

**Ю.В. Трофименко, М.Р. Якимов**

**ТРАНСПОРТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ:**

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ  
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ  
КРУПНЫХ ГОРОДОВ**



Москва • Логос • 2013

УДК 654.1/5(470.53-25)

ББК 39.11

Т70

Р е ц е н з е н т ы:

**О.В. Евсеев**, директор Федерального государственного унитарного предприятия «Научный центр по комплексным транспортным проблемам» Минтранса России, д.т.н.,

**О.Н. Ларин**, заведующий кафедрой «Эксплуатация автомобильного транспорта» Южно-Уральского государственного университета, д.т.н.

## **Т70 Трофименко Ю.В., Якимов М.Р.**

Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов: монография / Ю.В. Трофименко, М.Р. Якимов. – М.: Логос, 2013. – 464 с.

ISBN 978-5-98704-709-5

В монографии сформулированы цели и задачи функционирования транспортных систем крупных городов. Определены функция транспортной системы крупного города как части информационной системы и роль ее в повышении качества жизни населения. Представлена методика пространственного анализа территории города, получены закономерности транспортного поведения жителей крупных российских городов. Предложена многоуровневая система показателей оценки качества функционирования транспортных систем городов.

Впервые предложено использовать теорию математического программирования для решения задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города. Разработаны принципы управления транспортной системой в условиях действующих ограничений. Детально описан процесс выработки и принятия решений по созданию эффективной транспортной системы крупного города.

Для специалистов в области управления транспортными системами городов, руководителей и специалистов органов власти крупных городов, проектировщиков, студентов, аспирантов и преподавателей транспортных вузов и специальностей.

УДК 654.1/5(470.53-25)

ББК 39.11

**ISBN 978-5-98704-709-5**

© Якимов М.Р., 2013

© Логос, 2013

## Оглавление

Предисловие.....	9
Введение.....	12
<b>Глава 1. ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ В ГОРОДАХ.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1. Термины и определения.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2. Современные подходы к транспортному планированию и организации дорожного движения в городах.....</b>	<b>20</b>
1.2.1. Планирование развития транспорта в крупных городах.....	20
1.2.2. Возможности и ограничения развития транспортных систем.....	22
1.2.3. Принципы планирования городов и транспортной инфраструктуры.....	27
1.2.4. Подходы к транспортному планированию городов.....	30
<i>Негативные последствия депопуляции.....</i>	<i>36</i>
<i>Компактный город.....</i>	<i>36</i>
<i>Эффективность использования улично-дорожной сети.....</i>	<i>37</i>
<b>1.3. Научные исследования транспортных систем городов.....</b>	<b>38</b>
1.3.1. Городское и транспортное планирование.....	38
1.3.2. Этапы развития транспортного планирования.....	40
1.3.3. Современные направления исследования транспортных систем.....	44
<i>Транспортный поток, его характеристики.....</i>	<i>45</i>
<i>Ресурсный подход к оценке транспортных систем городов.....</i>	<i>46</i>
<i>Современные прикладные исследования транспортных систем городов.....</i>	<i>47</i>
1.3.4. Математические транспортные модели.....	49
<b>1.4. Движущие силы и ограничения развития транспортных систем городов.....</b>	<b>53</b>
1.4.1. Роль и движущие силы развития транспортных систем.....	53
<i>Фазы развития человеческого общества и его подвижность.....</i>	<i>53</i>
<i>Благосостояние человечества и качество жизни в городах.....</i>	<i>56</i>
<i>Транспортная система как часть информационной системы.....</i>	<i>60</i>
<i>Транспортные системы в материальном потреблении.....</i>	<i>67</i>
<i>Транспортная доступность и транспортные издержки.....</i>	<i>69</i>

1.4.2. Ограничения развития транспортных систем на урбанизированных территориях.....	71
<i>Ресурсные ограничения развития транспортных систем.....</i>	71
<i>Экологические ограничения развития транспортных систем ..</i>	78
1.4.3. Понятие эффективности транспортной системы крупного города.....	79
Выводы.....	83
<b>Глава 2. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТНОГО АНАЛИЗА ГОРОДСКОЙ ТЕРРИТОРИИ .....</b>	<b>85</b>
<b>2.1. Анализ использования городской территории.....</b>	<b>86</b>
2.1.1. Пространственно-неравномерная модель формирования транспортного спроса.....	87
2.1.2. Методика анализа территориального баланса городских территорий.....	97
<i>Транспортный спрос в городах. Сегменты транспортного спроса. Особенности представления транспортного спроса на территории. Виды городов, конфигурации.....</i>	<i>99</i>
<i>Методы формализации пространственного распределения структурных элементов городской среды при транспортном анализе территории.....</i>	<i>104</i>
<b>2.2. Анализ транспортной подвижности населения.....</b>	<b>113</b>
2.2.1. Анализ автомобилизации и общей подвижности населения городов.....	114
2.2.2. Анализ разделения (расщепления) транспортных корреспонденций по видам транспорта (Modal Split).....	122
<b>2.3. Система мониторинга состояния и режимов функционирования дорожно-транспортного комплекса крупных городов.....</b>	<b>128</b>
2.3.1. Анализ объемов транспортного предложения в крупных городах .....	132
<i>Анализ состава парка транспортных средств крупных городов .....</i>	<i>132</i>
<i>Техническое состояние и динамика развития улично- дорожной сети .....</i>	<i>136</i>
2.3.2. Анализ режимов работы улично-дорожной сети города с использованием современных геоинформационных систем.....	138
<i>Анализ общего роста интенсивности дорожного движения на УДС города.....</i>	<i>141</i>
<i>Анализ суточной интенсивности транспортного потока на УДС города.....</i>	<i>142</i>
<i>Структурный анализ транспортного потока .....</i>	<i>146</i>

<i>Недельные колебания интенсивности транспортных потоков ...</i>	147
<i>Анализ скоростных параметров транспортных потоков.....</i>	148
<i>Анализ количества ежедневно эксплуатируемого автотранспорта .....</i>	150
<i>Анализ сезонной динамики изменения параметров движения в выбранных сечениях УДС .....</i>	154
<i>Программа мониторинга состояния и условий движения на улично-дорожной сети городов.....</i>	155
2.3.3. Программа мониторинга состояния и условий движения на улично-дорожной сети городов.....	155
Выводы.....	159

### **Глава 3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ГОРОДОВ.....**

<b>3.1. Теоретико-прикладные основы создания прогнозных транспортных моделей городов.....</b>	161
3.1.1. Мировой опыт создания прогнозных моделей. Современные инструменты моделирования. ....	163
3.1.2. Структурная схема прогнозной транспортной модели ....	169
3.1.3. Основные показатели качества транспортных моделей... ..	175
3.1.4. Калибровка транспортных моделей. ....	175
3.1.5. Оценка качества транспортной модели.....	178
3.1.6. Возможности анализа результатов моделирования.....	181
<b>3.2. Методы оценки качества функционирования действующих транспортных систем городов.....</b>	188
3.2.1. Общие показатели качества функционирования транспортных систем городов .....	189
3.2.2. Методика формализации и оценки транспортного спроса. Транспортная зависимость территории. ....	192
3.2.3. Дифференцированные показатели качества функционирования транспортных систем городов .....	202
3.2.4. Показатели качества транспортного планирования и методы их оценки .....	213
3.2.5. Показатели качества организации дорожного движения в городах и методы их оценки.....	221
3.2.6. Динамический анализ качества транспортных систем.....	227
3.2.7. Пространственный анализ функционирования транспортных систем с учетом энергетических ограничений.....	229
Выводы.....	235

<b>Глава 4. ОПТИМАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ГОРОДА</b> .....	237
<b>4.1. Математические модели в задачах оптимизации</b> .....	237
4.1.1. Транспортные модели различного назначения.....	237
4.1.2. Объект и предмет оптимизации.....	239
4.1.3. Решаемые задачи.....	241
4.1.4. Способ исследования.....	242
<b>4.2. Постановка оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города</b> .....	247
4.2.1. Логико-графическая модель постановки оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города.....	247
4.2.2. Возможные способы формализации задачи формирования эффективной транспортной системы.....	248
<i>Задача распределения транспортного спроса</i> .....	257
<i>Задача распределения транспортного предложения</i> .....	260
<i>Модель оптимального распределения транспортного предложения</i> .....	263
<b>4.3. Построение математической модели оптимизационной задачи</b> .....	264
4.3.1. Задание степеней свободы оптимальной модели. Выбор переменных.....	264
4.3.2. Формирование целевой функции оптимальной модели..	268
4.3.3. Формирование системы ограничений математической модели оптимизационной задачи.....	269
<i>Структурная схема ограничений оптимальной модели</i> .....	269
<i>Ограничение по транспортному спросу</i> .....	274
<i>Ограничение по протяженности существующей УДС</i> .....	279
<i>Ограничение по имеющемуся подвижному составу</i> .....	286
<i>Постановка ограничения по подвижному составу в общем виде</i> .....	289
<i>Особенности построения энергетических ограничений</i> .....	291
<i>Ограничение по загрязнению атмосферного воздуха</i> .....	292
<i>Постановка ограничения по шумовому воздействию</i> .....	300
<i>Ограничения по рискам возникновения ДТП</i> .....	315
4.3.4. Оптимальная модель формирования эффективной транспортной системы города Перми.....	328
<b>4.4. Решение оптимальной модели</b> .....	334
<b>4.5. Анализ решения оптимальной модели</b> .....	336
4.5.1. Оптимальная модель двойственной задачи.....	341
<i>Решение двойственной задачи</i> .....	341

<b>4.6. Решение оптимизационных задач в альтернативной постановке</b> .....	348
Выводы.....	355
<b>Глава 5. ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМОЙ КРУПНОГО ГОРОДА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ОГРАНИЧЕНИЙ</b> .....	360
<b>5.1. Основы теории управления природно-техническими системами</b> .....	360
<b>5.2. Субъективные и объективные проблемы управления. Несоввершенство существующей системы управления</b> .....	365
5.2.1. Объективные проблемы развития транспортных систем городов.....	366
5.2.2. Субъективные проблемы управления развитием транспортных городов.....	365
<i>Несоввершенство системы организации и управления развитием дорожно-транспортного комплекса</i> .....	366
<i>Недостаточная законодательная база в области управления транспортной системой города</i> .....	370
<i>Недостаточная информационная составляющая при принятии управленческих решений</i> .....	374
<i>Недостатки финансирования развития средств организации и управления движением</i> .....	378
<i>Нерешенность имущественных вопросов и вопросов разграничения прав собственности и управления объектами транспортной инфраструктуры</i> .....	378
<i>Негативное влияние человеческого фактора</i> .....	379
5.2.3. Прогноз ситуации.....	380
<b>5.3. Принципы формирования системы государственного и муниципального управления транспортом крупного города</b>	381
<b>5.4. Концепция управления транспортной системой крупного города</b> .....	387
5.4.1. Приоритеты управления транспортной системой крупного города.....	390
<i>Приоритет интересов сообщества людей перед частными интересами</i> .....	391
<i>Приоритет пешеходного движения перед транспортным</i> .....	391
<i>Приоритет общественного транспорта перед индивидуальным</i> .....	391
<i>Приоритет вопросов управления перед вопросами реализации</i> .....	391
<i>Приоритет интенсивных решений перед экстенсивными</i> .....	391
<i>Приоритет качества информации перед технологиями</i> .....	392

5.4.2. Принципы управления транспортной системой крупного города .....	392
5.4.3. Управление развитием дорожно-транспортного комплекса города .....	393
<i>Формирование муниципальных органов власти</i> .....	394
<i>Формирование коллегиальных органов управления</i> .....	397
<i>Участие общественных организаций и их объединений</i> .....	398
5.4.4. Управление развитием системы городского пассажирского транспорта общего пользования .....	399
<i>Двойственность услуги по транспортному обслуживанию населения городским пассажирским транспортом общего пользования</i> .....	399
<i>Принципы управления системой городского пассажирского транспорта общего пользования</i> .....	403
<i>Инструменты управления и регулирования</i> .....	404
<i>Требования к качеству предоставления услуг по транспортному обслуживанию населения городским пассажирским транспортом общего пользования</i> .....	415
<i>Система правоустанавливающих и нормативных документов в сфере организации транспортного обслуживания населения городским пассажирским транспортом общего пользования</i> ..	417
<b>5.5. Стратегия управления транспортной системой крупного города</b> .....	<b>420</b>
5.5.1. Стратегия выработки управленческих решений в области развития и текущей эксплуатации транспортной системы .	421
<i>Методика определения и назначения типов участков улично-дорожной сети</i> .....	423
5.5.2. Стратегия выбора и принятия управленческих решений в области развития и текущей эксплуатации транспортной системы .....	425
<i>Основные принципы стратегии выбора</i> .....	425
<i>Методика обоснования выбора</i> .....	426
5.5.3 Возможные негативные последствия ошибок в управлении развитием городских транспортных систем городов .....	428
Выводы .....	432
Заключение .....	436
Список литературы .....	438



## Предисловие

Процесс урбанизации стремительно развивается в большинстве государств мира и усугубляет проблемы нехватки энергии, земельных и других природных ресурсов, загрязнения окружающей среды на локальных территориях. Города должны развиваться таким образом, чтобы минимизировать отходы во всех их формах, а также способствовать сохранению биоразнообразия и экосистем, обеспечить людей основными элементами благосостояния, эффективными в плане ресурсов и энергии.

В фокусе урбанистической революции, свидетелями которой мы являемся, оказался пересмотр понятий дизайна, городского и транспортного планирования<sup>1</sup>. Развитию транспорта в этом процессе отводилась особая роль, так как транспортная система во многом формирует стиль жизни и передвижения людей в условиях агломерации, площадь территории которой составляет десятки тысяч гектаров. Городской транспорт должен, с одной стороны, создавать новые транспортные возможности по доступности, скорости, уровню комфорта и безопасности, но с другой – снижать спрос (мобильность) людей на перемещение личным автотранспортом в пользу общественного, а также велосипедного и пешеходного движения.

Разработка и принятие интегрированных решений по рациональному и безопасному использованию различных видов городского транспорта и их взаимодействию для удовлетворения разнообразных транспортных потребностей населения в реальном времени, то есть управление этой сложной природно-технической системой, не может быть эффективным, если ориентироваться только на образы, жизненный или профессиональный опыт лиц, принимающих решения, зарубежный опыт, мнение населения и упрощенные технологии.

Необходимо вводить показатели эффективности функционирования городских транспортных систем, осуществлять их количествен-

---

<sup>1</sup> Vision 2050. The new agenda for business. World Business Council for Sustainable Development. 2010. February // [www.wbcsd.org](http://www.wbcsd.org).

ную оценку, решать оптимизационные задачи, вводя сотни и тысячи взаимосвязанных переменных в условиях разного рода ограничений (пространственных, временных, экологических).

На основании решения оптимизационных задач следует разработать алгоритмы управления транспортным спросом и формирования адекватных уровню развития автомобилизации моделей транспортного поведения населения.

В крупных российских городах нужно переходить от «афро-азиатской» модели транспортного поведения, характерной для уровня автомобилизации 100–150 авт./1000 жителей – «еду куда хочу, когда хочу, на чем хочу» (на старых экологически опасных транспортных средствах), к современной модели поведения, характерной для уровня автомобилизации 400–500 и более авт./1000 жителей, предусматривающей наличие ограничений на моторизованное передвижение, то есть реализацию различных мер по сдерживанию мобильности населения, совершенствованию информационных технологий.

В их числе: опережающее развитие общественного транспорта, прежде всего скоростных его видов, пересадочных узлов, выделенные полосы для наземного общественного транспорта, организация парковочного пространства в центральной части города на новых принципах, запрет на въезд на определенные городские территории автомобилей с учетом их экологического класса, развитие велосипедного движения и обустройство пешеходных улиц, интеллектуальные системы контроля и организации дорожного движения.

Обоснование этих и других социально чувствительных мер по сдерживанию мобильности населения должно осуществляться не по наитию, методом проб и ошибок, а на основании результатов имитационного моделирования, включающего моделирование в реальном времени не только транспортных потоков (ТП) на улично-дорожной сети крупного города, но и пешеходных потоков в пересадочных узлах, на пешеходных улицах и тротуарах, велотранспортных потоков на общей и выделенной сети как взаимосвязанных элементов транспортной системы города.

Разработанные и приведенные в данной монографии показатели оценки эффективности транспортной системы крупного города, методы и результаты их количественной оценки, постановка и решение оптимизационных транспортных задач с использованием современных пакетов прикладных программ и методов визуализации, по мнению авторов, должны стать интеллектуальными кирпичиками, заложенными в основу нового научного направления по транспортному планированию городов на принципах их устойчивого развития и повышения качества жизни людей.

Те, кто написал эту книгу, надеются, что использование разработанного и приведенного в монографии инструментария в практике

транспортного планирования позволит минимизировать издержки при формировании эффективных и безопасных транспортных систем крупных российских городов, и будут признательны за отзывы, пожелания в отношении содержания книги, которые следует направлять по адресу электронной почты: [auto@perm.ru](mailto:auto@perm.ru).

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра дорожной информации Галине Николаевне Быданцевой и Юрию Александровичу Попову за помощь в подготовке этого издания.

## Введение

Почти 3/4 населения России живет в городах, и это число, судя по тенденциям мирового развития, в обозримой перспективе будет только возрастать. Поэтому устойчивое развитие городов – задача не менее важная, чем устойчивое развитие отдельных регионов или иных административных образований.

Транспорт является неотъемлемым атрибутом городской среды, связующим элементом отдельных городских территорий и во многом определяет качество среды обитания. Его развитие не следует подавлять, но и он не должен доминировать над функциями города как места проживания, над его культурным, социальным, производственным и торговым измерением. Не существует одного вида пассажирского транспорта, способного удовлетворить разнообразные потребности города. Система должна состоять из взаимодополняющих компонентов, включая индивидуальные способы передвижения (пешком, на велосипеде, автомобиле), массовый общественный транспорт (метро, трамвай, троллейбус, автобус) и такси.

Транспортное перемещение – единственная ежедневная фаза в жизни каждого человека, имеющая общие принципы социального взаимодействия в обществе при удовлетворении транспортных потребностей и недифференцированность потребления ресурсов в ходе этого процесса. Такое положение можно объяснить в первую очередь спецификой действующих технических систем по реализации транспортных потребностей людей в городах, которые функционируют на ограниченных площадях общественной территории. Этот ограниченный природный ресурс в крупных городах с высокой плотностью населения и уровнем автомобилизации наиболее интенсивно используется для удовлетворения транспортных потребностей людей и экономики всеми видами транспорта.

В час пик горожанину на автомобиле требуется для движения в 30 раз больше территории, чем пассажиру автобуса, и в 40 раз больше, чем пассажиру рельсового транспорта. Для него площадь парковочного

места на 20% больше площади его рабочего места. Эти территориальные потребности вызывают развитие городов по дисперсной модели и неудобны для пешеходов, что приводит к приватизации городского пространства, в котором исчезают места общественного доступа и возможности для социальных взаимодействий<sup>1</sup>.

Чем больше в городе используется общественный транспорт и пешеходное движение, тем больше по сравнению с пригородами он выигрывает в вариативности, удобстве и суммарных затратах на передвижения. Чем в большую зависимость от автомобилей попадает город и чем дальше он пренебрегает альтернативными способами передвижения, тем выше вероятность упадка его центральных районов (экология, стрессы, преступность). Отсюда перемещение населения в пригороды, транспортные потребности которых обеспечиваются легковым автомобилем. Расползание пригородов ведет к появлению плохо спланированных территорий, росту расходов на транспортную и инженерную инфраструктуру (дороги, водоснабжение, канализация, тепло, энергоресурсы), потребление земельных и других ресурсов, социальное расслоение общества.

Таким образом, под влиянием транспортной деятельности меняется окружающая людей природная и социальная среда, которая определяет их качество жизни в городах.

При анализе эффективности функционирования транспортных систем городов первоочередной интерес вызывают технологии и алгоритмы оценки территории городов с точки зрения их возможности удовлетворять имеющийся транспортный спрос. Именно территориальные (в широком понимании этого термина) ограничения определяют возможности развития территории и в конечном итоге качество жизни на ней.

Транспортное движение на городских улицах, как ничто другое, иллюстрирует тот факт, что потребности в моторизованном движении никогда не могут быть удовлетворены полностью. Увеличение транспортного предложения на отдельной территории, особенно в центре крупного города, приводит к отрицательным эффектам – увеличивается как затратная часть расходуемого под реализацию транспортного спроса ресурса, так и косвенный эффект от увеличения транспортного предложения, связанный прежде всего с негативным воздействием на окружающую среду.

Сообщества, живущие в городах с ярко выраженными постиндустриальными тенденциями, уже не способны содержать огромную общественную инфраструктуру, создававшуюся ранее в угоду развитию экономически сильных градообразующих производств. Российские

---

<sup>1</sup> См.: *Вушик В.Р.* Транспорт в городах, удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина; под науч. ред. М. Блинкина. – М., 2011. Сер. «Университетская библиотека Александра Погорельского».

города индустриального Севера, Дальнего Востока и Сибири также вошли в эту фазу своего развития. Примером этому может служить и город Пермь.

Накапливающийся дисбаланс потребностей и возможностей городского сообщества в обустройстве среды обитания определяет на сегодня основные направления градостроительной политики крупных постиндустриальных городов. В последние десятилетия жителей современного крупного города все больше стали волновать две взаимоисключающие проблемы:

- 1) обеспечение личного пространства;
- 2) быстрая и мобильная жизнь в экономике.

Эти проблемы успешно решает личный автомобиль. При сохранении свободы выбора в перемещении, личного пространства и комфорта он обеспечивает максимальную мобильность и скорость реализации объективно обусловленных транспортных потребностей горожанина.

Индивидуальный транспорт, призванный быть эффективным средством улучшения качества жизни, превратился в свою полную противоположность и стал одной из основных причин, вызывающих глобальный кризис устойчивого функционирования городской среды. Серьезные финансовые вливания в развитие сети улиц и дорог не дают положительного эффекта.

Дилемма, которая стоит перед городским сообществом, состоит в том, что, с одной стороны, необходимо сдерживать использование автомобилей в ограниченном пространстве центров городов, а с другой – стимулировать максимальное использование автомобилей с целью достижения максимальной мобильности населения на территориях, где это возможно. Представляется, что сбалансированное городское развитие с высоким уровнем качества жизни граждан может быть достигнуто только при наличии интегрированной мультимодальной транспортной системы, в которой каждый вид транспорта действует в своей нише наиболее эффективного функционирования при координированном использовании всех его видов<sup>2</sup>.

