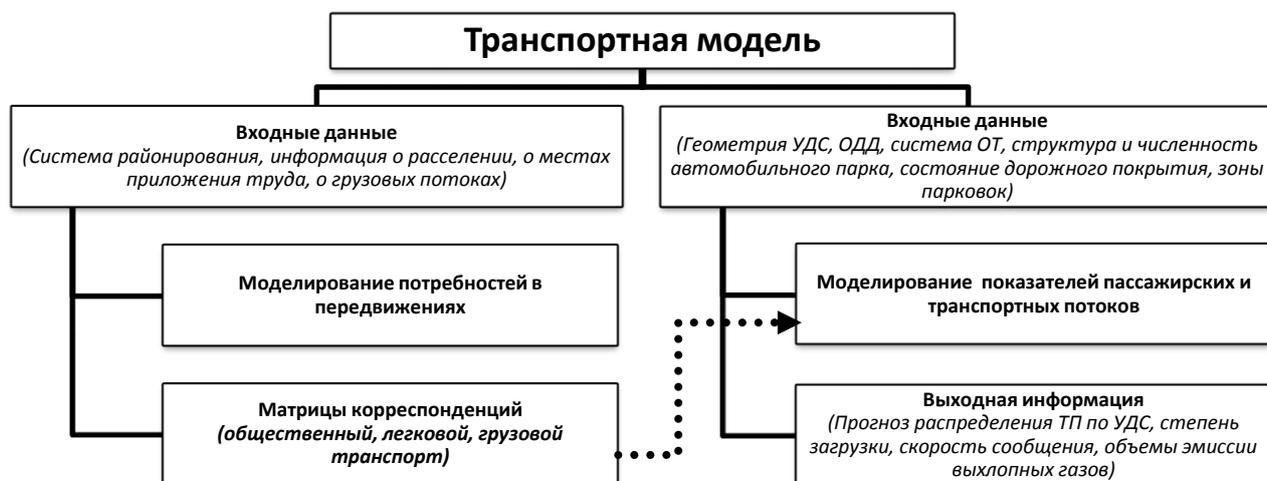


Рис. 10. Составляющие транспортного моделирования

Несмотря на различия в используемом математическом аппарате, большинство современных транспортных моделей предполагает выполнение стандартных операций и расчётов (рис. 10):

1. районирование исследуемой территории;
2. построение графов дорожной сети и маршрутных сетей общественного транспорта;
3. определение общих объемов транспортного спроса по транспортным районам для различных целей поездок;
4. моделирование структуры транспортного спроса по пунктам назначения поездок, времени суток, видам транспорта;
5. моделирование распределения транспортных потоков по дорожной сети изучаемой территории и расчет параметров транспортных потоков;
6. расчет показателей работы автомобильного транспорта и оценка эффективности возможных управляющих мероприятий.

Районирование исследуемой территории. Моделируемая территория разбивается на транспортные районы. Каждый район рассматривается как генератор и поглотитель транспортных и пассажирских потоков.

Районирование территории осуществляется исходя из следующих соображений – по возможности район должен

- обладать однородной планировкой и застройкой;
- обладать единой функциональной специализацией (жилой, промышленный, торговый, район непромышленного приложения труда и т.п.).

При задании границ районов целесообразно учитывать:

- естественные и искусственные преграды (реки, железные дороги и т.п.);

- существующее административное районирование города или региона (поскольку статистические данные, как правило, собираются по административным единицам);
- нежелательно использование районов вытянутой конфигурации.

Определение общих объемов транспортного спроса. На данном этапе моделируется общее число поездок между транспортными районами за определенный период. Для составления матрицы корреспонденций, как правило, используются различные формы гравитационной модели, которая предполагает, что число поездок между районами, зависит от:

- численности населения, числа рабочих мест, количества предприятий торговли и сферы услуг (в зависимости от целей поездки);
- меры взаимной удаленности рассматриваемых территорий.

В качестве меры удаленности, как правило, рассматривается не расстояние, а среднее время поездки или величина обобщенных затрат на совершение поездки (сумма денежных затрат на билет либо на топливо и оценки стоимости времени, проведенного в пути). На данной стадии расчетов используются значения затрат времени, полученные из транспортных обследований или путем экспертных оценок. Моделирование времени движения по маршрутам производится на стадии расчета показателей работы автомобильного транспорта и оценки эффективности возможных управляющих мероприятий (рис. 11).

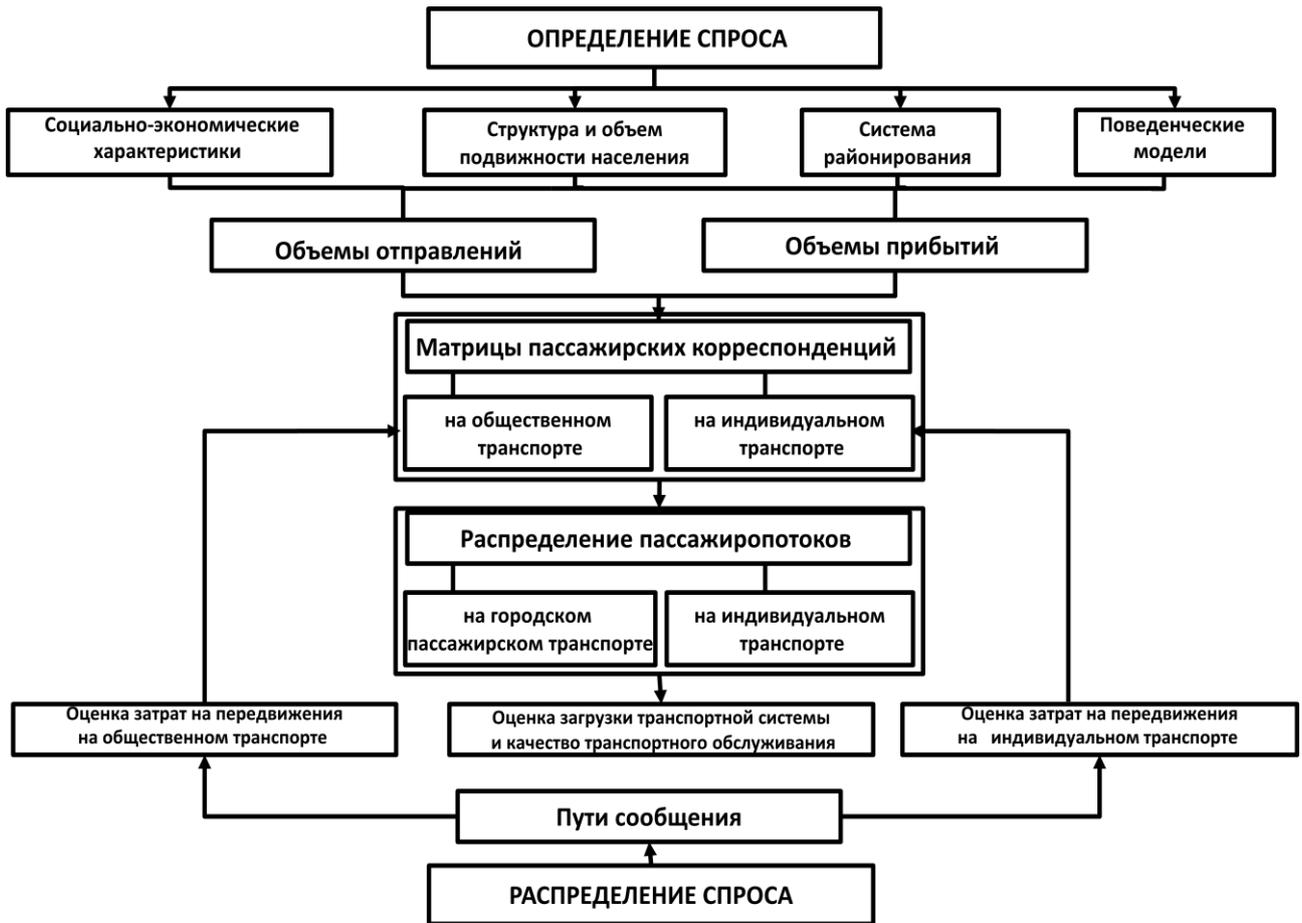


Рис. 11. Определение транспортного спроса

По этим данным проводится расчет матрицы транспортных корреспонденций между районами для различных целей поездок.

Моделирование транспортного спроса. Структура транспортного спроса населения определяется совокупностью индивидуальных решений, принимаемых каждым жителем в связи с совершением поездки. Это решения о выборе пункта назначения, времени отправления, вида транспорта и маршрута.

Существенное влияние на выбор пользователем способа поездки, наряду с общими закономерностями индивидуальных предпочтений или субъективных факторов, имеют качественные характеристики. Разные способы перемещения часто выбираются в зависимости от цели поездки. Например, часто для поездок на работу люди выбирают общественный транспорт, а для поездок с социальными целями – личный автомобиль.

В процессе поездки выбор пользователя может измениться в зависимости от ситуации или изменившихся обстоятельств, не зависящих от поездки. На выбор способа поездки также влияют изменения стоимости стоянки, топлива, самочувствие человека, погодные условия и т. п. Нельзя исключать из рассмотрения и варианты мультимодальных поездок, когда одна поездка разделяется между несколькими видами транспорта, в том числе и по системе перехватывающих парковок («Park and Ride») [29].