Стоит отметить, что многие российские города столкнулись с потерей населения. Это основной фактор, определяющий вектор дальнейшего существования территории как города. Интенсивное и эффективное использование имеющихся городских ресурсов приобретает для таких городов гораздо большее значение, чем для зарубежных стран и их городов с растущей численностью населения.

Идея эффективного использования ресурсов, в первую очередь территориальных, выраженная в термине «компактный город», восходит к нынешнему состоянию нашей планеты, которое требует от нас более бережного отношения к ресурсам. Экологическая ответственность сегодня – необходимое условие жизни человека на Земле.

<sup>2</sup> См.: Вучик В.Р. Указ. соч.

Из-за сложности процессов функционирования транспортных систем крупных городов до настоящего времени преобладают качественные (экспертные) оценки изменения их эффективности при реализации тех или иных мероприятий. Отсутствие системы координат, ограничений, показателей (критериев) оценки эффективности функционирования транспортных систем городов, учитывающих их мультимодальность, объясняется отсутствием адекватных методов количественной оценки спроса на услуги транспорта.

При наличии модели транспортного спроса станет возможным проведение исследований по сопоставлению (эффекту) затрат на функционирование транспортной системы, потребностей общества, а также степени их удовлетворения.

Можно выделить несколько научных задач, каждая из которых является необходимым звеном в построении общей методики количественной оценки эффективности мультимодальной транспортной системы крупного города:

- 1) формирование подходов к анализу функционирования городских транспортных систем;
- 2) методы транспортного анализа городской территории. Мониторинг транспортной системы;
- 3) построение прогнозных транспортных моделей городов. Анализ эффективности функционирования городских транспортных систем;
- 4) построение оптимальных моделей формирования эффективных транспортных систем городов, их решение и анализ;
- 5) разработка принципов управления транспортной системой города в условиях действующих ограничений.

Каждая из этих научных задач отчасти основывается на уже известных научных подходах, применение которым найдено в решении локальных задач в области транспортного планирования, организации движения и в развитии транспортных систем городов в целом. Но в совокупности они составляют единый методологический подход к целенаправленному формированию эффективной транспортной системы крупного города. Рассмотрим их более подробно.

# Глава 1

## ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ В ГОРОДАХ

### 1.1. Термины и определения

С развитием городов, ростом уровня автомобилизации, совершенствованием транспортной техники и технологий усложняется структура транспортных систем. Значительно расширился круг понятий, терминов и определений компонентов, составляющих транспортную систему.

Дадим определения основных терминов.

*Транспортная система* предназначена для удовлетворения транспортных потребностей человека и включает в себя средства транспортировки, объекты транспортировки, а также окружающую среду.

Транспортная система города включает в себя следующие компоненты (составные части):

- дорожно-транспортный комплекс;
- участники дорожного движения;
- окружающая среда.

*Дорожно-транспортный комплекс* города включает в себя:

- улично-дорожную сеть (УДС);
- транспортные средства.

*Средства транспортировки* – подвижные и неподвижные объекты, объединенные в технические системы по видам транспорта (системы транспорта).

*Объекты транспортировки* – люди, грузы, оборудование, информация.

*Технические системы* – совокупности искусственно созданных, упорядоченно взаимодействующих элементов, обладающие индивидуальными свойствами и предназначенные для выполнения определенных функций.

*Системы транспорта (виды транспорта)* – совокупности средств транспортировки, объединенные в технические системы, позволяю-



щие решать задачи транспорта в определенных эксплуатационных параметрах.

*Транспортная инфраструктура* – совокупность средств транспортировки, обеспечивающих функционирование систем транспорта и не потребляющих энергию в процессе транспортировки.

Транспортная инфраструктура – это средства производства в понимании транспортной системы как отрасли производства. Средства производства, которые непосредственно не потребляются и не потребляют и служат поддержкой функциям эксплуатирующих их обществ. Под транспортной инфраструктурой обычно понимают неподвижные составляющие средств транспортировки.

*Пути транспортировки* – неподвижные элементы транспортной инфраструктуры, предназначенные для осуществления по ним транспортных связей.

*Транспортная связь* – наличие возможности для перемещения людей, грузов и информации из одного места в другое.

*Транспортные средства* – совокупность средств транспортировки, выполняющих транспортную работу и потребляющих при этом энергию.

*Транспорт* – совокупность технических систем, предназначенных для перемещения людей, грузов и информации из одного места в другое.

В процессе формализации составных элементов и процессов, происходящих при функционировании транспортных систем, удобно использовать понятия «транспортный спрос» и «транспортное предложение». Они формализуют транспортные взаимодействия на конкретной ограниченной территории, например на территории города.

*Транспортный спрос* – устойчивый объем совершаемых транспортных перемещений, сложившийся в результате социально-экономических процессов, проходящих на отдельной территории.

Транспортный спрос учитывает транспортные потребности общества, даже если они удовлетворены частично или не удовлетворены совсем. Подобно транспортному предложению, транспортный спрос выражается в терминах, характеризующих число людей, объем или массу груза в единицу времени и места.

*Транспортное предложение* – совокупность имеющихся на отдельной территории средств транспортировки.

Транспортное предложение может быть формализовано как провозная способность транспортной инфраструктуры и систем транспорта, как правило, для географически определенной транспортной системы или отдельной территории. В частности, в городах транспортный спрос определяется показателями транспортной подвижности населения (средней, часовой, километровой), а транспортное предложение – это набор имеющихся в распоряжении городского сообщества средств транспортировки.

Рассматривая принципы функционирования транспортных систем на урбанизированных территориях, нужно существенным образом конкретизировать состав городской транспортной системы.

Термин «средства транспортировки» в данном случае – более широкое понятие, чем «транспортные средства», под которыми обычно подразумеваются только подвижные объекты, представляющие собой ту или иную техническую систему по видам транспорта. Средства транспорта включают в себя все составляющие технических систем функционирования отдельных видов транспорта, без которых нормальное функционирование каждой из них невозможно. Нельзя четко разграничить объекты, объединенные понятием «средства транспорта», для каждой системы (вида) транспорта этот набор уникален. Можно выделить только типичные составляющие: транспортные средства, пути сообщения, объекты обслуживания, транспортные узлы и т.п. Для каждого вида транспорта существует свой набор элементов, определяющий принцип функционирования технической системы.

Все средства транспорта можно сгруппировать на две большие группы, объединенные в технические системы по транспортировке *материальных* объектов (людей, грузов) и технические системы по транспортировке *нематериальных* объектов (информации, сигналов). Технические системы по транспортировке информации и сигналов чаще называют *системами связи*.

Более привычными для традиционного понимания представляют технические системы транспортировки материальных объектов – пассажиров, грузов, а также технологического оборудования. Исключение составляет лишь авиационный и трубопроводный транспорт. У авиационного транспорта отсутствуют отдельные объекты, которые можно отнести к путям транспортировки, у трубопроводного транспорта, наоборот, отсутствуют подвижные объекты в системе, а перемещение осуществляется путем физической трансформации самого объекта перемещения (газа либо жидкости).

Технические системы различных видов транспорта взаимодействуют с природной системой, а также друг с другом, образуя при этом транспортную систему.

Важным представляется смысловое и терминологическое разделение объектов и субъектов управления. Удобно оперировать терминами «транспортная система» и входящими в нее «дорожно-транспортный комплекс», «участники дорожного движения», «окружающая среда». При этом связь (взаимодействие) этих составляющих можно видеть в терминах «транспортный спрос» и «транспортное предложение» как результат удовлетворения одного другим.

В связи с изложенным объекты транспортировки (участники дорожного движения) не являются объектами управления. Методом исключения довольно легко определить, что управленческие воз-

действия могут быть направлены исключительно на средства транспортировки (в городах на дорожно-транспортный комплекс). И если вынести за скобки вопросы градостроительства, то все воздействия на работу транспортной системы должны находиться в области совершенствования транспортного предложения.

*Устойчивость транспортной системы* – способность транспортной системы удовлетворять транспортные потребности человека в настоящем, не лишая при этом будущие поколения возможности удовлетворять их транспортные потребности.

*Провозная способность автомобильной дороги, улицы или иной транспортной связи* – максимальная масса грузов или количество пассажиров, которое возможно провезти через сечение автомобильной дороги, улицы или иной транспортной связи в единицу времени.

*Провозная способность системы транспорта* – максимальная масса грузов или количество пассажиров, которое возможно провезти через сечение автомобильной дороги, улицы или иной транспортной связи по одной полосе движения в единицу времени при помощи определенной системы транспорта.

*Транспортная зависимость территории* – это объем перемещения пассажиров (грузов) по данной территории (чел-км) в течение определенного промежутка времени при идеальном удовлетворении существующего транспортного спроса.

*Транспортная корреспонденция* – устойчиво реализуемое при помощи транспорта перемещение человека (единицы груза) из одного места в другое.

*Транспортная доступность* – мера способности территории быть достигнутой или достигать другие территории при помощи транспорта.

*Транспортные издержки* – денежно-кредитная мера того, сколько должен заплатить транспортный потребитель, чтобы реализовать транспортную потребность. Затраты могут быть фиксированными (на создание инфраструктуры) и переменными (операционными). Они зависят от множества условий, связанных с географией, наличием и качеством инфраструктуры, законодательными и налоговыми ограничениями, способом транспортировки.

*Эффективность* – результативность процесса, операции, проекта, определяемая как отношение эффекта, результата к затратам, обусловившим его получение [1].

*Эффективность транспортной системы* – это отношение полезных конечных результатов ее функционирования к затраченным ресурсам.

## **1.2. Современные подходы к транспортному планированию и организации дорожного движения в городах**

### **1.2.1. Планирование развития транспорта в крупных городах**

В Российской Федерации заканчивается процесс подготовки документов территориального планирования. К концу 2012 г. на всей территории страны должны быть документы территориального планирования: у субъектов Федерации и отдельных муниципальных образований – схемы территориального планирования, в городах – генеральные планы. Основа разработки транспортных стратегий городов – это положения, записанные в Градостроительном и Земельном кодексах Российской Федерации [2, 3].

Сложившийся в постсоветское время подход к разработке важнейших документов, регламентирующих общие принципы и направления развития города, не предполагает определения механизмов их реализации и контроля за исполнением. Этот аспект может быть отнесен к наследованию традиций плановой экономики, не рассматривавшей вопросы экономики хозяйствующих субъектов и даже муниципальной экономики, вовлеченной в генеральные планы развития города.

Не имея среднесрочных программ развития, в отсутствие системы мониторинга и контроля исполнения положений генерального плана, органы муниципальной власти города ежедневно сталкиваются с серьезными трудностями в попытках принятия таких управленческих решений, которые, с одной стороны, решали бы ряд первостепенных задач, а с другой – не противоречили общей линии генерального плана города.

Все это вместе с нерешенностью вопросов разграничения полномочий внутри администраций городов в области управления развитием дорожно-транспортного комплекса приводит к тому, что изменяется само отношение специалистов на местах в городской администрации к генеральному плану как к руководящему документу. Все чаще ставятся под сомнение основные его положения, принимаются тактические решения, идущие вразрез, а порой и прямо противоречащие его положениям. В результате генеральный план города превращается из руководящего документа в документ, который, по мнению многих специалистов городской администрации, даже мешает им в повседневной работе [4].

Наряду с изложенными выше субъективными причинами, мешающими процессу нормального функционирования процесса планирования и развития города, следует указать на ряд объективных моментов, которые также вносят свой негативный вклад в процесс реализации положений генерального плана:

– существующие темпы автомобилизации превышают прогнозные, принятые в обоснование генеральных планов многих российских городов;

– существующие темпы реализации положений генеральных планов в части развития улично-дорожной сети существенно отстали от заложенных в них параметров.

С учетом того, что существующие генеральные планы не предусматривают альтернативы в части развития улично-дорожной сети, кроме выполнения программ их реализации, уже сейчас требуются разработка и принятие среднесрочных программ по развитию улично-дорожной сети. Разработка таких программ, особенно имеющих объективно вынужденные расхождения с положениями действующих генеральных планов, требует основательного пересмотра сложившейся системы транспортного планирования, серьезных финансовых затрат и времени. Подобные трудности вызваны в первую очередь тем, что технологии, временные рамки и расчетные показатели программ развития будут существенно отличаться от тех, что заложены в генеральных планах.

Отсутствие в настоящее время таких программ и планов перекладывает задачи среднесрочного планирования развития улично-дорожной сети в плоскость оперативного управления процессом принятия решений, основанного либо на коллегиальном принципе, либо на принципе единоначалия. Оба эти принципа формирования транспортной политики размывают ответственность за конечный результат или имеют большую вероятность принятия ошибочных решений, в перспективе еще больше усугубляющих положение в дорожно-транспортном комплексе города.

В итоге складывается ситуация, когда, имея в распоряжении полный набор разработанных документов территориального планирования регионального и местного уровня в области развития дорожно-транспортного комплекса, муниципалитеты крупных городов оказываются не в состоянии системно осуществлять процесс транспортного планирования и развития своих транспортных систем [4].

Повсеместно наблюдаются расхождения реальной ситуации развития городов с теми планами и программами, которые составлялись на основе разработанных ранее генеральных планов [5]. Особенно заметно это стало с развитием дорожно-транспортного комплекса города. Традиционное объяснение этому в обществе находилось в плоскости управления городским хозяйством, проще говоря, чиновникам администраций городов ставилась в вину неспособность придерживаться положений генерального плана.

Однако причины этого следует искать, в первую очередь, именно в самих генеральных планах городов. Мерой оценки их качества с помощью терминов «хороший» и «плохой» должны быть результаты их

реализации. Хороший генеральный план реализуется естественным образом. Он должен повторять не только архитектурные традиции города, его историческое предназначение, но и следовать объективно наблюдаемым тенденциям в жизни и укладе современного города, его территории, населении, изменяющейся структуре экономики.

Вместо этого, за немногим исключением, в практике генерального планирования основным вектором является развитие городской территории за счет освоения новых территорий, а иногда и расширения границ городов. Эта идеология экстенсивного развития становится базовым противоречием процессов планирования и практической реализации положений генерального плана в крупных современных российских городах.

Причина возникновения подобных противоречий – прежде всего отсутствие на сегодняшний день четкого понимания необходимости и достаточности функционирования транспортных систем городов, а также связи этого функционирования с конечными показателями качества жизни в крупных городах.

### 1.2.2. Возможности и ограничения развития транспортных систем

Города, имеющие резко выраженные постиндустриальные тенденции, уже не могут содержать громоздкую общественную инфраструктуру, которая была создана в целях развития экономически сильных градообразующих производств. К ним можно отнести российские города индустриального Севера, Дальнего Востока и Сибири, в том числе Пермь.

На рис. 1.1 и 1.2 в качестве примера представлены график изменения численности населения Перми и график изменения затрат

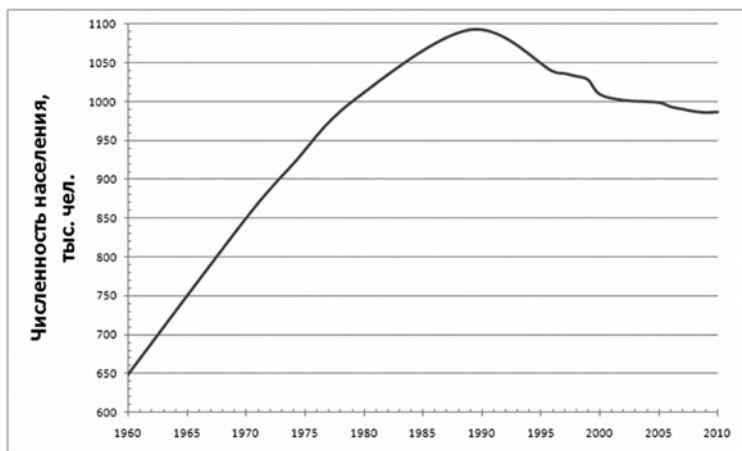
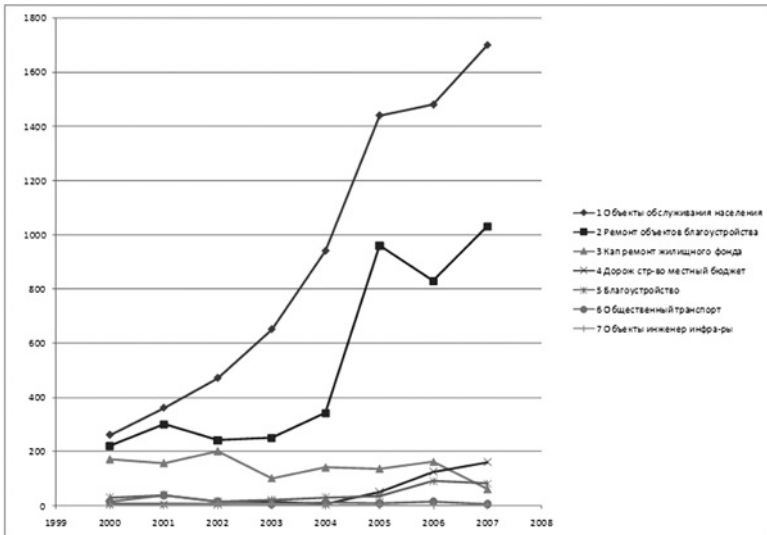


Рис. 1.1. График изменения численности жителей города Перми



**Рис. 1.2.** График объемов текущих и капитальных затрат бюджета г. Перми на объекты инженерной инфраструктуры

бюджета города на содержание объектов общественной инфраструктуры.

Нетрудно заметить, что за последние десять лет образовалась стойкая тенденция – затраты бюджета растут, а численность населения падает. Это показывает самый первый и поверхностный анализ структуры трат бюджета муниципального образования и потенциала его формирования. При более детальном изучении с применением большего объема статистической информации картина окажется еще более противоречивой (с учетом, например, анализа баланса трудоспособного населения (налогоплательщиков) и общей численности населения города или анализа процентного распределения бюджета города на инвестиции в капитальное строительство и содержание). Очевидно, что наблюдаемая тенденция не может сохраняться долго. Нужно либо добиваться прироста населения в городе, либо сокращать бюджетные траты на содержание городской инфраструктуры [6, 7].

Накапливающийся дисбаланс потребностей и возможностей городского сообщества в обустройстве среды обитания определяет *основные направления градостроительной политики* крупных постиндустриальных городов.

Наряду с сокращением собираемой доходной части бюджета можно наблюдать существенный рост текущих затрат на содержание городского хозяйства и инфраструктуры в отношении на каждый бюджетный рубль и каждого налогоплательщика. Принятие того факта,

Таблица 1.1

**Параметры бюджетной обеспеченности некоторых городов  
в сравнении с г. Пермь**

Город	Показатели	
	Население, чел.	Бюджетная обеспеченность, евро на 1 жит.
Барселона	1 593 075	1477
Дуйсбург	504 000	4212
Москва	11 551 930	2191
Санкт-Петербург	4 869 600	1444
Екатеринбург	1 353 157	317
Нижний Новгород	1 255 159	241
Пермь	991 500	345
Владивосток	616 884	277

что население уменьшается, может стать уникальным шансом для городов, чтобы улучшить свою среду, перестав при этом бороться с оттоком населения.

Несмотря на то что Пермь достигла самых высоких показателей произведенной продукции и услуг в пересчете на одного жителя среди всех городов – региональных столиц России, все публичные высказывания и ощущения людей, проживающих в городе, носят депрессивный характер. Городские территории заняты низкоплотной или разрозненной застройкой. Плотность населения ниже уровня экономической эффективности использования городской инфраструктуры. Отсутствует качественное благоустройство города, наблюдается определенное несоответствие площади территорий возможностям их содержания.

Бюджеты местного самоуправления при высоких обязательствах и ответственности в разы ниже бюджетов аналогичных городов в странах с рыночной экономикой, а также Москвы и Петербурга (табл. 1.1).

Основная идея нового подхода в планировании городов имеет экономические корни и заключается в концепции соответствия объемов общественной инфраструктуры находящимся в распоряжении сообщества средствам на ее содержание. Это реальный путь к тому, чтобы сделать город лучше, не надеясь на чудо прихода в город новых промышленных гигантов-налогоплательщиков или на то, что резко увеличится рождаемость.

Кроме того, экстенсивное развитие промышленности и производства не приводит к автоматическому улучшению городской среды, а наоборот, усугубляет проблемы, связанные с экологией, низкой заработной платой, неэффективным использованием территории.



Отношение к теме развития города в самых широких рамках хорошо иллюстрирует статистика ответов горожан на простой вопрос: «В интересах ли жителей города (например, Перми) увеличение количества его жителей?». Жители Перми ответили неоднозначно: на 50 положительных ответов было 50 отрицательных.

Но, например, жители города Москвы отвечали на этот вопрос отрицательно более чем в 95% случаев, а 80% жителей города Березники (Пермский край) – положительно. Этот факт иллюстрирует различное понимание жителями разных городов того, что есть общественные блага, за что они платят весомую часть поступающих в муниципальные бюджеты налогов. И независимо от того, как складывается статистика ответов на этот вопрос, и те и другие чувствуют себя одинаково несчастными в том случае, если их понимание вклада в общественное имущество не находит отражения в документах территориального планирования и генеральных планах городов.

Основная идея в области развития городской инфраструктуры – это отказ от ее наращивания. Экономическая эффективность городской системы определяется выбором интенсивного (в противовес экстенсивному) пути использования совокупного общественного блага – территорий, имущества и городского бюджета с целью удовлетворения потребностей жителей, в частности потребности в перемещениях.

В последнее время жителей мегаполиса волнуют две взаимоисключающие проблемы, сводящиеся к тому, как обеспечить: 1) личное пространство; 2) быструю и мобильную жизнь в экономике. Решить их можно с помощью личного автомобиля, который, сохраняя свободу выбора в перемещении, личное пространство и комфорт, обеспечивает максимальную мобильность и скорость реализации объективно обусловленных транспортных потребностей горожанина.

Горожане совместно используют (как и воздух, воду, инженерные коммуникации) еще один общий ресурс – пропускную способность улично-дорожной сети города. Ни одному городу в мире не удалось полностью удовлетворить спрос на транспортные перемещения горожан на личных легковых автомобилях. Труднее всего это сделать в городах, чей возраст больше возраста первого на земле автомобиля.

Изменились люди. Выросло благосостояние горожан. Мечта многих – автомобиль для большинства горожан не является мечтой. Повторяя путь всех развитых стран и городов мира, российские города вступили в полосу взрывной автомобилизации. Автомобиль правит городом. Индивидуальный автомобиль – это комфорт, скорость, независимость, престиж и статус для его владельца и, видимо, много чего еще. Но, кроме того, одна из основных причин глобального кризиса нормального функционирования городской среды, выражающегося в росте транспортных издержек и транспортной составляющей в стои-

мости товаров и услуг. Финансы, выделяемые на развитие сети улиц и дорог, положительных результатов не дают.

Прогнозы сохранения высоких темпов автомобилизации и ограниченности бюджетных возможностей говорят о том, что подобные меры не могут обеспечить устойчивый и долговременный положительный эффект, поэтому необходимо применение целого комплекса мер, доказавших свою результативность в других странах, которые пережили аналогичный критический период автомобилизации раньше России. В противном случае дорожно-транспортная ситуация в городе будет ухудшаться с каждым годом, что неминуемо приведет к замедлению темпов социально-экономического развития, потере его инвестиционной привлекательности и ухудшению условий проживания [7].

Основным и наиболее тревожным симптомом подобного развития ситуации с дорожным движением в городе является снижение общей эффективности использования транспорта – как общественного, так и индивидуального. Уменьшается доля общественного транспорта в перевозках. Величина среднего количества людей, включая водителя, в легковом транспортном средстве (автомобиле) в 2001 г. в Перми составляла 1,845 человека, в 2006 г. – 1,45 человека.

Из-за увеличения парка автотранспортных средств, снижения средней скорости движения транспортных потоков и увеличения задержек наблюдается рост количества одновременно движущихся автомобилей: в июне 2006 г. в дневной межпиковый период одновременно двигались по дорожной сети 16,7 тыс. ед. (около 7,7% парка зарегистрированных в городе автомобилей), в 2001 г. этот показатель был на 40% ниже. Автомобильный транспорт с каждым годом все сильнее оказывает негативное влияние на окружающую среду. Эта нагрузка растет даже быстрее, чем городской парк транспортных средств, который за сутки потребляет более 600 т топлива, выбрасывает 10 тыс. т отработавших газов [7].

Объективными причинами негативного развития ситуации с дорожным движением следует признать:

- рост уровня автомобилизации населения;
- увеличение интенсивности использования индивидуального транспорта;
- снижение доли общественного транспорта в пассажирских перевозках;
- увеличение потребности жителей города в перемещениях;
- диспропорцию между уровнем автомобилизации и темпами дорожного строительства;
- ряд объективных градостроительно-планировочных проблем развития городской территории, доставшихся нам от предыдущих периодов.

Следует более детально анализировать исторические пути развития различных городов, чтобы найти ответ на вопрос: когда транспортные системы городов переходят в стадию автономного существования? Иными словами, когда настает тот этап в жизни города, когда именно внутренние потребности его жителей становятся приоритетными по сравнению с транзитным транспортным сообщением по его территории? Именно с этого момента город и может называться городом.

### 1.2.3. Принципы планирования городов и транспортной инфраструктуры

В своей основе принципы планирования городов восходят к национальным основам общежития, которые, в свою очередь, в силу традиций, географических условий развития нации, ее культуры и даже религии определяются балансом взаимоотношений между индивидами общества в отношении внутреннего или внешнего проявления этих взаимоотношений.

Понятие локуса контроля (Locus Control) в его современном понимании было введено американским психологом *Джулианом Роттером* в 60-е гг. прошлого века. При этом предполагалось, что существует континуум, крайними точками которого являются индивиды с ярко выраженными внешними или внутренними стратегиями атрибуции. Остальные люди занимают промежуточные позиции между этими крайностями [8].

Локус контроля (лат. locus – место, местоположение и франц. controle – проверка) обозначает качество, характеризующее склонность человека приписывать ответственность за результаты своей деятельности внешним силам (экстернальный, внешний локус контроля) либо собственным способностям и усилиям (интернальный, внутренний локус контроля). В отношении групп людей эти качества могут давать некую характеристику целой нации, крайними положениями в поведенческой оценке целых народов также можно определить интернальный и экстернальный тип поведения [8].

В мире лишь на одном континенте – в Евразии проживают существенно отличающиеся народы Европы и Азии, культуры которых довольно четко иллюстрируют различия в общежитии этих народов. Европейская культура – экстернальная. Как в отношении отдельного индивида, так и во взаимоотношениях людей в группах этот признак хорошо прослеживается. Азиатская культура – интернальная. Интернальность поведения не только отражается в традиционных религиях, укладе жизни и поведении, но и накладывает свой отпечаток на планирование городов.

Экстернальные европейские города обращают всю свою привлекательность и красоту во внешний мир. Европейская архитектура есть

яркое тому подтверждение. Интернальные города Азии отчасти похожи на женщину в парандже, за которой скрыто все самое красивое и ценное, чем гордится сама женщина, чем гордятся города. Многоуровневые развязки, транспортные коммуникации, поднятые над землей, напоминают эту паранджу.

Европейский город трудно представить в подобном виде. И это не является следствием того, что выдающаяся архитектура европейских городов не позволяет обществу развивать транспортные системы в ущерб этой красоте. Их уникальная по красоте архитектура и стремление убрать под землю возможно большее количество транспортных и инженерных коммуникаций есть иллюстрация европейской интернальности.

Россия как государство, занимающее значительную часть Евразийского континента, многонациональность населения которой нивелирует видимые отличия интернального либо экстернального планирования городов, вынуждена искать в этом плане собственный путь.

История развития транспортных систем многих городов началась с неизменного перекрестка двух дорог. Затем на этом перекрестке становилось тесно, и появлялись параллельные пути и новые перекрестки. В мире существует большое количество городов, транспортная сеть которых представляет собой крест. Генеральные планы подобных городов, как и Перми, неизменно шли по пути развития этого креста. Примерно так можно трактовать назначение городской магистрали непрерывного движения и пересекающей ее улицы, являющейся частью прямой дороги, связывающей Москву и Екатеринбург. Таких городов много.

Казалось бы, надо расширять дороги, увеличивать пропускную способность этих основных магистралей. Но насколько? Где предел этого расширения? Сколько нужно полос движения – 4 или 24? Как будет чувствовать себя общественный транспорт на такой дороге, пешеходы и вообще все люди, проживающие в таком городе?

Процесс расширения основных городских магистралей хорошо иллюстрирован историей с Ленинградским проспектом в Москве. Теперь ежедневно можно видеть те же пробки и затруднения в движении. В чем выигрыш увеличения количества полос движения с 8 до 18? Не стало альтернативы. Если раньше можно было сесть на трамвай и проехать по середине этой автомагистрали, то теперь такой возможности уже нет.

Гигантское дорожное строительство порождает гигантские автомобильные заторы. Ни одному городу мира не удалось решить свои транспортные проблемы простыми экстенсивными методами по увеличению транспортного предложения. Спрос всегда будет впереди.

Кроме того, до бесконечности увеличивать пропускную способность опорной сети нельзя из-за различных ограничений. У города

есть прошлое – его история, архитектура, памятники. У города есть настоящее – пробки и ухудшение качества жизни в результате необдуманной эксплуатации автомобиля, изначально призванного как раз это качество жизни повысить. У города есть будущее. Может быть, совсем без автомобиля.

Понятно, что нельзя решать сиюминутные проблемы снижения транспортных издержек, не думая о прошлом и будущем, но способность мыслить категориями будущих поколений – редкий дар.

На примере города Перми можно заметить, что результаты мониторинга загрузки и скорости транспортных потоков показывают, что интенсивность движения на городской сети растет неравномерно. В центре города она практически неизменна и стабилизировалась на уровне пропускной способности центральных улиц, на периферии – растет очень сильно. Это нормальный процесс.

Задача в области транспортного планирования и организации дорожного движения должна состоять не в том, чтобы разгрузить какие-либо участки УДС, на которых наблюдается загрузка, близкая к пропускной способности, а как загрузить те участки, на которых такая загрузка не наблюдается. Отсюда вытекает иное представление о том, что есть хорошо, а что есть плохо в процессе транспортного планирования, в частности в ходе принятия решений о новом строительстве.

Ошибкой следует признать не те проекты, реализация которых привела к дополнительным пробкам на вновь построенной транспортной связи, а те проекты, после осуществления которых пробки не появились. Чрезмерно загруженный участок городской УДС можно разгрузить, реконструировав его либо построив его дублер. Загрузить же недозагруженный участок невозможно. Эту управленческую ошибку уже не исправить.

Городское сообщество вынуждено придумывать различные инструменты более рационального использования общего пространства дорог и улиц с целью удовлетворения транспортных потребностей людей. Все их можно разделить на две большие группы, направленные на *уменьшение транспортного спроса и увеличение транспортного предложения*.

Решению первой задачи посвящены основные положения разработанного голландскими, немецкими и итальянскими специалистами мастер-плана Перми. На решение второй задачи направлена ежедневная работа подразделений администрации города. Совместное решение первой и второй задачи приведет к созданию эффективной транспортной системы.

Существует не так много основных, опробованных временем и реализуемых на практике подходов к решению задачи построения эффек-

тивной транспортной системы. Основными направлениями принято считать:

- оптимизацию объемов дорожного движения путем рационального землепользования и размещения объектов массового посещения со специализацией улиц и дорог по функциональному назначению;
- сбалансированное «поощрение» использования общественного пассажирского транспорта и «притеснение» использования личного транспорта;
- совершенствование методов управления дорожным движением;
- перераспределение объемов дорожного движения при помощи фискальных и административных механизмов;
- повышение транспортной культуры населения и стимулирование развития немоторизированных видов передвижения.

Однако использование названных подходов и инструментов невозможно без проведения анализа использования территории с точки зрения ее потенциала и возможностей в удовлетворении транспортных потребностей населения. Такие исследования можно обобщенно называть *транспортным анализом территории*. Разработка его методики представляется актуальной научной задачей сегодняшнего дня.

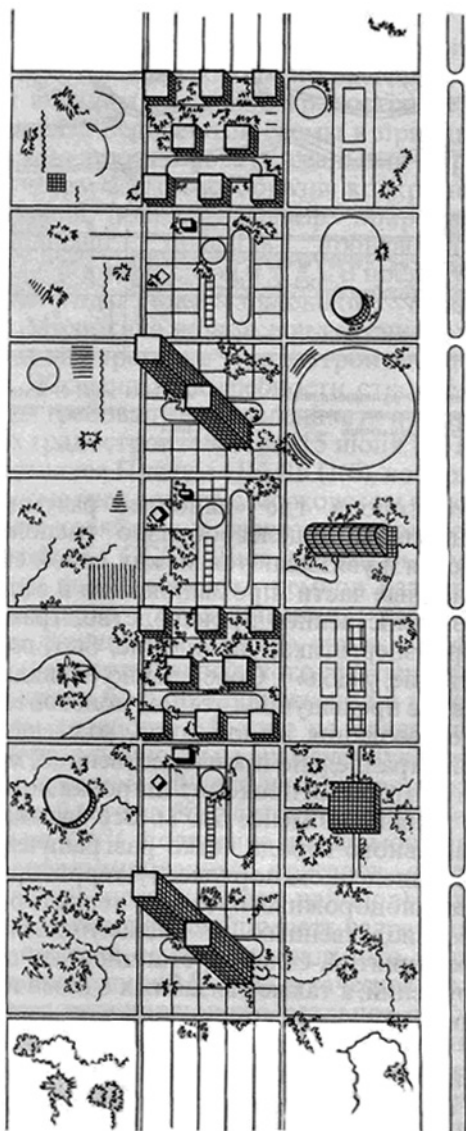
#### 1.2.4. Подходы к транспортному планированию городов

Распространение концепции устойчивого развития на градостроительное планирование оказало сильное влияние на способы проектирования, связанные с городскими общественными пространствами, включая проектирование транспортных систем. Появление в специальной зарубежной литературе и периодике новых терминов «sustainable streets», «liveable streets», «living streets», «naturalized streetscapes», «context sensitive design» вызвано интересом к проблемам экологии, ландшафтного проектирования общественных пространств, дизайна и благоустройства улиц, интеграции улиц в городскую среду, сохранения архитектурного наследия, обеспечения безопасных и комфортных условий движения пешеходов. Все эти тенденции получают отражение в разработках новых классификаций городских улиц и дорог, совершенствовании норм проектирования элементов улично-дорожной сети городов.

Следует выделить несколько оригинальных подходов в проектировании городов, призванных в первую очередь решить транспортные проблемы города. Первый подход основывается на тезисе: «Где живешь, там и работаешь». Из множества задач, которые решает подобная концепция города, основная направлена на снижение транспортного спроса. В России в процессе движения по этому пути были построены как целые города – спутники крупных заводов, так и отдельные городские микрорайоны. Родоначальником такого подхода стала концепция

соцгорода. Идея ее авторов простиралась гораздо дальше собственно задачи проектирования города, ибо предлагалась новая идеология компактного проживания людей. Н.А. Милютин [9] писал: «Миллиарды рублей, которые мы тратим на наше жилищное и социально-бытовое строительство, должны служить делу внедрения нового быта, то есть социалистической организации культурного и бытового обслуживания населения, что является предпосылкой к освобождению женщины от домашнего рабства». Это была некая искусственная реконструкция быта человека и, главное, быта семьи – ликвидация домашнего хозяйства и семейного уклада жизни для того, чтобы иметь возможность использовать женщин в качестве рабочей силы на производстве.

Проекты Н.А. Милютина состояли из одного или нескольких поясов-зон, вытянутых параллельно друг другу. Ярким примером подобного города явился проект города Магнитогорска (рис. 1.3). По замыслу градостроителя он представлял собой всего лишь неширокую полосу между поясами промышленного и сельскохозяйственного производства. Понятно, что в таком городе просто и лаконично решались задачи удовлетворения транспортных потребностей населения. По мнению архитектора, их просто не должно быть.



**Рис. 1.3.** Фрагмент генерального плана города Магнитогорска (Н.А. Милютин, 1930 г.)



**Рис. 1.4.** Базовый элемент концепции «Elevated City». Компания «ШтрассенХауз», 2009 г.

Еще один интересный подход к решению задачи удовлетворения транспортных потребностей жителя города представлен Р. Липпом. Концепция получила название «Elevated City». ЭлСити (elevated city – англ. «приподнятый город») – это современная концепция развития мегаполисов, основанная на создании высокоорганизованных городских структур. В соответствии с ней городские инженерные и транспортные системы поднимаются над поверхностью земли, формируя при этом скоростную дорожную сеть и освобождая территорию города под жизненное пространство.

Концепция «ЭлСити» опирается на запатентованные строительные конструкции модульного типа – «ШтрассенХауз», представляющие собой многофункциональные модули, в которых размещены как объекты промышленного назначения, так и необходимые инженерные коммуникации и даже жилье (рис. 1.4, 1.5) [10].

Если советские проектировщики решали транспортные задачи при помощи концепции «Где живешь, там и работаешь», то концепцию «ЭлСити» можно выразить словами «Живи на дороге», или «Живи внутри дороги», или «Живи в автомобиле», так как это попытка интегрировать жилище и транспортные коммуникации. Вполне логично, что подобная концепция появилась именно в Германии, стране с богатым автомобильным прошлым и настоящим.





**Рис. 1.5.** Фрагмент городского плана на основе концепции «Elevated City». Компания «ШтрассенХауз»

Это довольно интересный подход, и вполне возможно, что его удастся технологически качественно реализовать в недалеком будущем. Уже довольно заметно, что индивидуальный автомобиль стал обладать всеми признаками жилища человека: там уже есть все необходимое для полноценной жизни, дело осталось за коммуникациями, которые эти свойства современного автомобиля полноценно реализуют. Кроме того, концепция «ЭлСити» уделяет внимание пространственной конфигурации транспортных сетей. В этом плане она предлагает отказаться от ортогональных путей сообщения, которыми изобилуют современные города, и перейти к неортогональным транспортным связям, присущим железным дорогам.

Необходимо отметить, что именно ортогональность транспортных коммуникаций служит сдерживающим фактором развития, определяя как пропускные возможности транспортных систем, так и уровень их безопасности. Именно перекрестки улиц и дорог в городах являются концентраторами всех негативных проявлений функционирования транспортных систем. Ортогональные сети возникли исторически и связаны с развитием городов, неортогональные возникли с появлением и развитием железной дороги. Это есть вторая идея предложенной концепции. Надо сказать, что именно гармоничное сочетание этих двух идей дает некий эффект симбиоза, и при этом проект воспринимается как абсолютно реальный, в отличие от отдельно рассматриваемой идеи нового города, состоящего из отдельных типовых модулей.

Таблица 1.2

## Общие характеристики территории города

Метрополия	Численность населения, жит.	Общая площадь, кв.км	Площадь урбанизированной территории, кв. км	ВРП на душу населения, евро	Плотность населения метрополии, тыс. жит./ кв. км	Плотность населения города, тыс.жит./ кв. км
Пермь	980000	799	475	6900	1227	2063
Хельсинки	990448	743	235	39200	1330	4215
Лион	1167086	500	211	25153	2330	5530
Прага	1700000	3860	496	17155	440	2420
Севилья	1213747	1759	409	14550	690	2970
Турин	1529157	837	130	23769	1827	6928
Валенсия	1664560	1415	313	18077	1177	5323
Куриitiba	1788600	15417	431	2400	2190	4160

Некоторым образом в мире, с точки зрения организации городской транспортной системы, является Куриitiba (штат Парана, Бразилия) – город, который родился вообще без дорог, даже не на реке или каких-либо водных путях, и только потом выстроил внутри себя транспортные связи. Это опыт не европейский, не американский и не азиатский.

В широком сознании специалистов городского транспортного планирования существовало три модели городского транспортного устройства. Японская – маленькие территории, жилые дома практически с полным отсутствием инсоляции, уличная дорожная сеть в четыре уровня. Американская – просторные площади, большие автомобили, широкие дороги. И европейская – старые государства и города, где существует множество ограничений – памятников и культурных ценностей. Где в этой системе координат находится Россия – не совсем ясно.

Стоит отметить, что модель устройства транспортной системы города Куриitiba по своим базовым параметрам более всего подходит к реализации в российских городах [11].

Если сравнить основные характеристики европейских городов, то можно отметить, что, например, Пермь по своим параметрам гораздо ближе к городу Куриitiba.

Куриitiba – это город с радиальной структурой связи. Каждый участок его территории имеет прочные и многослойные транспортные связи с центром города, и все они ведут в центр. Вся УДС дублируется по типу связей.

В Куритибе основой движения является общественный транспорт. При этом всего автотранспорта (включая личный) здесь в 2,5 раза больше, чем в крупном российском городе наподобие Перми, населения – в 1,5 раза больше, а площадь города – в 2 раза меньше. Тем не менее визуально пробок на дорогах незаметно.

По основным структурным осям города трассированы восемь главных улиц, несущих 80 % всего объема транспортного движения в городе. По осевой линии каждой центральной улицы выделены полосы для приоритетного движения автобусов, крайние правые полосы используются для местного проезда; на двух других улицах, расположенных справа и слева от центральной, организовано одностороннее движение в 3–4 полосы. Все светофорные объекты города (порядка 1000 единиц) управляются централизованно в рамках единого алгоритма координации.

Создается впечатление, что планировка города и правила землепользования и застройки подчинены одной центральной идее – созданию высокопроизводительной транспортной системы. В частности, концентрация жилья и мест приложения труда была предусмотрена вдоль транспортных структурных осей города, причем многоэтажная застройка любого назначения допускалась исключительно в зоне пешеходной доступности линий общественного транспорта.

Было введено и жестко исполнено чрезвычайно полезное правило: город продает под новую застройку либо под реконструкцию (снос) старой застройки не земельные участки, как таковые, а конкретные лоты с четко лимитированной функциональной нагрузкой по назначению (жилые, офисные, торговые площади), этажности, расчетной населенности и (или) количеству мест приложения труда и т.п.

Пределы допустимой нагрузки определяются наличными резервами пропускной способности дорог и провозных возможностей общественного транспорта. Новые лоты выставляются на продажу по мере продвижения на периферию города сетки дорог и линии общественного транспорта. Исторический центр города был сохранен; одна из центральных магистралей не только не была расширена, но и вовсе превращена в пешеходную улицу.

Таким образом, даже город Куритиба с совершенной системой публичного транспорта имеет пешеходные улицы. Необходимость максимально эффективно использовать городские территории для удовлетворения транспортных потребностей населения заставляет города в ряде случаев вообще отказываться от транспортного движения, пешеходными стали Цветочная улица в Куритибе, улица Вайнера в Екатеринбурге, Красная площадь в Москве и множество пешеходных улиц в других городах.

### **Негативные последствия депопуляции**

Глобальная миграция городского населения, ускоряющаяся с ростом его подвижности, вносит свои коррективы в функционирование транспортных систем. Жители отдельных американских промышленно развитых городов уезжали целыми караванами, что было частью общей миграции населения с индустриального северо-востока. С 1950 по 2000 г., например, по данным Бюро переписи населения США, число жителей Кливленда уменьшилось на 47,7%, Питтсбурга – на 50,6, Сент-Луиса – на 59,4%. Экономический спад замедлил отток населения из этого региона, но ущерб уже был нанесен. Муниципальные лидеры «Ржавого пояса» – полосы упавочных промышленных зон Среднего Запада (США) – заявляют, что готовы принять новую реальность и работать с ней, понимая, что их города серьезным образом изменились.

Как в целом в градостроительстве, так и, в частности, в дорожно-транспортном комплексе лишь единицы усваивают новую философию – разумное уменьшение. Примеры изменения идеологии развития городов далеко не единичны.

Многие российские города столкнулись с потерей населения. Это реальная ситуация и основной фактор, определяющий вектор дальнейшего существования территории как города. Интенсивное, эффективное использование имеющихся городских ресурсов приобретает для таких городов гораздо большее значение, чем для стран и их городов с растущей численностью населения.

Таким «уменьшающимся» городам, как Пермь, следует во главу угла ставить принцип компактного размещения функциональной деятельности, улучшение качества общественных пространств и их архитектурной застройки, повышение плотности и, развитие многофункциональной застройки, а в области развития транспортных систем – ориентироваться на общественный транспорт. Это необходимо для создания компактного города.