При модельных расчетах принято выделять следующие виды передвижений, для которых отдельно прогнозируется спрос:

1. Передвижения легкового и общественного транспорта.
 - 1.1. Трудовые внутригородские передвижения (в основном, утренний и вечерний часы пик).
 - 1.2. Деловые внутригородские передвижения (дневной час пик).
 - 1.3. Транзитные передвижения.
 - 1.4. Рекреационные передвижения на связях города с внешними населенными пунктами (садоводствами, дачными поселками, зонами отдыха).
 - 1.5. Передвижения на связях города с внешними по отношению к нему населенными пунктами, не носящие рекреационного характера.
2. Передвижения грузового транспорта.
 - 2.1. Внутригородские передвижения транспорта малой грузоподъемности.
 - 2.2. Внутригородские передвижения транспорта средней и высокой грузоподъемности.
 - 2.3. Транзитные передвижения транспорта малой грузоподъемности.
 - 2.4. Транзитные передвижения транспорта средней и высокой грузоподъемности.
 - 2.5. Передвижения транспорта малой грузоподъемности на связях города с внешними по отношению к нему населенными пунктами.
 - 2.6. Передвижения транспорта средней и высокой грузоподъемности на связях города с внешними по отношению к нему населенными пунктами.

В настоящее время эмпирические модели вытесняются моделями, основанными на вероятностном дискретном выборе, - стохастическими моделями с величиной обобщенных затрат в качестве критерия выбора времени поездки и вида транспорта. По результатам расчетов составляются матрицы корреспонденций для исследуемых периодов времени и типов транспортных средств.

Важной особенностью транспортного спроса является вторичность, производность его характера. Основное назначение транспорта — обеспечить доступ населения к различным видам деятельности, доступ товаров на рынки и сырья на производство. Поэтому поездка не удовлетворяет потребностей сама по себе, а только создает предпосылки для их удовлетворения. Это означает, что спрос на транспортные услуги порождается спросом на другие блага. Следовательно, не вполне правомерно утверждать, что поездка сама по себе является ценностью. Более логично рассматривать поездку не как самостоятельное благо, а как затрату ресурсов, необходимую для приобретения иных благ и тем самым наделять ее отрицательной полезностью.

Такой подход позволяет сформулировать два критерия потребительского выбора на рынке транспортных услуг [29]:

- выгода, ожидаемая потребителем от деятельности или блага, доступ к которым он получает посредством совершения поездки. Данный критерий характеризует пункт назначения и, как правило, время отправления (рис. 12);
- общая сумма всех видов издержек, ложащихся на потребителя в связи с совершением поездки. Этот критерий характеризует время отправления, вид транспорта и конкретный маршрут.

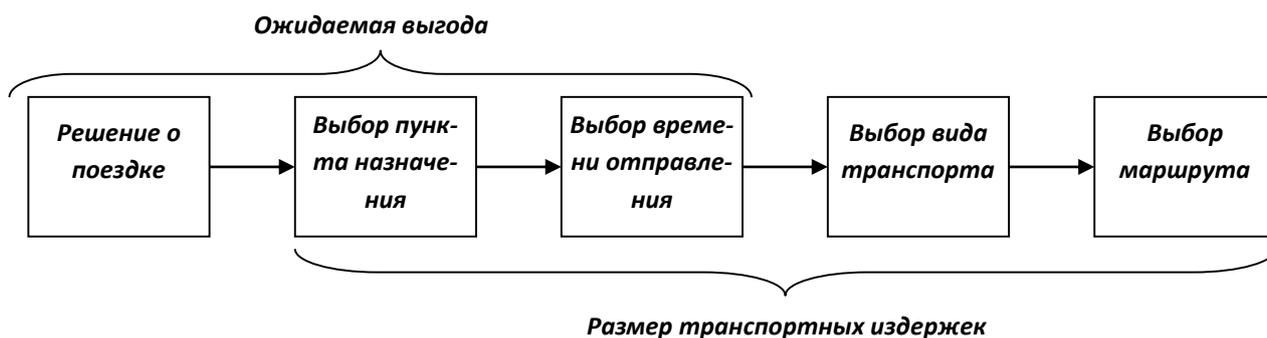


Рис. 12. Критерии потребительского выбора при совершении поездки

Предполагается, что потребитель всегда делает выбор в пользу альтернатив, которые обеспечивают максимальное отношение ожидаемой выгоды к общим транспортным издержкам.

Поскольку выгода, ожидаемая от поездки, зависит от широкого спектра факторов, не имеющих отношения к работе транспортной системы, она (так же, как и соотношение затраты/выгода) не присутствует в модели в явном виде, а входит в расчеты в качестве агрегированного показателя привлекательности данного транспортного района для пользователей транспортной системы.