### **Компактный город**

Понятие «компактный город» – это не буквально город небольших размеров. Пермь, например, уже сформировалась как город и будет иметь такие границы застройки, которые сложились, по крайней мере, на сегодняшний день. «Компактный город» – это идеология управления его развитием и общественным городским ресурсом, это система управления, нацеленная на оптимизацию капиталовложений в области удаления отходов, энергетики, водоснабжения, транспорта, совершенствования социальной инфраструктуры.

Целью развития городов будет концентрация ресурсов, предотвращение их неконтролируемого рассредоточения и неэффективного использования, повышение качества городской среды, предотвраще-

ние неоправданного разрастания площади территорий под новое освоение. Приоритетной для города должна стать повторная застройка свободных территорий с целью обеспечения высокой эффективности эксплуатации существующих инфраструктурных элементов, принадлежащих городскому сообществу.

Идея компактного города восходит к нынешнему состоянию нашей планеты, которое требует от нас более эффективного использования ресурсов. Экологическая ответственность сегодня – необходимое условие жизни человека на Земле. В такой концепции экстенсивный способ развития УДС как необходимый инструмент стимулирования общей подвижности и автомобилизации населения, роста производительности труда и развития экономики города следует использовать на территориях, максимально свободных от существующей застройки и имеющих значительный потенциал в своем развитии.

### **Эффективность использования улично-дорожной сети**

Демографическая ситуация каждого города должна отвечать на вопросы, поставленные перед градостроителем: центробежные или центростремительные тенденции в развитии должны преобладать? Связный или ячеистый город? Что экономически выгодно в настоящем и в масштабе будущих поколений? Это базовые вопросы, без ответа на которые невозможно заниматься транспортным планированием.

Связный город с единым центром только на первый взгляд кажется эффективным. Эффективность достигается за счет сокращения количества и универсализации объектов соцкультбыта, досуга и рекреации.

Однако неэффективность функционирования транспортной системы в таких городах особенно отчетливо видна при рассмотрении суточного цикла ее работы. Можно лишь отметить негативное влияние суточной неравномерности – своеобразной гири на ногах проекта связного города с единым центром. Неэффективность использования транспортных связей в течение суточных перепадов интенсивности движения в прямом и обратном направлении сводит на нет все другие преимущества такой системы.

В этих условиях необходимо разрабатывать не территориальный, а зонный принцип транспортного планирования и организации движения, выделяя зоны нетранспортного движения: с исключительным движением только общественного транспорта, с движением индивидуального транспорта. Внутри зон следует развивать специализацию связей (участков УДС) по назначению, используя концепцию «Level of Service» – «обслуживание движения – обслуживание доступа».

Реализация любых мероприятий в области совершенствования эффективности функционирования дорожно-транспортного комплекса городов невозможна без создания эффективно функционирующей си-

стемы управления развитием транспортной системы. Задача построения эффективной системы управления – актуальная и необходимая часть в создании методики формирования эффективной транспортной системы крупного города.

### **1.3. Научные исследования транспортных систем городов**

#### **1.3.1. Городское и транспортное планирование**

Города – это центры привязки развития человеческой цивилизации во времени и пространстве. Меняются очертания отдельных государств, территориальное деление – подвижно. Изменяется политический строй или уклад жизни на отдельной территории, но при этом города остаются на прежнем месте, ибо несут на себе исторический груз всей территории, которая их окружает. Именно города (не континенты, страны или внутренние деления государств) однозначно, точно и довольно полно аккумулируют в себе все исторические, культурные, религиозные, экономические и иные признаки территории.

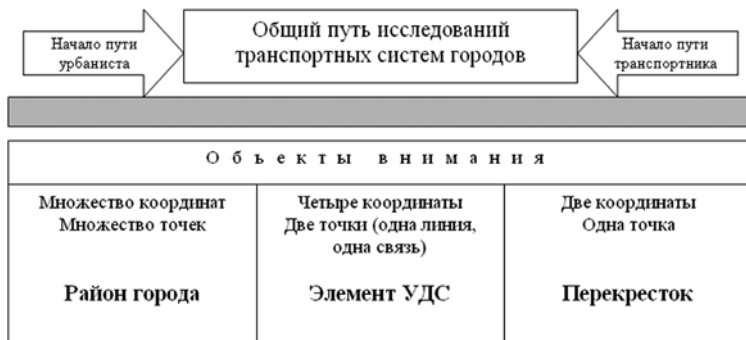
Сохранение жизни и развития городов – задача более важная, чем развитие отдельных регионов или иных административных образований. Поэтому транспортные системы городов нуждаются в более пристальном внимании именно как связующий элемент, делающий из места компактного проживания людей то, что мы сегодня называем – город.

Транспортные системы городов и регионов являются объектами пристального внимания исследователей [12, 13, 14, 15, 16, 17]. Все они структурируются по географическим и административно-политическим признакам, что позволяет выделять транспортные системы по привязке к территории, путям сообщения, видам транспорта.

Все работы в области исследования транспортных систем городов находятся, так или иначе, на стыке двух областей науки: градостроительной и транспортной. Каждая из них имеет куда более солидный возраст, чем само научное понятие «транспортная система». В общем понимании исследования транспортных систем городов направлены на изучение взаимного сосуществования города и автомобиля.

Рассматривая в отдельности каждый из этих объектов, современная наука добилась значительных успехов. Существование города без автомобиля и автомобиля на пустой дороге представляется неким идеалом для исследователей – урбаниста и транспортника соответственно. Происходит некое взаимное отторжение этих объектов, причем исключительно в теории и научной мысли.

На практике мы видим обратное – чем крупнее и развитее город, тем больше в нем автомобилей, тем более значительную роль играют они в его жизни. В этом контексте в будущем следует ожидать, что по-



**Рис. 1.6.** Объекты и пути следования современной научной мысли в области развития транспортных систем городов

иск идеального сосуществования мест проживания человека и способов его пространственного перемещения будет осуществляться в области социальных наук.

В данный момент область исследований транспортных систем городов можно представить как пространство различных степеней свободы и координат, в котором исследователи в области урбанистики и транспорта двигаются по одной научной дороге, но с разных ее концов.

Урбанисты двигаются «от сложного к простому», транспортные инженеры – «от простого к сложному». Сложность и простота в таком определении являют собой количество степеней свободы пространственно расположенных объектов, а также последовательность их рассмотрения каждым исследователем. Это есть движение в сторону увеличения размерности объектов интереса исследователя или, наоборот, к их снижению (рис. 1.6).

По образу известных графических примитивных объектов: полигон, линия, точка – области интересов транспортников и урбанистов также можно выстроить в некоторой последовательности.

Начальный предмет исследований урбаниста – городская территория. Ее основные характеристики: плотность и тип застройки. Исследователя интересует архитектура, удобство проживания и эстетика окружающего пространства, затем общий баланс использования территории для нужд городского жителя, заполненность социальными и культурными объектами, равенство объема трудоспособного населения и мест приложения его труда в различных сферах. И только когда такого баланса добиться не удастся, появляется необходимость использования другой городской территории в качестве компенсатора появившегося дисбаланса при использовании первой территории.

Вслед за этим возникает необходимость организации транспортной связи между двумя территориями. В последующем количество несбалансированных территорий растет, и на их связях друг с другом по-

являются транспортные узлы (перекрестки, пересадочные узлы городского пассажирского транспорта общего пользования).

В обратной последовательности движется в своих исследованиях транспортный инженер. Первоочередным объектом его внимания является перекресток как место концентрации транспортных взаимодействий. Когда у инженера истощается запас возможных инструментов повышения эффективности функционирования транспортного узла, он прибегает к решениям, направленным на изменение связей этого узла, то есть к реконструкции линейных элементов УДС города, изменению структуры и способов его использования различными видами транспорта. Когда в силу каких-либо внешних ограничений (в первую очередь, территориальных и экологических) дальнейшие шаги по реконструкции улиц и дорог уже невозможны, транспортный инженер приходит к оценке территориального баланса, или к анализу возможности изменения транспортного спроса.

Движение исследователя по этому пути на каждом его этапе открывает для него значительно более широкие горизонты и задачи, решение которых лежит в пограничной сфере его научных интересов.

В изучении транспортных систем городов не так важно, с какой стороны двигается по этому пути тот или иной исследователь, важно пройти этот путь до конца.

В настоящий момент транспортная наука уступает место практике, выходящей в российских городах на первое место, без чего модернизация и развитие транспортных систем невозможны. Вместе с тем отдаление практики от науки не позволяет оценивать работоспособность транспортной системы города целиком и, как следствие, создавать эффективные транспортные системы в городах.

Учебные, прикладные и научные труды специалистов в области транспортных систем городов затрагивают широкие смежные области науки. Издания, посвященные транспортным исследованиям вообще и в городах в частности, в книжных магазинах иногда выкладываются в отделах и секциях, в которых искать их не приходит в голову. Книги о транспортных системах можно найти в разделах, касающихся архитектуры и истории городов, автомобильной тематики, рядом с руководствами по эксплуатации отдельных марок автомобилей.

Труды по транспортному моделированию можно встретить в специализированных отделах по программированию и компьютерному программному обеспечению, а по экологической безопасности транспорта – в самых неожиданных местах.

### **1.3.2. Этапы развития транспортного планирования**

В России первые исследования в области транспортных систем городов были предприняты инженерами, градоустроителями вслед за



появлением автомобилей в городах. Именно автомобиль стал двигателем научной мысли в области городского транспортного планирования. Численность парка автомобилей Российской империи в 1908 г. составляла 1000 ед., в 1916 г. – 21 000 ед. [18].

Необходимость нахождения баланса при использовании территорий городов под различные функции, в том числе транспортные системы, отражена в монографии Г.Д. Дубелира [19, 20] и работах П.И. Баллинского – разработчика схем внеуличных скоростных железных дорог для обеих столиц, интегрированных с магистральной железнодорожной сетью.

В указанной монографии [19] впервые в качестве самостоятельной цели ставится задача учета автомобильного движения в городах в проектной практике. Основной идеей начального периода транспортного планирования была идея транспортной самодостаточности жителя города через реализацию своих транспортных потребностей при помощи личного автомобиля. Таким путем этот житель становился сам по себе ценен для общества, так как нес на себе значительную нагрузку по эксплуатации своего автомобиля, чем создавал вокруг себя дополнительный спрос, а следовательно, расширял новую нишу экономики.

С приходом советской власти вектор развития городов в транспортной составляющей серьезно изменился. Автомобили перестали рассматриваться как инструменты обеспечения транспортной подвижности домохозяйств, экономии времени и приращения удобств горожанина. Гораздо более ценным представлялся автомобиль как мобилизационный ресурс. Транспортная самодостаточность домохозяйств стала противоречить идеологическим принципам построения коммунистического общества. Отделение человека от коллектива, сопряженное с неограниченной свободой перемещения в личном автомобиле, было определенной угрозой существованию социалистического строя. Автомобилизация населения сдерживалась практически до последних лет существования социализма.

Позиции и взгляды на развитие городов долгое время находились в русле ранних коммунистических идей с принудительной организацией труда и быта населения. Для Москвы ставилась задача планомерного завершения радиально-кольцевой структуры непрерывного гигантского города (нечто подобное Москва пытается реализовать сейчас, но без соблюдения принципа разгрузки центра). И совсем особое решение было у Г.Б. Красина: его вариант предполагал развитие существующей инфраструктуры с укрупнением планировочных элементов и постепенным завершением кольцевых дополнений в границах предельно компактного города. Этот вариант как наиболее реалистичный и был положен в основу генплана 1935 года.

После окончания войны в 1945 г. СССР столкнулся с двумя проблемами. Первая из них заключалась в том, что многие города на за-

паде страны были разрушены и требовали восстановления, а в восточной ее части были города, принявшие эвакуированные предприятия с оккупированных территорий. Этот факт изменил их историческую структуру и прежний уклад экономики. В первом случае была теоретическая возможность пересмотреть улично-дорожную сеть с учетом произошедшего роста городов и новых реалий жизни. Однако в то время, и не без основания, руководством страны была поставлена задача восстановления городов в их прежнем облике, а задачи формирования в них транспортных систем были опять отложены на долгое, как оказалось, время.

Некоторые значительные и глубокие исследования проблем жизни города впервые появились в России именно в те годы. Идеологию соцгородов ставили под сомнение труды транспортных инженеров Шелейховского и Зильберталь [21, 22, 23].

Термин «градостроительство» не подразумевает рассмотрения вопросов функционирования городов, и этим отличается от зарубежного понятия «урбанистика». Причиной этого, скорее всего, была не только смена ведущих профессионалов – архитекторов и проектировщиков, но и накопленный опыт строительства так называемых новых городов, предоставлявших широкое поле для фантазий без особого исследования проблем последующего их функционирования. Западный термин «урбанистика» берет свое начало в работах испанского инженера-транспортника Ильдефонса Серда, успешно соединившего инженерную строгость научного подхода с опытом создания генерального плана Барселоны [24].

Исследователям транспортных систем городов того периода стоило уделить внимание только лишь потому что они просто были. А.Х. Зильберталь показал, что и транспортные подсистемы обладают свойствами объективного поведения, реагируя на происходящие в городе изменения, и описал это в работе под утилитарным названием «Трамвайное хозяйство» (1932). Он обратил внимание на то, что «...решение вопросов движения не является чисто математической задачей, а действительно зависит от того, как высоко общество оценивает свое время и свои удобства».

Г.В. Шелейховский констатировал свою приверженность либеральной урбанистической концепции, подчеркивая необходимость «...синтеза, по меньшей мере, четырех узловых задач планировки – расселения, транспорта, уличной сети и формы городского плана».

Законодатели урбанистической науки того времени тоже не имели единого мнения в вопросах интеграции автомобиля в городскую среду, а следовательно, границ использования личного автомобиля и его роли в социалистической экономике.

Между практиками того времени чередой следовали теоретические дискуссий по поводу «соцгородов» и «соцрасселения». Представителя-

ми двух противоположных точек зрения были Л. Сабсович и М. Охитович. Основой разногласий видения нового социалистического города был как раз автомобиль. М. Охитович изложил кредо своей группы следующим образом: «Социалистическое расселение – это не город и не деревня. На место городской скученности, городских скоплений, городской концентрации людей, зданий, вещей – внегородское, безгородское, децентрическое расселение. На место принудительной близости людей в городских условиях – максимальная отдаленность жилищ друг от друга, основанная на автотранспорте. На место отдельной комнаты рабочему – отдельное строение».

Коллективный разум и тут привел к тому, что идеи «дезурбанистов», основанные на дисперсной застройке и низкой плотности населения, не получили поддержки и были решительно отброшены. Концепция «урбанистов» с характерной для нее высокой концентрацией населения в соцгородах, формируемых вокруг гигантов социалистической индустрии, была по существу принята на вооружение.

Улицы городского, районного и местного значения, межрайонные и межквартальные проезды советских городов планировались исходя из перспективного уровня автомобилизации в 180 автомобилей на 1000 жителей, то есть рубежа, пройденного в США к 1925 г. Уровень автомобилизации нашей страны составлял к 1938 г. – 6, а в 1991 г. – 60 автомобилей на 1000 жителей. Для сравнения, в Великобритании этот показатель в те же годы составлял соответственно 68 и 436, в Австралии – 128 и 575, в США – 231 и 710 автомобилей. Траектория роста российской автомобилизации повторяет зарубежную, хотя и отстает по фазе от своих зарубежных аналогов на 40 (от Великобритании), 55 (от Австралии), 80 (от США) лет.

При низкой автомобилизации населения такая ситуация отчасти компенсировалась значительной долей перемещений граждан на городском пассажирском транспорте общего пользования. Однако в зарубежной практике городского и транспортного планирования принято считать, что индивидуальный и общественный транспорт являются не заменой (substitute), а дополнением (complement) друг друга.

Личные свободы, полученные жителями российских городов во времена перестройки и последующее время, привели к быстрому росту автомобилизации. В этот период исследования в области транспортных систем городов стали приобретать разнонаправленные вектора. В какой-то степени продолжались инерционные пути в практике транспортного планирования городов. Множество исследований и трудов было посвящено развитию в городах скоростного транспорта, в том числе внеуличного, существенно возросло количество исследований в области организации и безопасности дорожного движения. Выделилось отдельное направление – экологическая безопасность транспортных средств.

Сегодня становится понятно, что роль скоростного пассажирского транспорта на территории городов была излишне преувеличена. Такой транспорт не столько связывает города в единый организм, сколько, наоборот, делит их территорию (в том числе и физически – своими коммуникациями) на отдельные, связываемые только этим скоростным видом транспорта анклавов. С какими целями и как часто нужно человеку пользоваться им? Если он выбрал в качестве места жительства Владивосток, а место своей работы нашел в Москве, то ему действительно необходим скоростной транспорт – самолет, еще лучше космический корабль. В противном случае он не сможет поддерживать присущий человеку суточный ритм смены активности – работа/отдых, так как основную часть своего времени вынужден будет проводить в транспортном средстве. При потребности в высокой концентрации информационных взаимодействий между людьми крупного города скоростной транспорт не находит своего развития.

### **1.3.3. Современные направления исследования транспортных систем**

Не затрагивая общие вопросы градостроительства городов, развивались исследования в области транспортного движения. Эта тема также имеет в себе множество независимых направлений исследования, которые к сегодняшнему дню стали отдельными областями научных знаний. Применительно к городам эти исследования вовлекли в свою орбиту ученых различных областей науки – физиков, математиков, биологов и экономистов. Наука о транспортном движении включила в себя в качестве основных направлений: мониторинг, моделирование, комплексную безопасность на транспорте, логистику.

К современным следует отнести труды российских ученых, занимавшихся вопросами транспортного планирования городов, проектирования улично-дорожной сети, определения технических параметров магистральных дорог, по которым движется пассажирский транспорт общего пользования [25–48]. Данные исследования заложены во многих работах [49–54]. Они касаются вопросов экспериментального и теоретического исследования, математического моделирования транспортных потоков.

В области управления транспортными системами интересны труды отечественных и зарубежных ученых, занимавшихся проектированием систем управления транспортными потоками [55–57, 34–40, 58–61]. В них рассматривались вопросы светофорного регулирования на перекрестках, управления потоками на примыканиях второстепенных дорог к магистралям.

Из работ, посвященных вопросам развития транспортных систем городов, следует выделить одну [40], где детально изложены новые

методы прогнозирования транспортного спроса населения, обоснован уровень развития транспортных систем и их комплексной оценки, раскрыта роль транспортных систем городов и регионов в жизнедеятельности общества, влияние транспортного каркаса на формирование расселения, сформулированы предложения по совершенствованию нормативной базы развития транспортных систем.

При выявлении закономерностей функционирования и развития транспортных систем городов исследователями рассматриваются проблемы отдельных видов транспорта в общей структуре [62, 30, 31, 63], формирования парка автотранспортных средств, последствий воздействия транспорта на окружающую среду [64, 65], обеспечения устойчивого развития транспортной системы [66–70], проблемы транспортной планировки городов, вопросы транспортной телематики [71–74, 25, 32, 40].

### **Транспортный поток, его характеристики**

К настоящему времени накоплен богатейший отечественный и зарубежный опыт исследования внутренней динамики поведения транспортных потоков. Основы этого опыта заложены в работах Б. Гриншильдса и Х. Гринберга, впервые описавших аналитически фундаментальную кривую «скорость – плотность» для транспортного потока на одной полосе, а также установивших современный вид зависимостей «скорость – интенсивность» для транспортного потока.

В конце прошлого века проблемами движения потоков автомобилей занимались многие исследователи [49, 50, 53, 54, 75–79]. Был сделан существенный вклад в изучение таких вопросов, как влияние интенсивности движения и состава потока на скорость потока автомобилей. Серьезные исследования в этом направлении описаны в монографии [80], где дано четкое математическое обоснование основных зависимостей движущегося транспортного потока, построена связь между теорией транспортных потоков и классическими методами теории массового обслуживания, теории случайных процессов и теории вероятностей, а также описаны обобщенные математические модели движения транспорта.

В мировой литературе самая первая и крупная в монография по теории транспортных потоков – работа С. Дрю и Р. Дональда «Теория транспортных потоков и управление ими». В ней подробно рассматриваются элементы системы «водитель – автомобиль – дорога» и строятся модели движения транспортных потоков, описан процесс формирования и дальнейшего функционирования транспортного потока, его формализация и описание на основе математических моделей, рассмотрены методы регулирования движения на сложных узлах дорог и скоростных магистралях и проектирования высокопроизводительных транспортных систем с высокой пропускной способностью.

Существенное внимание уделяется системному подходу к транспортным проблемам, а также рассказывается о важных для приложений методах теории вероятностей, математической статистики и теории массового обслуживания. Большой интерес представляет так называемый детерминистический подход к транспортным проблемам и метод физических аналогий. Часть книги посвящена некоторым практическим задачам, связанным с проектированием дорог и регулированием уличного движения.

Глубокие исследования в области изучения транспортных потоков были выполнены Т. Метсоном, Р. Смитом, В. Лейтцбахом и др. Учеными Токийского университета Х. Иносэ и Т. Хамада подготовлена монография, в которой затронута проблема сбора и обработки информации о параметрах транспортных потоков, а также вопросы их оценки и прогнозирования.

В работе В.В. Сильянова [53] рассмотрены вопросы оценки пропускной способности автомобильных дорог с точки зрения их проектирования, эффективности принятия проектных решений, а также применения отдельных средств организации движения; приведены результаты исследования закономерностей движения транспортных потоков в реальных дорожных условиях; на основе этих наблюдений установлены уровни удобства движения и величина оптимальной загрузки дороги движением; уделено внимание методам имитационного моделирования движения транспортных потоков; изложены методики расчета пропускной способности элементов дорог.

### **Ресурсный подход к оценке транспортных систем городов**

Если транспортный поток можно с различной долей достоверности описать функциональными определяющими соотношениями, то описание функционирования транспорта как потребителя ресурсов и источника опасности в городских условиях представляет собой достаточно сложный процесс. Получить достоверное и универсальное описание процесса функционирования городской транспортной системы в явном виде, которое охватывало бы все стороны взаимодействия входящих в эту систему участников, пока не представляется возможным.

Транспортная система города, региона или государства является мощным потребителем материальных ресурсов [81, 82, 15]. С учетом ресурсного подхода к оценке функционирования транспортных систем городов можно выделить целое научное направление.

Результаты исследований в этой области приведены в работе, посвященной исследованию процессов воздействия движения автотранспортных потоков на окружающую среду, а также человека, и построению математических моделей для количественных оценок этого воздействия [52]. В ней представлены математические модели, дающие возможность количественного описания и оптимизации энер-

гоэкологических характеристик автотранспортных потоков на улично-дорожных сетях моторизованных территорий, которыми являются крупные города мира.

Понятие техногенной опасности транспортных потоков на УДС городов включает в себя главные аспекты опасности – дорожную аварийность, уровень загрязнения атмосферного воздуха, шумового загрязнения территории города – в их неразрывной взаимосвязи. В этой области исследования посвящены анализу результатов научных работ по проблемам снижения интенсивности проявления данных аспектов.

Вопросы теоретического описания механизма воздействия городских ТП на окружающую среду (ОС) рассматриваются в литературе [51, 52, 64–68, 83–88]. Проблемами снижения аварийности на городских УДС посвящены работы [27–31, 49, 50, 53, 54, 80, 89, 90]. В них сформировалось определение ТП как источника повышенной опасности в городах, выделены основные его составляющие со всеми структурными и функциональными связями. Транспортный поток представлен в виде системы, включающей в себя взаимодействующие системы транспорта, элементы и алгоритмы управления дорожным движением, а также параметры ОС.

Проблемами аварийности на УДС городов в различное время занимались многие ученые как в нашей стране, так и за рубежом. В результате сформировался подход, при котором транспортные источники опасности относят к линейным наземным непрерывно действующим источникам с переменной мощностью воздействия, расположенным непосредственно в селитебных районах города.

Проведенные аналитические исследования существующих методик оценки опасности ТП приводят к выводу о том, что нельзя разработать единые подходы к оценке различных аспектов опасности городских транспортных потоков. Количественные меры оценки уровня опасности загрязнений различного характера, а также рисков ДТП принципиально отличаются друг от друга. До настоящего времени количественную интегральную оценку опасности ТП на УДС, предусматривающую одновременный и всесторонний учет транспортной опасности, не проводили, вследствие чего научный интерес вызывает разработка критериев оценки техногенной опасности ТП и комплексных показателей, способных на ее основе дать оценку уровня негативного воздействия ТП на территорию городов.

### **Современные прикладные исследования транспортных систем городов**

В России сформировалось несколько центров концентрации передовой научной мысли в области исследования транспортных систем городов и регионов. К таким центрам можно отнести города Москву, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Иркутск.

В Москве с сентября 2008 г. на регулярной основе возобновил свою работу семинар «Научно-практические задачи развития автомобильно-дорожного комплекса в России» [63, 72, 73, 91, 92]. За три года работы семинара значительное место уделялось проблемам математического описания движения транспортного потока, анализу новых подходов к математическому моделированию поведения автомобилей в плотном транспортном потоке.

В Санкт-Петербурге ежегодно проходит конференция «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах», которую организует Институт безопасности дорожного движения Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. Большинство докладов и работ, представленных на конференциях, традиционно посвящено вопросам обеспечения безопасности дорожного движения по направлениям: «Системы организации дорожного движения и управления транспортными потоками», «Методы и средства повышения безопасности дорожного движения», «Технологии расследования ДТП и подсистемы их обеспечения», «Управление процессами поддержания технического состояния транспортных средств в эксплуатации».

Одновременно с конференцией в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете проходят международные симпозиумы «Современные технологии стратегического и оперативного транспортного планирования PTV Vision®». Традиционно участники симпозиумов уделяют основное внимание вопросам транспортного моделирования, в том числе с применением специализированных программных продуктов PTV Vision®. Наиболее интересные выступления приведены в литературных источниках [22, 27–31, 53, 54, 63, 71, 73, 93].

Постоянные участники ежегодной Екатеринбургской конференции уделяют внимание транспортно-градостроительным проблемам регионов, городов и зон их влияния, исследованиям подвижности населения городов, инфраструктуре легкового транспорта в городах и зонах их влияния, организации и управлению движением в городах, безопасности городского движения, экономике, организации и управлению городским общественным пассажирским транспортом.

Большое количество профессиональных кадров в области исследования транспортных систем было подготовлено на базе транспортной лаборатории Иркутского государственного технического университета. Традиционно наиболее важное значение иркутская научная школа придает исследованиям в области регулирования транспортного движения на улично-дорожной сети городов, а также процессов взаимодействия транспортных потоков на пересечениях, организации эффективного функционирования инфраструктуры городского пассажирского транспорта общего пользования.



### 1.3.4. Математические транспортные модели

#### **Моделирование характеристик транспортных потоков**

Для формализованного описания процесса функционирования потока транспорта в городских условиях широко используют моделирование [27–32, 53, 54, 90–92, 94–96]. Сформирована обширная научная, статистическая и экспериментальная база, позволяющая решать транспортные задачи в условиях постоянно увеличивающейся жесткости требований к повышению уровня эффективности транспортных систем городов.

К последним исследованиям в области оптимизации движения транспортных потоков следует отнести книгу А.П. Буслаева и др. [92]. В области инструментария и алгоритмов построения моделей загрузки УДС городов и динамического моделирования движения транспорта хотелось бы отметить исследования В.И. Швецова, А.С. Алиева, В.В. Семенова [97, 61].

К фундаментальным изданиям в области построения моделей движения транспортного потока необходимо отнести работы коллектива кафедры волновой и газовой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [98, 99].

В приведенных литературных источниках представлено развитие модели движения автотранспортных потоков, предложена новая модель двухполосного транспортного потока, учитывающая перестроения транспортных средств и основанная на подходе механики многофазных сред. Модель хорошо описывает особенности однопольного движения транспорта и количественно согласуется с проводившимися экспериментальными измерениями.

#### **Моделирование характеристик транспортных систем городов**

Необходимость в построении масштабных транспортных моделей российских городов еще не набрала достаточную остроту. В этом аспекте развития транспортной мысли Россия отстает на 10–15 лет от Европы, как, собственно, и в развитии автомобилизации.

Удовлетворить спрос на использование автомобиля в городе пока не удалось ни в одном городе мира. Развитие УДС (строительство) решает кратковременные проблемы на участках и с течением времени стимулирует объемы транспортного движения и восстановит старое состояние.

Прежде чем предлагать конкретные организационно-технические мероприятия, необходимо представлять не только к чему это приведет после их реализации, но и зачем это делать вообще. Решение таких задач невозможно без математического моделирования процессов, возникающих при взаимодействии существующих транспортных сетей городов и их потребителей.

Главная задача всех математических моделей – заглянуть в будущее, в то время, когда моделируемого объекта еще нет, либо создать условия, в которых этот объект еще не был. Среди разнообразия математических моделей, практически применяемых для анализа транспортных сетей городов и регионов, можно выделить три основные группы моделей: прогнозные, имитационные, оптимизационные модели.

В свою очередь, каждой группе моделей можно поставить определенный круг решаемых задач. В нашем случае это будут задачи:

- транспортного планирования;
- организации дорожного движения;
- оптимизации перевозочного процесса.

Кроме того, каждая группа имеет свой объект исследования и соответствующий этому объекту набор степеней свободы. Для рассматриваемого нами случая этими объектами будут:

- транспортный поток;
- транспортное средство;
- формализованный параметр оптимизации (цель).

Моделирование дает возможность наглядно изобразить комплексные процессы деятельности транспорта, прогнозировать перераспределение транспортных потоков в результате следующих внешних воздействий на участки УДС:

- строительство новых участков сети;
- реконструкция (расширение) участков сети;
- закрытие отдельных участков сети;
- изменения условий движения в сети.

Прогнозные модели предназначены для моделирования объемов транспортной работы в сетях при известном размещении потокообразующих объектов города. Прогнозные модели, в свою очередь, можно разделить также на две группы по основным задачам:

- прогнозирование во времени;
- прогнозирование в пространстве.

При помощи этих моделей можно прогнозировать последствия изменений в транспортной сети города, происходящих в процессе изменения либо транспортного спроса, либо транспортного предложения. Модели этого типа применяют для поддержки решений в области транспортного планирования города, анализа последствий тех или иных альтернативных проектов развития транспортной сети и др.

Группы моделей подчиненно связаны друг с другом. Прогнозы интенсивности движения транспорта служат исходными данными для последующей имитации этого движения во времени. Имитация, в свою очередь, порождает видимую потребность в оптимизации того или иного транспортного процесса. Такая связь моделей различных групп и назначения позволяет говорить о некоторой модельной осно-

ве, так или иначе необходимой при создании каждой из них и объединенной одним термином – «транспортная модель города».

Любая математическая модель функционирования транспортной сети основывается на большом объеме исходных данных, получение которых вызывает серьезные затруднения, и это является первоочередной основной трудностью на пути создания транспортных моделей крупных городов. К таким данным относятся: дифференцированная по районам численность населения, число мест приложения труда, рекреационный потенциал, среднее время передвижения и др. Очевидно, что сбор исходных данных составляет наиболее трудоемкий и продолжительный по времени этап при построении транспортных моделей [45, 97, 100–103].

Алгоритм каждой из известных групп транспортных моделей в конечном итоге на заключительном этапе решает задачу соответствия существующего транспортного спроса имеющемуся транспортному предложению.

Создание основы модели и наполнение ее исходными данными можно разделить на два независимых друг от друга этапа – создание транспортного предложения и создание (расчет) транспортного спроса. На заключительном этапе, имея сформированные и формализованные параметры транспортного спроса и предложения, задачу сводят к совершенствованию алгоритмов распределения транспортного спроса по существующему транспортному предложению и калибровке модели по собранным натурным данным, характеризующим основные параметры транспортного движения на действующей в настоящее время сети.

Транспортное предложение состоит из элементов, с помощью которых транспортная система города удовлетворяет существующий транспортный спрос, и в итоге будет определять, какой объем спроса и насколько качественно может удовлетворить транспортная система. При этом формализация параметров, характеризующих существующее состояние дорожно-транспортного комплекса, и будет первым этапом в создании транспортной модели города (создание транспортного предложения), второй этап в построении модели (создание или расчет транспортного спроса) представляет собой куда более сложную и трудоемкую задачу.

Но современном этапе представляется интересным разработать единую пошаговую методику создания транспортных моделей городов, в частности прогнозных моделей. Эта задача будет включать в себя как систематизацию существующего мирового опыта транспортного моделирования, реализованного в конкретных прикладных программах, так и обобщение различных подходов к реализации каждого из шагов четырехшаговых транспортных моделей городов.

### **Критерии оценки эффективности транспортных систем**

Понятие «транспортная система» достаточно редко формализуется в современной научной литературе. Представление о ней как о природно-технической системе делает задачу постановки критериев эффективности ее функционирования еще более сложной, так как равноправными компонентами и участниками системы являются участники дорожного движения и окружающая среда.

Исследования в области функционирования транспортных систем городов и оценки качества этого функционирования можно найти в научной литературе 70-х гг. прошлого века [103–106]. Они основывались на фундаменте советской школы градостроительства, поэтому, как и в экономике страны, транспортные инженеры использовали плановые экономические подходы к разработке стратегии развития и городов, и транспорта. На этом фоне рождались действительно научные исследования по оценке эффективности функционирования транспортных систем городов в условиях плановой экономики в индустриальном обществе. В них оценивалась не пустая система, а единство предъявленных жителями потребностей в физическом перемещении в пространстве города и средств их удовлетворения. Были описаны свойства системы, введены понятия «транспортная доступность», «подвижность», «качество транспортного обслуживания».

Дальнейшие процессы, связанные с переходом экономики страны к рыночным принципам развития, существенно усложнили задачу формализации понятия эффективности транспортных систем. В первую очередь, это произошло вследствие объективных процессов сегментирования экономики, формирования и существенного развития его третичного сектора. Назначение городской транспортной системы менялось стремительно – от обеспечения планового развития социалистической экономики к реализации потребностей в информационном обмене при существенном росте общей подвижности населения городов.

Цель функционирования городских транспортных систем еще больше скрылась за сложными экономическими взаимоотношениями в растущей рыночной экономике. Отсутствие формальных целей делало невозможным постановку задачи определения эффективности функционирования транспортных систем. В дальнейшем понятия «качество транспорта» и «эффективность транспорта» относились исключительно к отдельным составляющим транспортных систем и их функционирования [15, 60].

Исследовались региональные особенности функционирования транспортных систем, отраслевые особенности функционирования системы грузоперевозок [81, 82, 104, 107, 108]. Оценивалась эффективность отдельных мероприятий, инноваций в области систем транспорта, реже в сфере организации дорожного движения. Все исследования

содержали так или иначе законченные экономические выводы по двум основным направлениям исследований эксплуатации транспорта: грузоперевозки [109–111], пассажироперевозки [112–114].

Дальнейшее деление по различным системам транспорта привело к изучению эффективности каждой из трех составляющих отдельной системы транспорта [80,115]: подвижного состава, инфраструктуры, объектов сервиса.

Оценка эффективности транспортной системы на уровне страны была сформулирована как оценка социально-экономической эффективности в Федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы России (2010–2015 годы)» [116]. Но показатели и критерии оценки этой эффективности выражались в объемах затрат общества на развитие инфраструктуры. При этом не была определена связь затрат на развитие инфраструктуры с экономическим либо социальным эффектом, и потому заявленная оценка «общественной» эффективности в программе не представляется объективной.

Отсутствие системы координат для оценки качества либо эффективности функционирования транспортных систем в целом и городских в частности объясняется отсутствием до настоящего момента современных инструментов оценки транспортного спроса на услуги транспорта. Имея в своем распоряжении модели транспортного спроса, можно проводить исследования по сопоставлению (эффекту) затрат сообщества на эксплуатацию транспортной системы и потребностей общества и степени их удовлетворения.

## **1.4. Движущие силы и ограничения развития транспортных систем городов**

### **1.4.1. Роль и движущие силы развития транспортных систем**

#### **Фазы развития человеческого общества и его подвижность**

Любая подвижность – это признак поступательного развития, с одной стороны, и любая неподвижность – признак стагнации и упадка – с другой. В развитии природы и человеческого общества легко найти примеры определяющего вклада подвижности в их эволюционное развитие.

Подвижность может рассматриваться как одна из движущих сил и человеческой эволюции, и истории. Как и начальное распространение людей по земному шару, так и нынешняя их подвижность обусловлены задачами выживания человеческого рода и повышения качества жизни. Оба этих фактора роста подвижности человечества целесообразно рассматривать как факторы экономические. Первый из них есть

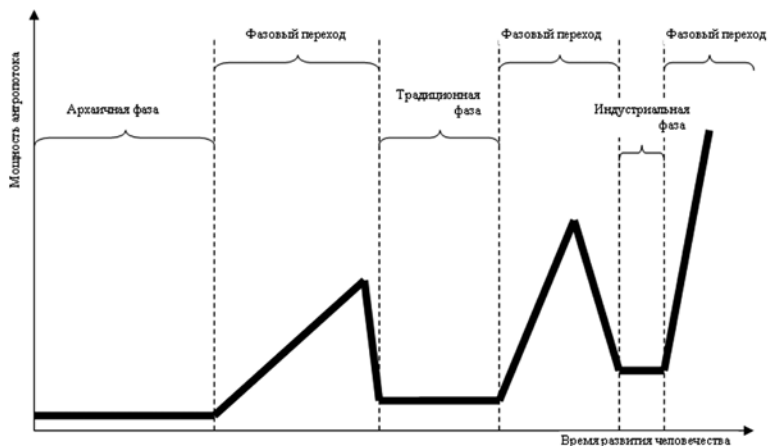


Рис. 1.7. Диаграмма переменного роста мощности антропотков

результат повышения мощности антропотков в результате эволюционного перехода от одной исторической фазы развития человечества к другой. Рассматривая три исторические фазы развития человечества (архаичную, традиционную, индустриальную), можно выстроить причинно-следственную связь между всплесками подвижности человека и сменой одной исторической фазы на другую (рис. 1.7).

Архаичная фаза исторического развития человеческого общества характеризовалась двумя видами деятельности – охотой и собирательством. Основной ресурс потребления общества – пищевой. Сначала он был возобновляемым (произрастали съедобные растения, естественным образом поддерживалась популяция животных). Природный баланс в естественной среде обитания обеспечивал высокие параметры качества жизни.

По мере роста популяции человека на определенной территории объемы потребления обществом пищевых ресурсов рано или поздно переваливают за границы естественного их воспроизводства в природе. Проявляется ресурсное голодание. Общинный строй не предполагает локального «растекания» людей по территории, что могло бы снизить плотность потребления ее ресурсов и продлить архаичную фазу развития общества. Исконные места обитания покидает сразу вся община, оставляя за собой биологическую и антропологическую пустыню.

Обживаясь на новых территориях, человеческий род не меняет главного – структуры потребления ресурсов. В итоге и новая территория «проедается». Затем приходит новая миграция рода, и этот процесс на каждой новой итерации ускоряется во времени. Объемы миграций и их частота стремительно увеличиваются. Однако необходимость во все более частых перемещениях стимулирует технический прогресс:

появляются новые знания, накапливается опыт. Это процесс фазового перехода. Перехода к новой фазе исторического развития общества.

За архаичной эпохой наступает сельскохозяйственная революция, и приходит традиционная историческая фаза развития человеческого общества. Вместо охоты и собирательства оно осваивает земледелие и животноводство. Пищевой ресурс, потребляемый в предыдущей фазе, перестает лимитировать рост популяции человечества, он становится искусственно возобновляемым. Отпадает необходимость в смене территорий для проживания, а это, в свою очередь, значительно ускоряет рост численности рода. У рода в целом, а потом у каждого его члена (семьи) появляется недвижимое имущество – пахотные земли и пастбища. Они являются также новым ресурсом, сдерживающим развитие популяции человека.

Наличие имущества объединяет людей и в результате снова препятствует локальному «растеканию» общины. Появляются города. Ресурс (земли) становится объектом конфликтов, а свободная, нераспаханная земля – главной ценностью традиционной фазы развития. Борьба между общинами (городами и странами) за новые земли, а также истощение существующих пастбищ и полей интенсивной эксплуатацией и поиск новых земель опять стимулируют антропоток. Движение стимулирует прогресс. Это второй фазовый переход.

Вслед за традиционной исторической фазой приходит индустриальная фаза. Появляются машины и транспорт, у человека – движимое имущество. С ним он становится более свободным и мобильным, выбирает себе место жительства вдали от пахотных земель и пастбищ. Теперь неважно, где произведен товар, важно его доставить до потребителя с наименьшими затратами. Земли перестают быть единственной ценностью. Один дефицитный ресурс заменяется другим.

В индустриальной фазе дефицитным ресурсом являются коммуникации, в первую очередь транспортные. Они лимитируют развитие популяции, расходуются обществом. Маленькие поселения не в состоянии построить для себя качественные коммуникации, поэтому не могут наравне с большими городами воспользоваться широким набором товаров и услуг, поставляемых посредством этих коммуникаций. Люди, имеющие движимое имущество, начинают мигрировать в поисках свободных коммуникационных ресурсов. Появляются новые антропоток. Формируются крупные города с высоким уровнем плотности коммуникаций. Люди, имеющие только недвижимое имущество вдали от свободных коммуникационных ресурсов, нищают. Возникают новые антропустыни.

Современный этап развития человеческого общества, его технических и технологических возможностей можно назвать апогеем потребления транспортной составляющей коммуникационных ресурсов. Объемы выводимых из сельскохозяйственного и рекреационного обо-

рота территорий, в первую очередь городских, не только не обеспечивают ожидаемого прироста качества жизни за счет ввода дополнительных транспортных коммуникаций, но и часто становится тормозом развития прилегающих территорий.

Становится понятным, что проблема дальнейшего развития человечества заключается в совершенствовании социальных механизмов управления и распределения объектов потребления. Точнее говоря, дефицитными сегодня считаются коммуникационные ресурсы распределения знаний, капитала и богатств земли.

### **Благосостояние человечества и качество жизни в городах**

Программа ООН по развитию определяет индекс развития человеческого потенциала (Human Development Index, HDI) как совокупный параметр, характеризующий развитие человеческого общества (рис. 1.8). Он связывает показатели продолжительности жизни, образования и валового продукта экономики государств [117].

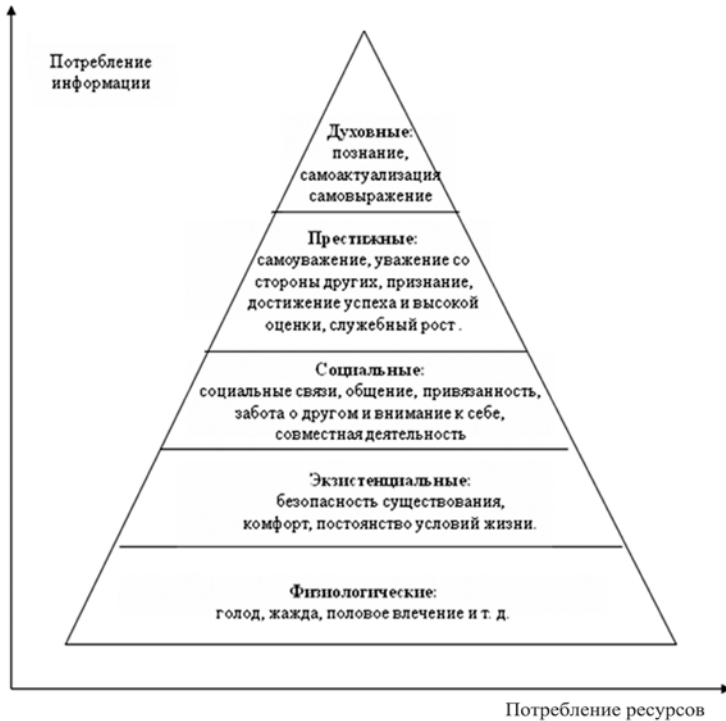


**Рис. 1.8.** Структурная схема оценки благосостояния человечества

Система человеческих ценностей и потребностей при сосуществовании в современном обществе наглядно представлена в схеме, впоследствии названной «пирамидой Маслоу», которая вряд ли существенно изменится в ближайшие 50–100 лет. Она иллюстрирует последовательность смены и важность для человеческого индивидуума исчерпывающего набора ценностей.

Данную пирамиду легко можно рассматривать в пространстве временных отрезков жизни каждого человека. Изначально, еще в младенческом возрасте, для него определяющими являются физиологические потребности. В течение жизни, с повышением образовательного уровня, увеличением числа межличностных контактов потребности человека меняются. Становятся важными задачи позиционирования себя в обществе, собственного влияния на окружение и нового позиционирования себя в обществе.