В таком случае критерием потребительского выбора является приведенная сумма всех издержек, связанных с совершением поездки (т.н. обобщенная цена поездки). Эта величина складывается из прямых денежных затрат, затрат времени, затрат на эксплуатацию автотранспортного средства и иных затрат, приведенных к единой размерности – как правило, ко времени или к денежным единицам.

Построение графа дорожной сети маршрутов. Улично-дорожная сеть моделируется направленным графом. Каждому ребру графа ставится в соответствие длина, максимальная скорость движения, максимальная пропускная способность, ширина и число полос движения в данном направлении. Узлы графа описывают максимальную пропускную способность, приоритеты направлений движения, разрешенные повороты и режимы светофорного регулирования.

Транспортные районы задаются на графе дорожной сети в виде узлов, связанных с прочими узлами графа при помощи «фиктивных» ребер, которым присвоена малая длина и значительная пропускная способность.

Моделирование распределения транспортных потоков. Моделирование параметров движения транспортных и пассажирских потоков на маршрутах общественного транспорта ведется на основе данных о структуре транспортного спроса, целях поездок, видах перевозок и периодах времени. В ходе расчетов объемы транспортного спроса первоначально загружаются на кратчайшие маршруты между районами на графе дорожной сети, а затем, с учетом ограниченных пропускных способностей узлов и ребер, перераспределяются по всему графу. Полученные для каждого участка дорожной сети значения параметров транспортного потока (скорость, плотность, интенсивность) используются для расчета затрат времени на поездки между транспортными районами.

Выбор уровня детализации при моделировании. При разработке математической модели наиболее важным является поиск компромисса между уровнем детализации и вычислительными ресурсами. Уровень детализации в основном определяется числом:

- транспортных районов;
- групп пользователей транспортной системы;
- целей поездок;
- видов транспорта;
- периодов времени;
- объектов дорожной инфраструктуры.

Какой из этих аспектов будет моделироваться наиболее подробно, зависит от особенностей разрабатываемой транспортной программы.

Так, для оценки эффективности мероприятий, носящих масштабный и стратегический характер (например, решений в сфере градостроительного планирования), может быть целесообразным максимально приближенное к действительности моделирование характера мобильности населения. При таком подходе модель будет описывать большое число различных социально-экономических групп потребителей и множество различных целей поездок. Для того чтобы остаться в пределах доступных вычислительных мощностей, дорожную сеть придется моделировать с меньшим уровнем детализации. В такой модели будет рассматриваться незначительное количество крупных транспортных районов, а граф дорожной сети будет описывать только основные направления движения и транспортные коридоры.

Современные подходы к транспортному моделированию

Сегодня уже стало очевидно, что обеспечить баланс пропускной способности и транспортного спроса только за счет строительства новых дорог не возможно. Поэтому наиболее актуальными являются задачи управления транспортным спросом и совершенствования организации дорожного движения. Управление транспортным спросом дополнительно к инструментам, успешно моделируемым с помощью «традиционных» подходов, предполагает использование следующих механизмов: стимулирование перераспределения поездок по

видам транспорта, мультимодальные поездки с использованием различных видов транспорта, в том числе комбинации личного и общественного транспорта, совместное использование автомобилей (для совместных и/или чередующихся поездок).

Стимулирование перераспределения поездок по времени используется для более равномерной загрузки дорожной сети в течение дня и уменьшения транспортных задержек в пиковые часы. Вторичность транспортного спроса приводит к тому, что перераспределение поездок по времени требует моделирования основной деятельности населения.

Наряду с ростом потребностей в более совершенных моделях транспортной системы, развиваются и методы математического моделирования, увеличиваются доступные компьютерные ресурсы, что позволяет реализовать в программном обеспечении наиболее современные подходы к математическому моделированию транспортных систем.

Одна из таких современных моделей заложена в программный пакет TRANSIMS (TRansportation ANalysis SIMulation System - система моделирования для транспортного анализа), разработанный в рамках программы TMIP (Travel Model Improvement Program) в Национальной исследовательской лаборатории Лос-Аламоса (LANL) под эгидой Министерства транспорта США, Управления по охране окружающей среды (EPA) и Министерства энергетики США. TRANSIMS позволяет составлять точные прогнозы распространения и распределения выбросов выхлопных газов на городском пространстве (Lakshanan, 1998). TRANSIMS является интегрированной системой прогнозирования транспортных поездок, разработан с целью предоставить в распоряжение транспортных проектировщиков точную и полную информацию о взаимодействии транспортных средств, заторов и загрязнения окружающей среды.

Исследования с помощью пакета TRANSIMS основаны на модели виртуального города, содержащего полную информацию о жителях, их ежедневной транспортной активности и детальной транспортной инфраструктуре. Жители планируют поездки для удовлетворения своей потребности в передвижениях по городу. Движения каждого жителя в моделируемом городском регионе на всех существующих видах транспортных систем моделируются на посекундной основе. Цель состоит в том, чтобы воспроизвести реалистичную динамику передвижений по городу таким образом, что пользователи смогут получить точные данные выбросов загрязняющих веществ автомобилями и оценку расхода топлива. Как и четырехстадийная модель, модель TRANSIMS последовательная (не параллельная), то есть явная обратная связь дает информацию о реакциях отдельных участников движения на удовлетворение их транспортных предпочтений.

TRANSIMS состоит из пяти модулей: синтезатор населения, генератор активности, планировщик маршрутов, микросимулятор и блок обратной связи [35] (рис. 13).

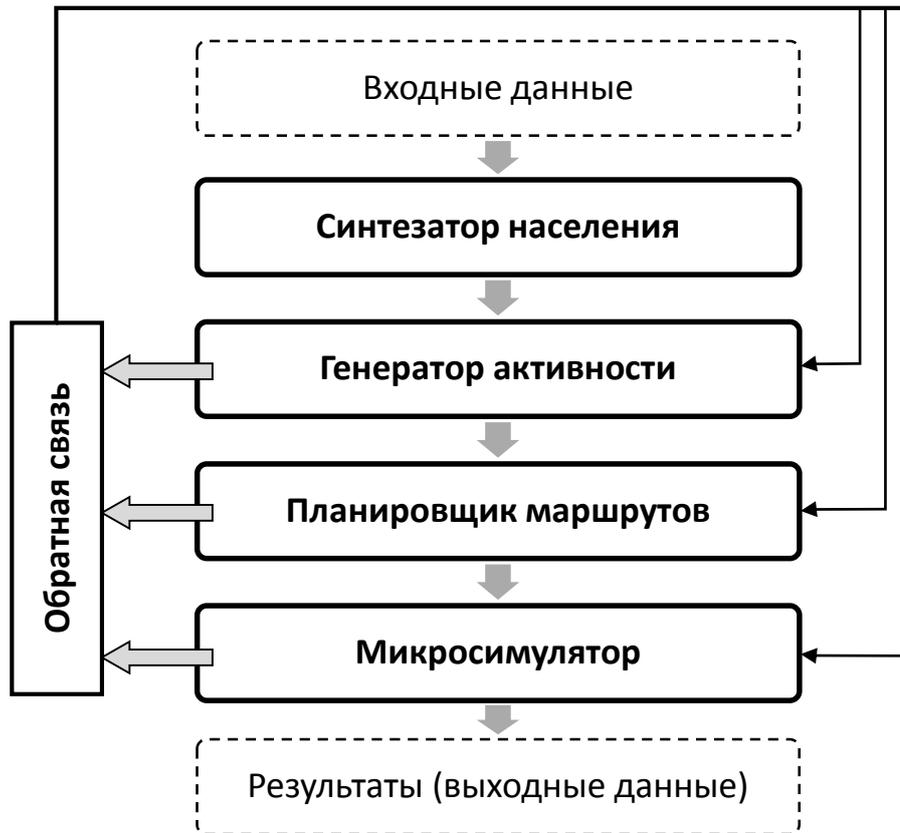


Рис. 13. Архитектура TRANSIMS

Первый модуль (синтезатор населения) используется для создания искусственного населения для домохозяйств на изучаемой территории. Он объединяет информацию данных переписи населения (обобщает по району переписи или блоку/группе), а также разукрупненные данные и открытые сведения о населении с помощью шаблонов микроданных (the public use microdata samples (PUMS) census records).

Синтетические домохозяйства создаются на основе агрегированных данных переписи населения. Атрибуты домохозяйств, используемые в анализе, выявляются априорно и могут включать данные переписи населения, такие как пол, возраст, образование, занятость, доходы и тип транспортного средства. Специалист по моделированию может выбрать любой из имеющихся параметров.

Второй модуль, генератор активности (деятельности) домохозяйств, определяет «потенциальную» повседневную активность каждого синтетического индивида для каждого синтетического домохозяйства. Входными данными этого модуля является синтетическое население, исследования по региональной активности, данные о транспортной системе (как о землепользовании, так и о транспортной сети). Исследования транспортной активности должны охватывать период в 24 часа или более длительный срок, быть репрезентативными по

выборке населения, а также включать в себя все мероприятия и поездки каждого члена семьи.

Общее количество поездок каждого участника движения может быть получено путем подсчета количества изменений местоположения при его повседневной транспортной активности. В сущности, перечень дневных маршрутов определяет ежедневные цепочки поездок каждого участника дорожного движения и будет аналогичен информации, содержащейся в традиционном дневнике путешествий.