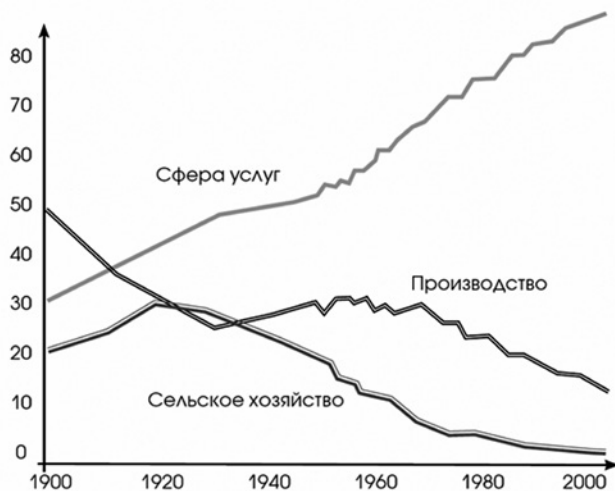




**Рис. 1.9.** Пирамида потребностей А. Маслоу в пространстве потребления

Интересно рассмотреть пирамиду Маслоу в другом координатном пространстве (рис. 1.9), где она представлена зависимой от объемов потребления человеком материальных и информационных ресурсов. Чем выше уровень потребностей человека (от физиологических до духовных), тем больше ему требуется информационных ресурсов. Невозможно даже ставить себе цели обретения социальных, престижных или духовных ценностей в отсутствие качественных информационных каналов обмена в человеческом обществе.

Эволюция человека последовательно трансформирует пирамиду, вытягивая ее вверх. Все чаще общество в состоянии удовлетворять все физиологические потребности человека с первых дней его появления на свет. Все меньше людей в течение жизни интересуется материальное потребление и все больше возрастает потребность в информационном потреблении, или обмене информацией. Это отчетливо заметно в местах компактного проживания людей – в городах. В первую очередь этот процесс связан с развитием информационных технологий и систем связи.



**Рис. 1.10.** Распределение рабочей силы США в XX в. по секторам экономики [47]

Все больше людей в приложении своего труда переходят из производственной сферы в сферу услуг и обработки информации – культуру, науку. Благодаря современным информационным технологиям у человека отпадает необходимость в совершении некоторых поездок (на работу, в магазин и т. д.). На рис. 1.10 представлены графики изменения занятости населения в США по секторам экономики за последние 100 лет.

Эти данные собраны в целом по стране. В крупных городах Европы и США еще более заметен рост занятости населения в непроеизводственной сфере по сравнению с сокращением доли рабочих мест в промышленном производстве и сельском хозяйстве. Это связано с ростом производительности труда и высвобождением трудовых ресурсов из производственной сферы и перемещением их в сферу услуг, в большой степени связанной с обработкой информации.

Например, в Германии уже в 1999 г. оборот финансовых средств в секторе информационных технологий был больше, чем в автомобильной промышленности [118].

Рассматривая движущие силы поведения отдельного человека, введем понятие «качество жизни» («качество жизни человека») и покажем, что его транспортные потребности обусловлены стремлением к повышению качества жизни.

Итак, в развитых странах рабочая сила перемещается из производства в сферу услуг. Мы видим, что человечество с момента возникновения, когда оно стало на путь гиперболического роста, развивалось, как информационное общество, и в настоящее время мы имеем дело с его



Рис. 1.11. Связь потребляемых природных и информационных ресурсов с понятием «качество жизни»

взрывным развитием. Все это оказывает непосредственное влияние на уровень качества жизни, который так же, как и пирамиду потребностей и человеческих ценностей Маслоу, можно рассматривать через материальное и информационное потребление (рис. 1.11).

В отличие от качества (благополучия) человеческого общества качество жизни есть параметр оценки качества жизни индивидуума, как если бы он находился в однородной социальной среде. Поэтому не имеет большого смысла оценивать обобщенные показатели качества жизни некоего сообщества людей, выделяя социальные, культурные и экономические показатели их жизни.

Потребление человека в течение жизни можно разделить на материальное и нематериальное. Материальное потребление – это потребление с целью поддержания самой жизни и ее продления. Человек как элемент природной системы получает из нее продукт необходимого качества. Природа нашей планеты в состоянии дать ограниченному количеству населения, проживающего на ограниченных территориях, требующиеся для полноценной жизни ресурсы, под которыми будем понимать и пищевые ресурсы, и необходимые для проживания в естественной среде обитания параметры этой среды.

С ростом популяции человека на планете происходит его расселение на территории, ареал его обитания выходит за границы природ-

но-обеспеченных параметров ресурсного потребления для жизни. Это касается и пищевой цепи потребления человека, и климатических условий для его проживания.

С целью компенсации этого недостатка человек использует различные технические системы, как с целью искусственного воссоздания условий для восстановления необходимой пищевой цепи, так и непосредственно для регулирования параметров среды его проживания и жизнедеятельности. Современное человеческое общество регулирует качество своего ресурсного потребления посредством создания природно-технических систем обеспечения качества и воспроизводства своего материального потребления. На помощь ему приходят технические системы, призванные искусственным образом поддерживать необходимый уровень материального потребления на тех территориях, где в естественных условиях это невозможно.

В настоящее время они обеспечивают качество жизни на большей части планеты, включая основные свободы, потребление и качество среды обитания, но для ограниченного количества людей. При этом нужно учесть, что технические системы, обеспечивающие качество среды обитания человека, снижают его коммуникационные возможности, а обеспечивающие коммуникационные потребности человека – снижают качество среды его обитания.

### **Транспортная система как часть информационной системы**

На основе международного опыта в 1980-е гг. была уточнена цель развития транспортной системы в соответствии с создавшимися к тому времени транспортными условиями и звучала она так: «более полное и своевременное удовлетворение потребностей народного хозяйства, достигаемое при определенном критерии, экстремальное значение которого характеризует степень соответствия хода функционирования транспортной системы поставленной цели».

Наиболее полно в 1990-е гг. раскрыл вопросы развития транспортных систем городов в своей работе Ю.А. Ставничий [47]. Он определил цель развития транспортной системы города как полное, своевременное и качественное удовлетворение потребностей города в перевозке грузов и пассажиров. Транспортная система должна рассматриваться как часть информационной системы, ибо, как уже отмечалось, кроме материального потребления, природно-технические системы обеспечивают обществу качественное нематериальное потребление.

Обмен информацией в обществе в равных долях происходит по двум различным направлениям: обмен человека с человеком (коммуникации) и обмен человека с окружающей средой. С ростом популяции человечества и расширением ареала его обитания природные системы уже не в состоянии удовлетворять его необходимые информационные

потребности при обмене информацией как с окружающей средой, так и с другими людьми.

Для успешного осуществления процесса коммуникации необходимо несколько участников, вследствие чего возникает задача – предоставить возможность объединения участников для коммуникации. Иными словами, каждый участник процесса коммуникации должен иметь возможность общения с любым индивидом, в том числе находящемся на другой территории. В связи с этим можно говорить и о транспортной коммуникации, поскольку одной из ее целей является обеспечение возможности мобильного передвижения. Применяя термины теории коммуникации, можно сказать, что транспортная инфраструктура – это своего рода канал связи в процессе коммуникации.

Вступив в информационный век, мы по-иному смотрим на такую науку, как теория коммуникации. Адресант перемещается с пассивных на активные позиции. Лауреат Нобелевской премии К. Гэлбрейт сказал об этом феномене – человек хочет быть услышанным. Это его новая характеристика, которая не столь явно проявлялась в прошлом.

Так же как и в транспортной сфере, до определенного периода у человека не было необходимости в осуществлении транспортных корреспонденций. Изначально на определенной территории он мог получить все, что ему было необходимо; с течением времени проявлялась нехватка ресурсов, и он вынужден был перемещаться, осваивать новые территории.

Теория коммуникации объясняет наличие вербальной и невербальной связи между различными участниками процесса коммуникации. В дополнение к прямой связи, где мы достаточно преуспели, приходит обратная, резко повышающая роль получателя информации. Транспортные коммуникации помогают технически осуществить процесс обмена ею, являются своего рода каналом связи: именно передвижение позволяет человеку налаживать новые связи и делать процесс коммуникации шире и многообразнее.

Особенности коммуникаций в значительной степени формируются разнообразными прикладными областями, где коммуникативное воздействие играет определяющую роль. Только с помощью эффективно проведенной коммуникации в современном обществе происходит все больше и больше событий. Общество стало более зависимым от коммуникаций, в том числе транспортных, поскольку для обмена информацией человеку важно не только пользоваться телефонной и телеграфной связью, но и осуществлять личное общение, непосредственный контакт и передачу информации.

Современное общество принципиально альтернативно – для него характерна альтернативная коммуникативная среда. Любое сообщение можно передать с помощью разнообразного набора вариантов.

Транспортная коммуникация не владеет такой широкой степенью выбора вариантов как вербальная, но тоже предполагает наличие альтернативы (выбор средств передвижения, маршрут и т. д.).

Коммуникацию можно рассматривать как интенсификацию имеющихся коммуникативных интенций, перевод их в более технологическую форму, под которой мы понимаем достижение прогнозируемого результата в отличие от случайного процесса. В этом смысле целью развития транспортных коммуникаций является создание эффективной транспортной инфраструктуры города.

Процесс коммуникации охватывает генеральную совокупность людей, процесс передвижения также включает в себя большую часть населения. Тем не менее индивидуальное общение, личностный фактор не становятся менее важными. Наблюдается общий процесс перехода от коллективного к индивидуальному мышлению. В транспортной сфере это выражается в стремлении приобрести личный автотранспорт и тем самым удовлетворить свои потребности в личном пространстве, личной безопасности и т. д.

Новый тип прикладных коммуникаций стал играть в современном обществе очень важную роль. Когда работа с информацией стала одной из производительных сил общества, появились страны, которые строят свое экономическое благополучие, в значительной степени используя ресурсы обработки информации. Транспортные коммуникации в жизни современного общества являются неотъемлемой частью всех производительных сил. В значительной степени это связано с тем, что оно вышло на более сложный этап своей организации, требующий успешного функционирования более совершенных процессов координации и в более серьезной степени опирающийся на информационные процессы.

В современном обществе транспортные коммуникации представляют собой достаточно сложные процессы, и построение эффективной транспортной системы также предполагает наличие современной системы координации.

Многие исследователи используют термин «глобальная информационная среда», который означает влияние рассматриваемого явления на политические, экономические и иные сферы жизни общества. Транспортные коммуникации, безусловно, включены в это понятие.

Новый информационный мир по-иному выстраивает свои приоритеты, опирается на новые типы возможностей, и статус наук коммуникативного цикла непрерывно возрастает. В этой области также появились свои «глобалисты», замкнувшие на коммуникацию все происходящие в мире процессы. Это Маршалл Маклюэн и Элвин Тоффлер. Они отмечают: во-первых, повышение роли самого канала коммуникации; во-вторых, всеобщность этого подхода, которая привела к

рассмотрению мира как одной глобальной деревни, единство которой достигается за счет СМИ.

При рассмотрении города можно говорить о том, что это его единство достигается именно с помощью транспортных коммуникаций.

Следовательно, можно утверждать, что транспортные коммуникации являются неотъемлемой частью глобальной информационной среды, ибо обладают как специфическими, так и общими особенностями, присущими коммуникации в целом.

Технические системы отчасти расширяют возможности информационного обмена, но все же не могут полностью заменить природные системы по качеству этого информационного обмена.

Качество среды обитания для человека в общем случае не тождественно понятию «качество жизни», как это принято для всего остального животного мира. Для человека потребление – это более сложный процесс, главное отличие которого от аналогичного процесса остального животного мира заключается в большом объеме (информационного) нематериального потребления.

Все нематериальное потребление можно оценить через движение информационных потоков. Окружающая природная среда обеспечивает человеку пригодные для жизни материальные ресурсы (природно-климатические, пищевые, энергетические и др.), а также надежные каналы приема различной информации и в последующем передачи этой информации от человека к человеку посредством органов чувств (зрения, слуха, вкуса, обоняния, осязания). Однако рост человеческой популяции на земле предполагает расширение ареала обитания человека за пределы территорий, на которых природные системы в состоянии естественным путем удовлетворять его потребности в информационном обмене [6, 117, 119], а это предполагает пространственные ограничения возможности передачи и приема различной информации при помощи органов чувств.

Сегодня человек расширил возможности передачи информации, ее хранения и представления посредством знаковых форм. Так или иначе, он создает искусственные средства для транспорта информации. Лапы животных находят свое продолжение у человека в колесе, а органы чувств – в технических системах связи: телеграф, телефон, телевизор, радио, Интернет. Умение хранить информацию на различных носителях (камень, глина, папирус, пергамент, бумага, магнитные носители, киноленты, виниловые диски, цифровые накопители) позволяет «транспортировать» ее не только в пространстве, но и во времени.

Роль технических систем в информационном потреблении аналогична. Существующие каналы связи людей (органы чувств) имеют ограниченное действие в первую очередь по расстоянию передачи и приема информации. И здесь также на помощь приходят технические

системы, обеспечивающие хранение и передачу на значительные расстояния все более возрастающих информационных потоков. Кроме того, технические системы способны хранить и соответственно передавать только знаковую информацию, причем не только в пространстве, но и во времени. То же самое касается обработки информации, но в этом плане технические системы пока сильно отстают от природных систем, которыми наделен человек, в частности от его органов чувств и интеллекта. Технические системы не способны обеспечивать информационный обмен между людьми с таким качеством, как в природной среде при непосредственном общении людей. Потребность в таком общении с целью обеспечения качества информационного обмена стимулирует их подвижность.

Транспортную систему города прежде всего следует рассматривать как систему обеспечения передачи информации от человека к человеку в соответствии с его потребностями. Бурный рост информационных технологий ведет к тому, что в общем балансе его потребления темпы роста нематериальных потребностей значительно опережают темпы роста материальных потребностей, передаваемых соответственно по каналам связи или путям сообщения.

В итоге качество жизни человека определяется качеством природно-технических систем, обеспечивающих его потребности (см. рис. 1.11). Одной из значимых систем в этом процессе является транспортная система. Как элемент информационной системы она в условиях изменения структуры мировой экономики (рост сферы услуг) испытывает повышенные нагрузки именно как система передачи информации. Эта нагрузка будет увеличиваться с ростом производительности труда и высвобождением большего количества трудовых ресурсов.

Стремясь к достижению высоких показателей качества жизни, человечество овладевает новыми знаниями. Всех людей можно разделить на две большие категории: занимающиеся обработкой уже известной информации и создающие новую информацию, новые знания. Можно предположить, что объем перерабатываемой сообществом информации подчиняется гравитационному закону, поэтому естественно, что в крупных городах этот объем максимален.

В конечном итоге принимает и передает информацию человек при помощи пяти органов чувств. Естественный путь передачи информации от человека к человеку задействует сразу несколько органов чувств, и в этом случае информация передается в образном виде.

С увеличением необходимого объема передачи информации человек придумывал формальные и неформальные языки и различные формы передачи информации в знаковой форме. Хотя знаковая форма передачи информации задействует только один из органов чувств человека, однако позволяет использовать технические системы на этапе ее передачи, хранения и первичной переработки. Именно информаци-



онные системы обработки, хранения и передачи информации в настоящее время определяют устойчивость и жизнеспособность индустриальной фазы развития человеческого общества.

На современном этапе развития техники и технологии успешно решается задача удовлетворения потребности людей в объемах информационного потребления. Прогресс в этой области отодвигает проблему истощения ресурса по обеспечению информационного обмена между людьми далеко за видимый горизонт прогнозирования будущего, чего нельзя сказать о качестве информационного обмена. Системы хранения, обработки и транспортировки знаковой информации существенно опережают аналогичные возможности человеческого мозга, однако современные проводники информации загрязнены, а искусственные фильтры не справляются с их очисткой. Не зря некоторые аналитики определяют нашу эпоху как время эскапизма<sup>1</sup> и избыточной информационной нагрузки. Выдающийся советский психолог А.Н. Леонтьев проницательно заметил, что «избыток информации ведет к оскудению души».

По каналам связи в мозг человека поступает поток информации с высоким напряжением (если проводить аналогии с электрическим током). Это происходит из-за физического сопротивления канала (обычно одного органа чувств). Точно такой же поток информации легко достигает конечной своей точки в мозге человека, будучи распределенным равномерно по всем пяти органам чувств. Генератором либо транспортировщиком структурированной таким образом информации служит сам человек. Следовательно, обмен ею в непосредственном контакте между людьми является самым эффективным в силу того, что очное общение лишено информационного мусора. Роль транспорта в информационном обмене определяет качественные показатели жизни человека через качество его нематериального (информационного) потребления.

Строго рассматривая назначение и роль транспортных систем в жизни человеческого общества, следует указать на одно необходимое условие его развития. Информационное потребление как основная движущая сила функционирования и развития транспортных систем не является определяющим процессом. Определяющим условием выступает небольшая, но важная функция транспортной системы – транспортировка человека к человеку с целью репродукции (рис. 1.12).

В истории Великобритании известен тот факт, что коренное сельское население на Британских островах долгое время страдало от разного рода наследственных болезней, имеющих генетическую природу. Причиной многих из них были близкородственные брачные связи, приводившие к рождению детей с различными генетическими отклонениями. Проблема разрешилась неожиданно. С изобретением

<sup>1</sup> Эскапизм – стремление человека уйти от действительности в мир иллюзий.



**Рис. 1.12.** Определяющие процессы функционирования транспортных систем

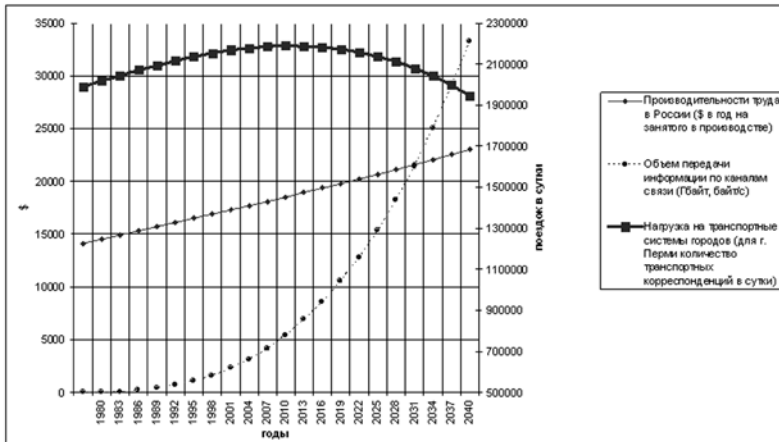
велосипеда женихи стали выбирать себе невест гораздо дальше от места жительства их рода, и проблема наследственных, генетически обусловленных болезней была решена.

Еще раз стоит отметить, что необходимость в качественном информационном обмене между людьми определяет назначение и роль транспортных систем в городах. Задачи транспортировки сырья, продукции и даже средств производства не являются определяющими в процессе функционирования и развития транспортных систем городов.

Изменение нагрузки на транспортные системы городов есть алгебраическая разность между функцией роста производительности труда и ростом возможностей и качества современных каналов связи.

На рис. 1.13 представлен, в частности, график роста производительности труда в промышленном производстве в России. На 2011 г. производительность труда в промышленности составляла 16–17 тыс. долларов США в год на одного занятого в промышленности работающего. Параболическая кривая на рис. 1.13 показывает объемы передаваемой по каналам связи информации. В свою очередь, этот объем зависит как от собственно накопленного в мире объема формализованной информации, хранящейся на различных носителях, так и от скорости передачи информации по каналам связи. По некоторым экспертным оценкам, объем хранимой в сети Интернет информации удваивается за каждые полтора года. Однако пропускные возможности каналов связи увеличиваются гораздо медленнее. Можно представить интересующую нас зависимость в виде произведения объемов потенциально передаваемой информации на среднюю скорость каналов связи, например в сети Интернет. После этого нетрудно представить кривую изменения нагрузки на транспортную систему такого города, как Пермь.

На рис. 1.13 представлена также кривая изменения количества транспортных корреспонденций в Перми за сутки, где в 2011 г. этот показатель составлял 2 млн 150 тыс.



**Рис. 1.13.** Прогноз нагрузки на транспортные системы городов

Рассматривая динамику изменения нагрузки на транспортную систему городов, можно отметить, что в 80-е гг. прошлого века рост производительности труда одновременно с опережающим ростом автомобилизации по сравнению с протяженностью УДС породил стремительное увеличение нагрузки на транспортную систему. В настоящее время развитие систем связи (сети Интернет) начинает сглаживать рост объемов информационного обмена между людьми, так как часть нагрузки с транспортной системы переходит в системы связи.

Представляется, что к 2040 г. технологии обработки информации существенно снизят потребности в личном общении людей, они научатся нужную информацию очищать от ненужной. В обозримой перспективе эта тенденция еще более усилится в связи с тем, что по информационным каналам удастся передавать не только голографическое изображение и звук, но и вкусовые и тактильные ощущения, запахи. Системы связи будут обеспечивать качество передачи информации от человека к человеку, сравнимое с личным непосредственным общением. Нагрузка на транспортные системы существенно снизится.

### **Транспортные системы в материальном потреблении**

Сложно оценивать роль транспорта как отрасли производства в удовлетворении культурно-бытовых и рекреационных корреспонденций жителей городов, общая доля которых составляет до 50% объема транспортных передвижений. Очевидно, что такой существенный объем транспортной работы никак не связан ни с производством, ни даже с материальным потреблением.

Процесс материального потребления человеком, разумеется, использует ресурсы транспорта и в этом случае действительно определяет транспорт как отрасль производства [82, 120], причем не самостоя-

тельную. Это станет очевидным, если исходить хотя бы из того факта, что в многофакторной модели совокупного ВВП страны (ВРП региона) переменная транспортной работы будет играть роль естественного ограничителя и входить со знаком минус в состав целевой функции. Это, в свою очередь, означает, что целевой функцией транспорта как отдельной отрасли производства будет минимизация транспортной работы. В сфере материального потребления транспорт является всего лишь одним из звеньев технологического цикла производства продукта (услуги) потребления.

Представим условно типичные стадии жизненного цикла товара или услуги (рис. 1.14).



**Рис. 1.14.** Стадии производственного цикла движения товара

Транспортная работа в той или иной мере обязательно присутствует на каждой из стадий производственного цикла, будь то перевозка на значительные расстояния полезных ископаемых на перерабатывающие заводы или транспортировка одной сборочной единицы будущего изделия на заводском конвейере. В каждый момент времени цель будет оставаться неизменной – минимизация транспортной работы. Нет смысла рассматривать этот процесс как функцию транспортной системы.