Третий модуль, планировщик маршрутов, назначает транспортный маршрут каждой поездке, сформированной во втором модуле, с целью удовлетворения конечных целей участников движения. Важно отметить: в атрибуты маршрута в TRANSIMS входят не только дорожные участки, но и информация о режиме, изменении режимов движения, расположении парковки и данные о попутчиках.

Четвертый модуль – микромоделирование, использует маршрутные планы из модуля «Планировщик маршрутов» в качестве входных и моделирует транспортные сети на микроскопическом уровне детализации, несмотря на низкую достоверность большинства моделей дорожного движения [27].

В сущности, четвертый модуль моделирует взаимодействие между спросом (желаемыми целями поездок синтетического населения и местоположениями конечных пунктов движения) и ресурсами (возможностями транспортной системы удовлетворить этот спрос) для каждого режима за весь период моделирования. Другими словами, моделируется вся 24-часовая динамика транспортной системы. Естественно входные данные транспортной сети требуются для каждого режима.

Модуль обратной связи служит для достижения равновесного распределения транспортных потоков в сети и служит для обмена данными вычислений между генератором активности, планировщиком маршрутов и микросимулятором. Процесс достижения равновесия осуществляется итерационно следующим образом: если на очередном шаге некоторые маршруты оказываются неосуществимыми, данные возвращаются генератору активности и он определяет альтернативные варианты, заново распределяя их по сети с помощью планировщика маршрутов. Также полученные промежуточные маршруты могут быть неосуществимы в заданные временные промежутки, тогда эта информация возвращается обратно и генератор маршрутов ищет альтернативные пути проезда.

Выходные данные модуля микромоделирования могут быть агрегированы на любом уровне. Например, можно получить информацию о каждом участнике дорожного движения на посекундной основе, или данные могут быть агрегированы одновременно по пространственным (от дороги до транспортной сети в целом) и временным (от 1 секунды до 24-часового периода) критериям в зависимости от желаний разработчика модели.

После завершения моделирования выходные данные от микромоделирования используются для вычисления различных параметров эффективности. По-

скольку модуль основан на микромоделировании и каждый участник движения моделируется в явном виде, у пользователя есть множество возможностей выбора в том, какие показатели использовать.

Фундаментальные основы моделирования

Транспортные явления сложны, нелинейны и зависят от результатов взаимодействия большого количества транспортных средств. Из-за реакций отдельных водителей, транспортные средства не взаимодействуют просто по законам механики как твердые тела, а скорее формируют группы и демонстрируют эффект распространения ударной волны.

Городские транспортные потоки (ТП) обладают следующими особенностями. Во-первых, их поведение стохастично – характеристики ТП можно прогнозировать только с определенной долей вероятности. ТП движется по сети, которая также обладает определенными характеристиками, допускающими более или менее строгое описание.

Во-вторых, ТП нестационарны, причем колебания характеристик происходят как минимум в трех циклах: суточном, недельном и сезонном.

В-третьих, ТП свойственна неполная управляемость, суть которой в том, что даже при наличии полной информации о потоках и возможности информирования водителей о необходимых действиях, эти требования носят рекомендательный характер. Следовательно, достижение глобального экстремума любого критерия управления становится весьма проблематичным.

В-четвертых, ТП свойственна множественность критериев качества, таких как: задержка в пути, средняя скорость движения, прогнозируемое число ДТП, объем вредных выбросов в атмосферу и т.д. Большинство характеристик взаимосвязаны, выделить какую-либо одну из них не представляется возможным.

Пятой особенностью дорожного движения как объекта управления является сложность и даже невозможность замера даже основных характеристик, определяющих качество управления. Так, оценка величины интенсивности движения требует либо наличия датчиков транспортных потоков на всех направлениях движения, либо использования данных аэрофотосъемки, либо проведения трудоемкого ручного обследования.

Наконец, необходимо отметить принципиальную невозможность проведения масштабных натуральных экспериментов в сфере управления дорожным движением. Эта невозможность предопределена, во-первых, необходимостью обеспечения безопасности движения, во-вторых, материальными и трудовыми затратами на проведение эксперимента (изменение разметки и дислокации дорожных знаков) и, в-третьих, тем, что серьезные изменения в комплексной схеме организации движения затрагивают интересы большого количества людей – участников движения.

Таким образом, трудности формализации процессов движения транспортного потока стали серьезной причиной отставания результатов научных исследований от требований практики.

Для поиска эффективных стратегий управления транспортными потоками в мегаполисе, оптимальных решений по проектированию улично-дорожной сети и организации дорожного движения необходимо учитывать широкий спектр характеристик транспортного потока, закономерности влияния внешних и внутренних факторов на динамические характеристики смешанного транспортного потока.