Совершенствование технологии как всего промышленного производства, так и производства отдельного товара может в определенный момент своего развития скачкообразно свести к минимуму транспортную работу как составляющую цикла производства отдельного товара, тем самым полностью (или почти полностью) исключив из этого процесса роль транспорта. В связи с этим можно сделать вывод, что именно технологии производства, а не технологии транспорта служат лимитирующими факторами его участия в промышленном производстве.

Но движение готового товара (услуги) к конечному потребителю в качестве определяющей имеет также информационную составляющую. В первую очередь человек нуждается не в самом товаре, а в потреблении качественной информации о товаре, и лишь потом, после обработки этой информации он приобретает и потребляет необходимый ему товар (услугу). Этот этап жизненного цикла товара невозможно сократить технологически именно вследствие присутствия в нем существенной информационной составляющей, которая

определяет *назначение и роль транспортных систем* в современном обществе.

### Транспортная доступность и транспортные издержки

Перемещение не является само по себе благом и представляет собой скорее «неизбежное зло», связанное с осуществлением социальной, экономической и другими составляющими жизнедеятельности индивидуума, главная из которых – необходимость обмениваться информацией с другими людьми.

Экономические затраты лимитируют объемы транспортных перемещений для каждого человека индивидуально. Экономия на перемещениях приводит к потере качества получаемой человеком информации. Перемещения с равной стоимостью по-разному воспринимаются субъектами с различными душевыми доходами. Одна и та же стоимость несет с собой одинаковое общественно необходимое время для своего создания, но разную величину личного времени субъекта.

В системе затрат (времени и денег) качество и назначение транспортных систем целесообразно рассматривать в двух плоскостях (рис. 1.15):

- обеспечение транспортной доступности;
- снижение транспортных издержек.

Задачи обеспечения транспортной доступности решались одновременно с этапом пионерского освоения территорий, а он был завершен на планете к началу XX в. Интересно, что задачи обеспечения транспортной доступности и снижение транспортных издержек во всем мире обычно возникали и решались последовательно. И только в нашей стране, в силу существенной неравномерности плотности насе-

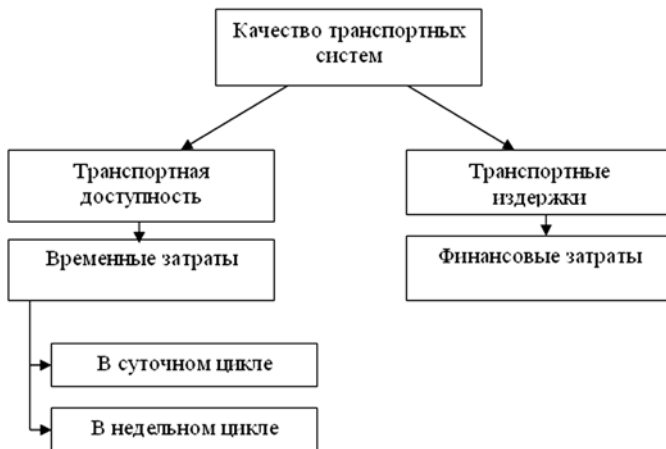


Рис. 1.15. Параметры оценки качества транспортных систем

ления задача снижения транспортных издержек (преимущественно в городах) появилась задолго до возникновения проблемы обеспечения транспортной доступности заселенных территорий. Сейчас эти две проблемы существуют в России одновременно.

Исторически сложившееся в годы советской власти, индустриализации и освоения Сибири и Дальнего Востока искусственное базовое расселение населения и распределение мест приложения труда в настоящий момент только тормозит развитие территорий. В стране наблюдаются антропопоки, выравнивающие этот искусственный дисбаланс между естественными и искусственными движущими силами миграции. Это есть некоторая особенность современной России, которая выделяет ее из общих современных миграционных процессов.

Качество жизни, обеспечиваемое техническими системами в крупных городах, особенно в северных, уступает в предпочтениях современного мобильного человека качеству среды обитания, обеспечиваемое в большей части природными системами (в южных городах).

Рост транспортных издержек городского сообщества и нерешенность задач обеспечения транспортной доступности значительной части населения затрудняет нахождение в обществе согласия в вопросах стимулирования либо сдерживания автомобилизации населения. Издержки общества от автомобилизации растут, и по-прежнему для значительной части населения страны обладание личным автомобилем – это заветная цель.

Транспортная доступность аналогична понятию свободы. Для животного мира это прежде всего свобода перемещения, для человека, кроме этого, существуют понятия свободы выбора, действий и принятия решений. В обществе ценятся не сами факты принятых решений, а потенциальная возможность их принятия в будущем. Транспортная доступность и свобода перемещений связана с астрономическими циклами времени и привязанными к ним жизненными человеческими циклами поведенческой активности. Эти временные циклы разделяют понятия «транспортная доступность» и «транспортные издержки» при рассмотрении различных потребностей человека в передвижениях с разными целями.

Транспортная доступность определяется самим человеком через предельную величину транспортных издержек, связанных с поездкой к конечной точке назначения на любом виде транспорта, имеющемся в его распоряжении. Но в зависимости от назначения и целей этой поездки транспортные издержки могут быть выражены во времени либо в финансовых затратах.

Транспортная доступность обычно обусловлена только временем. Финансовые затраты на осуществление перемещения не определяют транспортную доступность территории (объекта). Например, при рассмотрении качества региональной транспортной системы транспорт-

ная доступность определяется следующими максимальными транспортными издержками по регулярности корреспонденций:

- в суточном цикле – 1,5–2 часа;
- в недельном цикле – 6–8 часов.

Ежедневно человек не может тратить больше 3–4 часов, например, на реализацию своих трудовых корреспонденций. В противном случае такие потери времени сводят на нет его усилия по повышению собственного уровня качества жизни посредством получения дополнительных материальных благ. Потери в качестве и объеме информационного потребления, сопутствующие процессу транспортировки человека к месту приложения труда, оказываются весомее получения дополнительных материальных благ.

В недельном цикле возможны перемещения с целями удовлетворения потребностей, связанных с культурным досугом или активным отдыхом, а также безальтернативной необходимостью посещать места оказания специфических услуг органами государственного и муниципального управления в центрах муниципальных образований либо в региональном центре. Временные затраты на подобные перемещения, превышающие 6–8 часов, делают такие услуги не востребованными, а места их оказания – транспортно-недоступными.

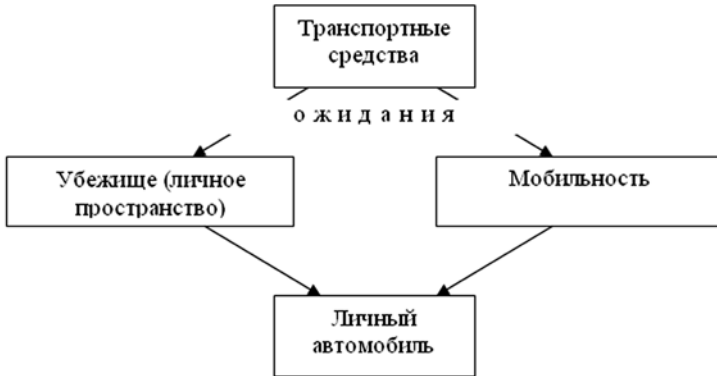
*Транспортные издержки* – это плата за возможность получать качественную информацию. Человек готов платить за нее деньгами и своим временем. Из этого вытекает стремление индивидуумов так организовать свои внутригородские перемещения, чтобы психофизиологическая энергия, затрачиваемая на осуществление этого процесса, была наименьшей из возможных.

#### **1.4.2. Ограничения развития транспортных систем на урбанизированных территориях**

##### **Ресурсные ограничения развития транспортных систем**

С одной стороны, развитие коммуникационных возможностей современных систем связи снижает подвижность людей; с другой стороны, рост объемов формализованной информации приводит к ее загрязнению (замусориванию и появлению паразитной информации) и снижает качество информационного обмена между людьми с использованием технических систем. Это рождает потребность прибегать к иным способам качественного обмена информацией друг с другом – личному общению, что, в свою очередь, повышает подвижность людей.

В каждой периодической фазе жизненной активности у человека формируются довольно стабильные запросы к локальной окружающей среде, причем в последнее время они все больше разделяются



**Рис. 1.16.** Требования к транспортным средствам в системе

(можно сказать, разбегаются в противоположные стороны). Становятся важны обе составляющие (рис. 1.16):

- убежище (обеспечение личного пространства);
- быстрая мобильная жизнь в экономике.

При решении задачи удовлетворения человеком своих транспортных потребностей обладание личным автомобилем удовлетворяет сразу всем его запросам. Только личный автомобиль сохраняет индивидуальность людей и одновременно способствует ускорению их мобильности в экономической жизни.

Решение задачи перемещения одного человека лимитируется собственными его физическими размерами, и это есть *первое ограничение развития транспортных систем*. Личный автомобиль конструктивно ограничен «снизу», то есть только физическими размерами человека. Можно отметить, что за последние десятилетия автомобилестроители мира существенно увеличили внешние габариты практически всех известных марок автомобилей.

Однако в городах повсеместно возникает конфликт интересов каждого в отдельности человека с его запросами, в том числе в области личных транспортных потребностей и интересов сообщества людей в рациональном использовании территорий общего пользования. Откликаясь на этот конфликт, транспортные системы любого крупного современного города предлагают своему жителю значительный выбор средств для его доставки к месту назначения основными и принципиально различными видами транспорта, включая общественный транспорт и личный автомобиль. Баланс между видами транспорта определяется *вторым ограничением развития транспортных систем* – наличием свободных территорий.

Ресурсное потребление дорожно-транспортного комплекса города имеет следующие составляющие: потребление территории и потре-



ние энергии. Оба эти показателя, соотнесенные с объемами итоговой транспортной работы дорожно-транспортного комплекса, определяют одну из трех составляющих показателя эффективности функционирования всей транспортной системы города, состоящего из скорости реализации транспортных корреспонденций; объемов потребленных ресурсов; величины техногенных рисков.

В современных условиях основным показателем оценки эффективности функционирования дорожно-транспортного комплекса крупного города является показатель провозной способности его улично-дорожной сети в сочетании с имеющимся парком транспортных средств. Основное влияние на конечные показатели этого обобщенного критерия оказывает эффективность функционирования городского пассажирского транспорта общего пользования.

Например, для Перми доля общественного транспорта в транспортном потоке по центральным улицам составляет в среднем 6–9% от суммарного потока. Его доля в среднем по всем перегонам в суммарном потоке равна 7,34%. С учетом того, что эта доля постоянно сокращается ввиду объективных причин – роста благосостояния населения и увеличения парка индивидуальных транспортных средств и субъективных – низкой привлекательности городского пассажирского транспорта общественного пользования (ГПТОП), можно сделать вывод о том, что в существующих условиях последний не только не оказывает существенного влияния на обобщенные показатели качества функционирования транспортной системы, но и постепенно вытесняется с главенствующих позиций в реализации транспортных потребностей городского населения.

Оценивая ресурсное потребление человечества в целом и транспортной системы в частности, надо отметить, что проблема обеспечения человечества продовольствием отходит на второй план, во-первых, потому, что место проживания человека уже не связано с местами размещения сельскохозяйственных угодий и производства, а во-вторых, в современном мире производительные силы достигли такого уровня развития, что для жизнеобеспечения человечества достаточно 15–20% имеющейся рабочей силы. Становится понятным, что проблема заключается не в ресурсном ограничении, не в глобальном недостатке энергии, а в социальных механизмах управления и распределения знаний, капитала и богатств земли. Точнее говоря, дефицитными сегодня становятся коммуникационные ресурсы распределения знаний, капитала и богатств земли.

Центрами концентрации знаний, финансовых ресурсов, а также их распределения являются города. Концентрация населения в городах позволяет с наименьшими потерями обеспечить транспортировку продуктов питания от сельскохозяйственного производителя до конечного потребителя – человека. То же можно сказать и о других

благах цивилизации, предоставляемых современными технологиями, однако новые ресурсные ограничения развития человеческого общества отчетливо проявляются как раз в крупных и крупнейших городах.

Доминирующим фактором, сдерживающим развитие в них транспортных систем, является ограниченность городской территории, выделяемой обществом для реализации своих транспортных потребностей.

Общественный транспорт обеспечивает значительно более экономичное использование проезжей части дорог и улиц при обслуживании пассажиропотоков, а значит, улучшает общую производительность улично-дорожной сети и эффективность использования территорий общего пользования в городах. Установлено, что участок улицы с максимальной пропускной способностью пассажиропотока 1,4 тыс. чел./ч на легковых автомобилях может обеспечить пропуск пассажиропотока объемом до 10–15 тыс. чел./ч на общественном транспорте. Использование городского пассажирского транспорта общего пользования снижает загруженность улицы моторизованным движением и, как следствие, риск ДТП и стресс для городской окружающей среды.

Рассчитаны зависимости между типом пассажирского транспортного средства и площадью проезжей части, необходимой для перевозки 1 пассажира (табл. 1.3).

Таблица 1.3

**Зависимость между типом транспортного средства и потребностью в площади проезжей части улицы из расчета перевозки 1 пассажира**

Тип пассажирского транспорта	Количество перевозимых пассажиров при различной вместимости, чел. (полная/средняя)	Площадь проезжей части, м <sup>2</sup> , на 1 пассажира (полная/средняя)	
		в неподвижном состоянии	при скорости 50 км/ч
Легковой автомобиль	4 / 1,4	3,75 / 10,7	59,3 / 169,0
Автобус	86 / 34	0,41 / 1,03	3,47 / 8,77
Скоростной трамвай	270 / 108	0,34 / 0,84	1,56 / 3,90

Способность систем транспорта обеспечивать значительную транспортную перевозочную работу на ограниченных площадях определяет провозную способность систем транспорта. Ориентировочные провозные способности и скорости сообщения различных видов транспорта приведены в табл. 1.4.

Кроме этого, общественный транспорт:

Таблица 1.4

**Относительные параметры функционирования различных систем транспорта**

Вид транспорта	Макс. частота движения, пар поездов в час пик (ед. подвижного состава)	Количество вагонов в составе	Ориентировочная провозная способность, тыс. пасс. в час пик	Скорость сообщения, км/ч
Метрополитен: – действующей системы – экспресс-метрополитен	40	6–8	40,0–54,0	35–45
	40	8–10	54,0–68,0	50–55
Пригородно-городская железная дорога, 2–4-путная	14–28	10–12	20,0–50,0	45–55
Городской скоростной внеуличный рельсовый транспорт мини-метрополитен, наземный легкий метрополитен	14–30	4–6	15,0–30,0	25–35
Скоростная транспортная система «город–аэропорт»	14	6	20,0	70–80
Трамвай	30	1–2	3,4–6,8	15–20
Автобус – экспресс – обычный	Определяется условиями организации дорожного движения	1	–	25–35
		1	–	18–20
Троллейбус	40	1	3,5–4,7	18–20
Малогабаритный наземный транспорт микроавтобус	Определяется условиями организации дорожного движения	1	–	в потоке

1) более экономичен, из расчета количества потребленного энергосредства (и связанного с этим загрязнения окружающей среды) на перевозку 1 пассажира по сравнению с личным легковым транспортом;

2) более безопасен, учитывая профессиональное управление и содержание подвижного состава. Поэтому риск попасть в ДТП для

пассажира общественного транспорта статистически намного ниже, чем для пассажира легкового автомобиля, управляемого водителем «любителем»;

3) подвижной состав занимает в статическом состоянии значительно меньше места из-за отсутствия необходимости паркования подвижного состава в течение рабочего дня.

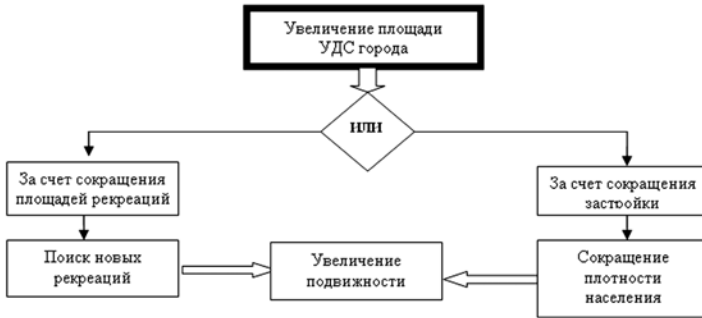
За день на УДС крупного города выезжает около 50% общего количества зарегистрированного парка индивидуальных транспортных средств в городе. В течение 12 часов рабочего дня в среднем каждый автомобиль находится в движении около 90 минут. В оставшееся время автомобиль находится припаркованным вне места своего постоянного хранения, чаще всего на территориях общего пользования в системе УДС города.

Концентрация населения в городах увеличивается, территориальные ресурсы (пропускная способность коммуникаций) интенсивно потребляются, а городское сообщество строит новые и все более мощные коммуникации, которые тут же притягивают к себе новые пассажиропотоки, плотность которых растет, и ресурса опять не хватает. Это приводит к дальнейшему осложнению состояния и условий движения на УДС города, снижению ее провозной способности, уменьшению привлекательности общественного транспорта, росту спроса на передвижения с использованием индивидуального транспорта и увеличению интенсивности движения. Спираль городских транспортных противоречий (рис. 1.17) иллюстрирует этот процесс и определяет динамику автомобилизации населения крупного города.

Очевидно, что возрастающая вследствие этого плотность коммуникаций, предназначенных для удовлетворения потребности в пере-



Рис. 1.17. Спираль генерации автомобилизации населения города



**Рис. 1.18.** Экстенсивный путь развития улично-дорожной сети города

мещении людей (дороги), также величина конечная. Кроме того, расширение транспортных коммуникаций – это процесс с отрицательной обратной связью, приводящий к росту подвижности населения (рис. 1.18).

Ограниченность возможностей транспортных коммуникаций есть основная причина сдерживания развития как транспортных систем в городах, так и всей индустриальной фазы развития человеческого общества (рис. 1.19). Транспортные возможности территорий определяются в первую очередь физическими размерами объектов транспортировки, для пассажирских перемещений это физические размеры самого человека.

Как показывает российская практика, следование экстенсивному пути увеличения пропускной способности транспортной сети на фоне продолжающегося роста уровня автомобилизации и сопутствующего ему увеличения подвижности на индивидуальном транспорте не приносит ожидаемого результата. Даже при значительном объеме капитальных вложений в дорожное строительство практически невозможно успеть за все возрастающим спросом на передвижения. Опыт многих европейских городов, столкнувшихся с подобными проблема-



**Рис. 1.19.** Ограничения развития транспортных систем городов

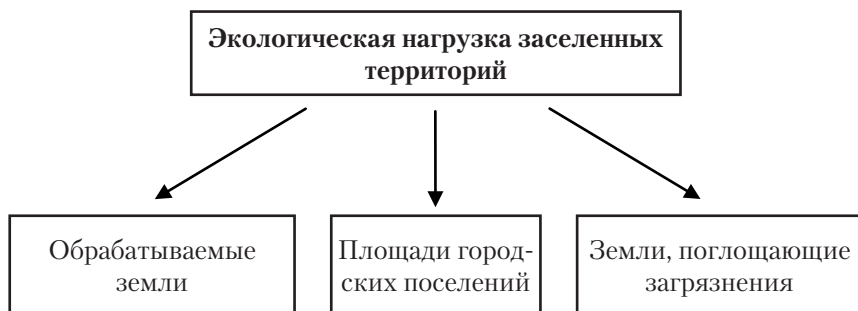
ми, подтверждает, что оптимальной стратегией является комплексный подход к развитию индивидуального и общественного транспорта при значительной регулирующей роли городского сообщества. Ни одному городу пока не удалось полностью удовлетворить спрос на передвижение на индивидуальном транспорте.

Итак, можно сделать вывод о том, что сам по себе экстенсивный путь развития УДС – тупиковый, не решающий проблемы, но ухудшающий качество жизни населения в городах.

### **Экологические ограничения развития транспортных систем**

Кроме предела физической плотности транспортной инфраструктуры, развитие транспортных систем будут лимитировать возможности окружающей среды утилизировать негативное влияние функционирования технических систем на отдельной территории.

Имеет смысл оценивать способность окружающей среды утилизировать негативное влияние транспорта также через площади необходимых для осуществления этой утилизации свободных территорий. Аналогично определяются и общие характеристики влияния человека на окружающую среду. Всемирный фонд защиты природы для этих целей формулирует понятие адаптированной экологической нагрузки (EF, ecological footprint – экологический след), разработанное группой Матиса Вакернагеля, которое определяет экологическую нагрузку как площадь территорий, требующихся для того, чтобы обеспечить человека всем необходимым при современном стиле его жизни (рис. 1.20). Экологическая нагрузка рассчитывается в гектарах.



**Рис. 1.20.** Структурная схема оценки экологической нагрузки (экологического следа)

При переходе к рассмотрению территорий городов и их транспортных систем также целесообразно придерживаться принципов, предложенных М. Вакернагелем. При рассмотрении баланса использования городских территорий становится очевидной связь размеров экологического следа, оставляемого транспортной системой города, и ограничивающей ее развитие городской территорией (рис. 1.21).



**Рис. 1.21.** Структурная схема оценки экологической нагрузки городской территории

Как и в области развития коммуникаций по передаче информации, научно-технический прогресс отчасти отодвигает точку перехода объемов экологической нагрузки за предел их регенерации природной системой. Но антропопоток постоянно растет и движется из тех областей, где коммуникации строить экономически невыгодно, в те области, где их строить технически невозможно. В таких условиях процесс транспортного планирования на урбанизированных территориях определяет уже не качество жизни поколения живущих на территории людей, а качество жизни последующих поколений.

Основной задачей развития транспортных систем в городах становится формирование устойчивых природно-технических систем. Устойчивость транспортной системы – это ее способность удовлетворять транспортные потребности человека в настоящем, не лишая при этом будущие поколения возможности удовлетворять их транспортные потребности [91].

Предел насыщения территории коммуникациями можно с уверенностью назвать началом нового фазового перехода, и определять этот предел будет плотность транспортных коммуникаций как единственное ограничение, обусловленное физическими размерами человека.