Классическая парадигма теории транспортных потоков, математически определяемая как функциональная зависимость интенсивности (скорости) транспортного потока от его плотности (зависимость поведенческой динамики транспортного потока от природы его свойств) до сих пор остается определяющим эвристическим принципом развития теории построения моделей. Примером может служить современная трехфазная теория Б. Кернера [28].

Однако анализ фундаментальных основ теории транспортных потоков, сопоставление с требованиями практики свидетельствуют о необходимости применения новых принципов развития теории транспортного моделирования.

Первой попыткой отказа от классического подхода стала попытка Карлоса Ф. Даганзо в качестве основы изучения транспортной динамики рассмотреть роль сужений на дорогах, а элементарной единицей моделирования плотных транспортных потоков выбрать очередь из транспортных средств [20]. Однако пока эта попытка не привела к получению существенных результатов. Очевидно, требуется:

- более глубокий анализ фундаментальных основ транспортного моделирования, позволяющий выделить ключевые черты классической парадигмы и сопоставить парные им черты новой парадигмы, такие, как смена акцентов в нормах загруженности дорог (норма пустых дорог должна смениться нормой переполненных дорог);
- поиск адекватных математических моделей описания и прогнозирования современных эмпирических наблюдений локальных уплотнений транспортного потока в местах въездов-съездов на автострадах, блокирующих режимы нормального движения;
- исследование и моделирование фазовых переходов, не только прямых, но и обратных, связанных с эффектом гистерезиса, поиск физических механизмов этого явления и развитие идей Даганзо о роли сужений.

Выявлены особенности и пределы применимости следующих прикладных транспортных моделей.

- Равновесные модели, в которых плотность и скорость потока считаются неизменными во времени. Это модели равновесного распределения транспортных средств (ТС) по различным доступным путям достижения пункта назначения. В этих моделях участники движения разбиваются на группы по ценовым функциям, отвечающим каждой линии в заданной сети. Минимизируется суммарный ценовой функционал. Трудность такого подхода в подборе адекватных ценовых функций.

- Гидродинамические модели, когда ТС снабжается определенным типом реакции на окружающий трафик: мгновенная реакция, эластичная реакция, реакция с релаксацией; модель переменного спроса на перемещение. В этих моделях основным объектом изучения является матрица корреспонденций, которая зависит от времени суток, дней недели и годовой сезонности. Минимизирующий функционал в таких моделях содержит функцию спроса, которая неизвестна.
- Оптимизационные модели, в которых определяется оптимальная скорость однополосного потока в зависимости от плотности ТС (это так называемые модели оптимальной скорости и модели следования за лидером). Это модели динамического равновесия, объединяющие функции спроса на движение с микроскопическим рассмотрением движения ТС по отдельной траектории.
- Кинетические модели, использующие различные кинетические уравнения относительно функции распределения ТС по скоростям и координатам их положения на трассе. Важное место здесь занимают стохастические модели, в которых функция спроса определяется через распределение ценовых функций по своим аргументам, которые считаются случайными.

Выводы

Современное программное обеспечение, используемое для поддержки принятия решений при проектировании и управлении транспортными потоками в мегаполисах пока не предназначено для исчерпывающего решения вопросов о взаимосвязи города и его транспортной системы, взаимосвязи городской агломерации и транспортной системы, координация транспортной системы со всеми прочими аспектами функционирования города (экономикой, экологией, расселением).

Для разработки научно-технической основы такого программного обеспечения необходимо более детальное исследование и сопоставление алгоритмов моделирования и расчета транспортных потоков.

Библиографический список

1. Дубелир Г.Д. Планировка городов. Петербург, 1910.
2. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. – М.: «Советское радио», 1973.
3. Вукан Р. Вучик. Транспорт в городах, удобных для жизни. Москва, «Территория будущего». 2011. 413 с.
4. Зильберталь А.Х. Трамвайное хозяйство. Руководство для работников трамвая и учащихся. — М.-Л., 1932 г.
5. Смелзер Н. Социология. Пер. с англ. – М.: Феникс, 1994. – 688 с.
6. Киселев А.Б., Кокорева А.В., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н. Математическое моделирование автотранспортных потоков на регулируемых дорогах. // ПММ. 2004. Т. 68. Вып. 6. С. 1035-1042.
7. Киселев А.Б., Кокорева А.В., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н. Математическое моделирование движения двухполосного автотранспортного потока, регулируемого светофором. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Матем. Механ. 2006. №4. С. 35-40.
8. Киселев А.Б., Кокорева А.В., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н. Математическое моделирование динамики автотранспортных потоков на регулируемых дорогах. - Ломоносовские чтения. Научная конф. Секция механики. Апрель 2003 года. Тезисы докладов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. — С. 70.
9. Киселев А.Б., Кокорева А.В., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н. Динамика автотранспортных потоков на регулируемых участках дорог — поиск стратегии оптимального регулирования. — Ломоносовские чтения. Научная конф. Секция механики. Апрель 2004 года. Тезисы докладов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. — С. 94.
10. Киселев А.Б., Кокорева А.В., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н. Оптимальное регулирование автотранспортных потоков. — Ломоносовские чтения. Научная конф. Секция механики. Апрель 2005 года. Тезисы докладов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. - С. 115-116.
11. Киселев А.Б., Кокорева А.В., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н. Некоторые задачи моделирования автотранспортных потоков. — Ломоносовские чтения. Научная конф: Секция механики. Апрель 2006 года. Тезисы докладов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. - С. 82-83.
12. Киселев А.Б., Кокорева А.В., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н. Моделирование автотранспортных потоков методами механики сплошной среды. — Ломоносовские чтения. Научная конф. Секция механики. Апрель 2007 года. Тезисы докладов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007.

13. Регирер С. А., Смирнов Н. Н., Ченчик А. Е., Математическая модель взаимодействия движущихся коллективов: общественного транспорта и пассажиров, // Автоматика и телемеханика, 2007, выпуск 7, 116–131.
14. Смелзер Н. Социология: пер. с англ. — М.: Феникс, 1994.
15. Шелейховский Г.В. Композиция городского плана как проблема транспорта. М.: ГИПРОГОР, 1946г. – 129 с.
16. Allsop, R. Some reflections on forty years' evolution of transport studies [Электронный ресурс] / 38th Annual Conference of the Universities Transport Study Group.
17. Allen J. Post-classical transportation studies // Transportation Quarterly, Vol 39, No 3, July, 1985.
18. Atkins S. Transportation planning models: What the papers say // Traffic Engineering and Control, Vol 27, No 9, September, 1986.
19. Barceló J. Fundamentals of Traffic Simulation. Springer Science, Business Media, LLC 2010.
20. Daganzo C.F. Fundamentals of transportation and traffic operations. N.Y.: Elsevier Science Inc., 1997.
21. Giovanni M.Á. A Contribution to Urban Transport System Analyses and Planning in Developing Countries. Methods and Techniques in Urban Engineering Edited by Armando Carlos de Pina Filho and Aloisio Carlos de Pina Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ). Published online 01, May, 2010.
22. Integrating Intelligent Transportation Systems within the Transportation Planning Process: An Interim Handbook. January 1998.
23. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling transport. John Willey & Sons, 2011.
24. Kane L., R. Behrens. Transport planning models – an historical and critical review. Urban Transport Research Group, University of Cape Town (<http://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/7834/037.pdf?sequence=1>).
25. Lee D. Requiem for large-scale models // Journal of the American Institute of Planners, Vol 39, No 3, May, 1973.
26. Moshe Ben-Akiva, Joan Walker, Adriana T. Bernardino, Dinesh A. Gopinath, Taka Morikawa, and Amalia Polydoropoulou (2002) Integration of Choice and Latent Variable Model, Elsevier, Ed. Mahmassani, 431-470.
27. Nagel K., Stretz P., Piek M. TRANSIMS Traffic Flow Characteristics. Los Alamos National Laboratory. TRANSIMS Report Series. 1998.
28. Kerner B. S. Introduction to modern traffic flow theory and control. The long road to three-phase traffic theory. Springer, 2009.

29. Serras J. Multidimensional Multilevel Representation for Traffic Simulation Models. The Open University Department of Design and Innovation. 2007.
30. Transland UR-98-RS-3055 (2000). Integration of Transport and Land Use Planning, Paulley, N. & Pedler, A., Transportation Research Laboratory - TRL, London.
31. Wang F., Guldmann J.-M. A Spatial Equilibrium Model for Region Size, Urbanization Ratio and Rural Structure // Environment and Planning. 1997. Vol. 29. P. 929-941.
32. Wachs M. Planning organizations and decision-making: A Research agenda, Transportation Research A, Vol. 19A, No 5/6, 1985.
33. Willson R. Assessing communicative rationality as a transportation planning paradigm. Transportation 28: 1–31, 2001.
34. Wegener, Michael, Roger L. Mackett and David C. Simmonds. 1991. One City, Three Models: Comparison of Land-use / Transport Policy Simulation Models for Dortmund. Transport Reviews. 11: 107-29.
35. Weiner, Ed and Fred Ducca. «Upgrading Travel Demand Forecasting Capabilities», ITE Journal, Volume 69, Number 7, July 1999, pp. 28-33.