### 1.4.3. Понятие эффективности транспортной системы крупного города

В последнее время довольно распространена практика, когда при обсуждении различных вопросов в области функционирования транспортных систем городов во главу угла ставятся вопросы управления транспортными потоками. Это относится как к научному сообществу, так и к предметным специалистам-практикам и ответственным чиновникам городского управления.

Нередки случаи, когда без достаточного понимания конечной цели работы транспортных систем городов для специалиста такой целью

становится собственно само управление в ранге самоцели. При этом ориентирами в ее достижении представляются видимые микропоказатели работы улично-дорожной сети на отдельных ее элементах, например малоформализованные понятия «пробки», «очереди» и т.п. Это важно для решения задач оперативного управления дорожным движением (в реальном времени), но неприменимо к задачам транспортного планирования города, которые решаются посредством использования инструментов и средств организации дорожного движения.

В свою очередь, средства организации дорожного движения являются неотъемлемой частью дорожно-транспортного комплекса города, а следовательно, самой транспортной системы, а не отдельной управляющей (надсистемной) надстройкой, как это представляется в отдельных исследованиях в области управления транспортными потоками.

Для начала требуется определить смысл понятия «эффективная транспортная система». Термин «эффективность» впервые появился в экономической теории. *Эффективность* – это результативность процесса, операции, проекта, определяемая как отношение эффекта, результата к затратам, обусловившим его получение [1].

*Экономическая эффективность* – результативность экономической системы, выражающаяся в отношении полезных конечных результатов ее функционирования к затраченным ресурсам. Не теряя общности, данное понятие можно отнести и к транспортной системе: *эффективность транспортной системы* – это отношение полезных конечных результатов ее функционирования к затраченным ресурсам.

Термин «эффективность» можно применить и к процессу управления транспортной системой, как и к любому другому процессу, ибо он означает уровень соответствия результатов какой-либо деятельности поставленным задачам или, иными словами, способность производить определенный эффект (мера производимого эффекта). В отношении транспортной системы представляется интересным обосновать и сформулировать понятие эффекта ее функционирования, а также меру его измерения.

Цель функционирования транспортной системы города, как и любой природно-технической системы, заключается в повышении качества жизни на той территории, где она функционирует (рис. 1.22). Целевой показатель функционирования транспортной системы города – время. Потребляемые ресурсы – это энергия и территория города. Они являются ограничениями в достижении цели. Энергия, в свою очередь, из-за несовершенства технологий ее преобразования в полезную транспортную работу, а также человеческого фактора порождает дополнительные ограничения, накладываемые на выбросы загрязняющих веществ, шум, риски возникновения дорожно-транспортных происшествий.



Отсюда задача эффективной транспортной системы города – доставлять максимум целевой функции (минимизация времени реализации транспортных корреспонденций всех жителей всеми видами транспорта) при удовлетворении заданных территориальных ограничений.

В качестве целевого показателя функционирования транспортной системы крупного города целесообразно рассматривать среднее время реализации транспортных корреспонденций, выражающее среднее время, затрачиваемое одним человеком на совершение одной транспортной корреспонденции.

$$t_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i,j} t_{ij} \sum_{i,j} x_{ij}}{\sum_{i,j} x_{ij}} \quad (1.1),$$

где

$$t_{ij} = \frac{\sum_k t_{kij} \sum_k x_{kij}}{\sum_k x_{kij}},$$

$$x_{\bar{j}} = \sum_k x_{kij}$$

$x_{ij}$  – элементы матрицы корреспонденций;  $t_{ij}$  – элементы матрицы затрат, рассчитывается как средневзвешенное от нагрузок путей;  $x_{kij}$  – нагрузка пути номер  $k$  из района  $i$  в район  $j$ ;  $t_{kij}$  – время пути номер  $k$  из района  $i$  в район  $j$  в нагруженной сети.

Как видно из схемы (рис. 1.22), нет необходимости в качестве отдельного критерия оценки функционирования транспортной системы выделять ее безопасность. Безопасность системы, в том числе транспортной, находится в сфере *экзистенциальных потребностей человека* – в безопасности существования, комфорте, постоянстве условий жизни.

Основной формализованный критерий оценки безопасности транспортной системы – это риск возникновения дорожно-транспортных происшествий. Риск ДТП есть вероятность потери устойчивости функционирования транспортной системы. Минимизация этого риска, в свою очередь, отвечает основной задаче эффективности – снижению потребления ресурсов, в частности энергии. Отсюда следует вывод о том, что эффективная транспортная система одновременно является безопасной. Она не может быть опасной в силу того, что

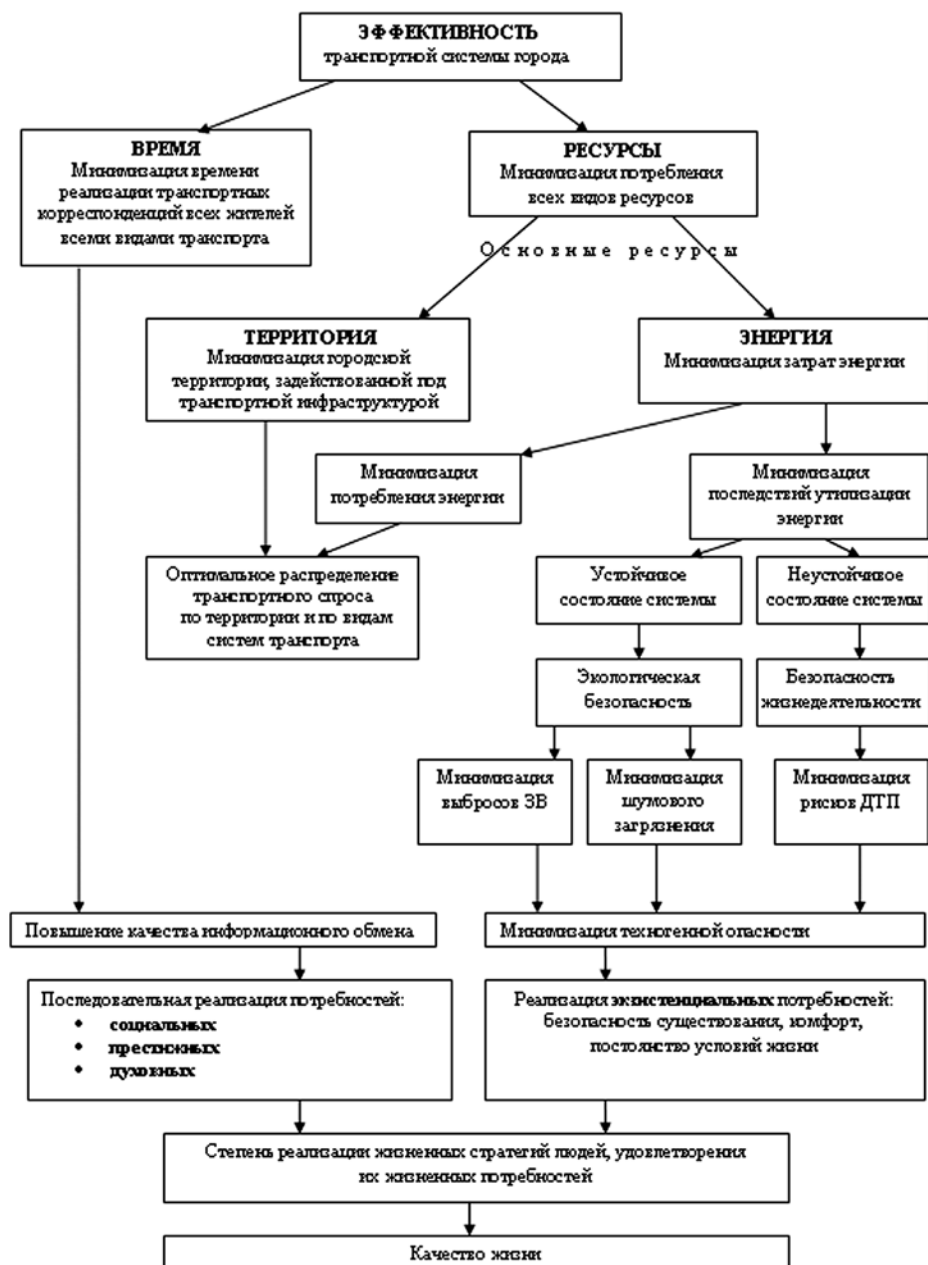


Рис. 1.22. Схема оценки эффективности транспортной системы города

все решение задач по повышению ее эффективности (регулирование транспортного спроса, его оптимальное распределение по территории, снижение энергоемкости общего объема городских перевозок и т. п.) автоматически повышает общую техногенную безопасность всей природно-технической системы.

Общий рост объемов транспортных передвижений с целью удовлетворения информационных потребностей будет следовать за ростом производительности труда и увеличением непроизводственного сектора экономики города. Вместе с тем ожидаемые тенденции роста потребностей современного человека в удовлетворении своих социальных, престижных и духовных потребностей будут накладывать все более жесткие требования к эффективности функционирования транспортной системы города как части информационной системы.

### **Выводы**

Привычная, сложившаяся на протяжении последних 50 лет практика рассмотрения функционирования транспортных систем как отдельной отрасли производства не позволяет формулировать задачи эффективности функционирования транспорта, в частности транспортных систем городов. Сформировавшиеся научные направления в области исследований автотранспортного комплекса, а также взаимодействия составляющих: водитель – автомобиль – дорога (ВАД), к сожалению, не отвечают на вопрос о необходимости и достаточности существования и функционирования этого комплекса как самостоятельного объекта исследования, так и во взаимодействии с внешней средой.

Транспорт городов в понимании различных слоев общества по профессиональному и социальному статусу несет на себе широкий спектр функциональной нагрузки – от экономического потенциала развития города до социально ориентированной сферы предоставления муниципальных услуг. Широта трактовки назначения транспортных систем городов затрудняет выстраивание методики оценки качества и эффективности функционирования городского хозяйства, делает невозможным выработку единых критериев и целей развития транспортных систем. В работе предложено некоторое, в первую очередь терминологическое, переосмысление основных устоявшихся понятий, связанных с назначением транспорта в крупных городах.

До настоящего времени практически отсутствуют исследования в области анализа взаимодействия потребностей и возможностей функционирования транспортных систем городов. Недостаточно изучены в целом результаты воздействия дорожно-транспортного комплекса на территорию города, не сформулированы основные ограничения функционирования транспортных систем.

Предлагается рассматривать транспортную систему города как часть информационной системы, а целевым критерием при рассмотрении функционирования городского транспорта считать качество жизни на территории. Качество жизни населения городов следует определять через качество его среды обитания и качество (полноту) удовлетворения жизненных потребностей, в первую очередь социальных, престижных и духовных.

Ограничения развития транспортных систем предложено обобщенно формализовать через территориальные ограничения. Как ограничения в физическом развитии дорожно-транспортного комплекса и его инфраструктуры, так и способность к утилизации негативной сопутствующей энергии в работе систем транспорта можно выразить через восстановительный потенциал территории.

Эффективность транспортной системы следует рассматривать в классическом (экономическом) понимании этого термина – как отношение произведенного транспортной системой эффекта в области повышения качества жизни к понесенным затратам, также связанным с качеством жизни.

С целью оценки принципиальной возможности действующей транспортной системы удовлетворять имеющийся на исследуемой территории транспортный спрос необходимо проведение исследований транспортного баланса территории, результатом которых станет формирование основы для последующего построения «нижних» ограничений оптимальной модели формирования эффективной транспортной системы крупного города.

## **Глава 2**

# **МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТНОГО АНАЛИЗА ГОРОДСКОЙ ТЕРРИТОРИИ**

Подход к формированию эффективной транспортной системы крупного города с методической точки зрения абсолютно идентичен широко применяемым в экономической науке маркетинговым технологиям исследования рынка. Функционирование транспортной системы крупного города в этом плане есть аналог экономических взаимоотношений между поставщиками и потребителями транспортных услуг. Существенное отличие заключается лишь в том, что и поставщики транспортных услуг (городское сообщество), и их потребители (участники дорожного движения) являются одними и теми же субъектами отношений.

Так же, как и в классическом соотношении «спрос – предложение», при рассмотрении функционирования транспортной системы города целесообразно разделять транспортный спрос и транспортное предложение, а результат удовлетворения одного другим будет, в свою очередь, определять качество функционирования транспортной системы города. Как спрос на товар рождает предложение, так и потребности жителей в транспортных перемещениях определяют потребности общества в объемах и качественных параметрах функционирующего на этой территории дорожно-транспортного комплекса.

Как отмечено в главе 1, основным ограничением в развитии дорожно-транспортного комплекса выступает городская территория. Многофункциональность ее использования приводит задачу развития улично-дорожной сети к задаче эффективного землепользования.

С точки зрения оценки транспортной системы города первым и необходимым шагом в решении этой задачи является оценка использования городской территории. Известные на сегодняшний день подходы к формированию оптимального баланса ее использования определены в градостроительных нормативных документах, и прежде всего каса-

ются площади, занятой под объектами транспортной инфраструктуры (км/км<sup>2</sup>). Однако без оценки общего баланса использования территории города параметр плотности УДС не может определять критерии качества работы транспортной системы. Для такой оценки требуется совместный анализ различных параметров использования территории, влияющих не только на объемы транспортного предложения, но и на объективные факторы, формирующие транспортный спрос.

## 2.1. Анализ использования городской территории

Научно-технический прогресс совершенствованием технических систем, развитием техники и технологий позволяет преодолевать значительную часть ограничений, связанных с повышением качества жизни людей. Из всех существующих в мире ограничений самым важным и определяющим следует считать ограниченность территории – поверхности Земли. В городах с компактным проживанием людей оно уже давно не представляется абстрактным утверждением. Города вынуждены сохранять строгий баланс использования своих территорий для создания условий эффективного функционирования природно-технических систем, обеспечивающих высокое качество жизни городского населения. Именно баланс использования территории определяет базовые условия функционирования транспортных систем в городах.

Структурная схема территориального баланса применительно к функционированию транспортной системы приведена на рис. 2.1.

Важным представляется анализ существующего в городе баланса использования территории с целью определения теоретической возможности эффективного функционирования транспортной системы в условиях неизменности этого баланса.



Рис. 2.1. Схема транспортного баланса территории города

### 2.1.1. Пространственно-неравномерная модель формирования транспортного спроса

Первоочередной и определяющей задачей при проведении транспортного анализа любой территории является дискретизация исследуемой области. С целью формализации области исследования, а также параметров транспортного спроса и транспортного предложения территория исследуемого города должна быть представлена в виде набора подобластей, каждая из которых наследует набор параметров, аналогичный всей исследуемой территории.

С целью районирования территории города для последующего транспортного анализа и построения транспортных моделей целесообразно использовать основные принципы построения неравномерно-районированных моделей пространственной организации городов.

В частности, при создании модели транспортного спроса приходится решать задачи, аналогичные тем, которые возникают в градостроительной науке при формировании модели современного городского расселения, формирования и закрепления мест приложения труда.

Основа создаваемых моделей городской структуры – градостроительные технологии, в частности построение модели неравномерно-районированной пространственной структуры города [14, 122], которая описывает устойчивое взаимоотношение расположения основных типов городских сред, районов и объектов, базирующееся на двух фундаментальных основах поведения людей в городе. К первой из них относится ориентация на публичное поведение – коллективное пребывание, связанное с общением с другими людьми, происходящее в доступном для всех желающих пространстве, ко второй – ориентация на приватное поведение – индивидуальное пребывание, связанное с ограничением доступа других людей, строгой регламентацией их круга (например, членами семьи), замкнутое на себя. Подобное поведение определяется сложившейся системой человеческих ценностей и потребностей при сосуществовании в современном человеческом обществе (пирамида Маслоу), а также физиологическими и экзистенциальными потребностями, тогда как публичное поведение – социальными, престижными и духовными потребностями человека [41].

Под влиянием этих упорядочивающих поведенческих ценностей происходит постепенное, эволюционное формирование пространственной структуры города в виде *узловых районов*, которое характеризуется:

– неоднородностью – в центре и вокруг него концентрируются виды деятельности, связанные с публичным поведением, а на периферию узлового района вытесняются приватные ситуации, жилье или территории ограниченного доступа;

– неравномерностью – по мере продвижения от центра к периферии изменяются показатели всех явлений городской жизни (например, плотность населения на единицу территории, стоимость одного квадратного метра жилья на рынке недвижимости, объем товарооборота на единицу площади торгового зала и т. п.), а величина этих показателей зависит от расстояния до центральной точки (точки отсчета) города;

– зависимостью степени разнообразия среды от места в городе, которое меняется по мере продвижения от центра к периферии. Например, наивысшее, избыточное разнообразие свойственно точке отсчета и прилегающим к ней участкам;

– интенсивность использования городской территории непрерывно повышается по мере его роста, однако в разных структурных элементах города этот процесс протекает с разной скоростью.

Неравномерно районированная модель как элемент модели пространственной структуры города во всех городах организована из одних и тех же элементов. Это пространственные единицы города – узловые районы разной величины и развитости, характеристики которых зависят от их места в структуре города. Они складываются из монофункциональных территорий (жилья, озеленения, производства) и коммуникативно-общественной системы (каркаса), которая формируется концентрацией объектов публичного назначения и высокой интенсивностью использования территории. Каркас включает главное ядро – участок наивысшей концентрации объектов обслуживания, плотности застройки, разнообразия предоставляемых услуг – и дополнительные ядра.

Эта пространственная схема воспроизводится во всех городах. Однако в каждом конкретном случае под влиянием природных, социальных, исторических и экономико-политических факторов она приобретает неповторимую, уникальную форму. С точки зрения транспортного анализа территории наиболее важно, что неравномерно-районированная пространственная организация является очень устойчивой, на долгие годы определяет путь развития городской транспортной системы и города в целом.

В целях долгосрочного планирования требуется выявление и фиксация так называемых городских точек роста. На территории города выделяются повторяющиеся локальные неравномерности – концентрации объектов обслуживания, офисов и другой активности.

В городском планировании неравномерно-районированная структура используется для построения стратегий экономического и социального развития и служит для принятия долгосрочных решений о локализации, привязке к местам планируемых социальных или экономических действий.



В градостроительстве неравномерно-районированная структура используется для установления территориальных зон и градостроительных регламентов при разработке правил землепользования и застройки. В ходе правоприменительной, повседневной практики управления использование методов идентификации неравномерно-районированной структуры обеспечивает соответствие интересов собственников и инвесторов текущим тенденциям и одновременно стратегическим целям развития города.

Представляет интерес использование предложенных подходов для построения модели, позволяющей оценивать эффективность использования городских территорий и влияние этого процесса на функционирование городской транспортной системы. В таком исследовании интересуют закономерности использования территорий города с точки зрения формирования транспортного спроса на передвижения. Эту модель назовем моделью городской структуры. Для ее формирования, кроме концентрации объектов обслуживания, обусловленных наличием мест приложения труда в сфере услуг, необходимы исходные параметры для определения генерации транспортных потоков.

Генерация транспортных потоков конкретного района пропорциональна целому набору факторов, главные из которых выражаются в численности:

- населения в районе;
- трудящегося населения в районе;
- учащихся в средних и высших учебных заведениях в районе;
- зарегистрированного индивидуального транспорта в районе.

Кроме этих факторов, существуют несколько трудноформализуемых параметров, относящихся к поведенческим особенностям населения того или иного транспортного района:

- уровень подвижности населения в районе;
- параметры априорных предпочтений жителей при выборе целей своих корреспонденций.

Следует отметить, что названные параметры определяют лишь будущую модель транспортного спроса на пассажирские перемещения.

С точки зрения деления города на транспортные районы, являющиеся генераторами и потребителями транспортных потоков пассажирского и грузового транспорта, интерес представляет районирование по следующим параметрам:

- плотность населения по различным группам;
- плотность застройки территории жилыми и нежилыми зданиями;
- плотность мест приложения труда, включая сферу услуг;
- моторизация территории по различным видам индивидуального и коммерческого транспорта;
- плотность освоения территории промышленными предприятиями различных отраслей.

Первоочередной интерес представляют технологии и алгоритмы оценки городских территорий с точки зрения возможности удовлетворения транспортного спроса. Для такой оценки необходимо особое представление обо всей исследуемой городской территории.

Все известные исследовательские подходы предполагают четкое определение объекта исследований. При исследовании транспортного спроса на городской территории таким объектом будет некая ограниченная область внутри нее – транспортный район (элементарная структурная единица городской территории, формализованная набором атрибутов, определяющих ее как генератор и потребитель транспортных потоков).

Надо понимать, что основной объем транспортного спроса, приходящийся на каждую отдельную часть исследуемой области (транспортный район), является для этой области внешним и определяется из общего пространственного анализа дислокации мест генерации и потребления транспортных потоков на всей исследуемой области. При этом основным допущением такого подхода является то, что мы пренебрегаем транспортными перемещениями внутри самого района. Это допущение будет вполне оправдано при уменьшении средней площади всех транспортных районов города до значений, сопоставимых с экономической целесообразностью совершения корреспонденции внутри транспортного района на каком-либо виде транспорта.

Например, при исследовании транспортного спроса, реализуемого на общественном транспорте (ОТ), таким критерием будет наличие в каждом транспортном районе не более одной остановки общественного транспорта одного маршрута. Подобные геометрические ограничения на дискретизацию исследуемой области предполагают минимальное количество транспортных районов для города с населением 1 млн жителей – 200 транспортных районов. Для исследования спроса на передвижения с использованием индивидуального транспорта (ИТ) можно использовать более крупное разбиение территории города.

Практика также показывает, что при хорошем уровне обеспеченности инфраструктурой для легкого движения (велосипедное, пешеходное) население европейских городов принимает решение о средстве внутригородского перемещения следующим образом:

- до 2 км – пешком;
- до 8 км – на легком транспорте (велосипед, ролики, самокат);
- свыше 8 км – на общественном транспорте или личном автомобиле.

Проведенные исследования при прочих различиях определяют равенство показателей среднего расстояния для пешего передвижения в различных городах (табл. 2.1).

При этом будет сохраняться почти равное значение времени реализации таких перемещений (табл. 2.2).

Таблица 2.1

**Расстояние, преодолеваемое посредством различных видов транспорта  
одним жителем, км [123]**

Вид передвижения	Место проведения исследований	
	Россия (Екатеринбург)	Великобритания (Лондон)
Легковой автомобиль	6,0	23,6
Пешком	0,8	0,8
Двухколесный транспорт	2,4	0,3
Автобус	6,1	1,1

Таблица 2.2

**Средние затраты времени на суточные передвижения (минут)**

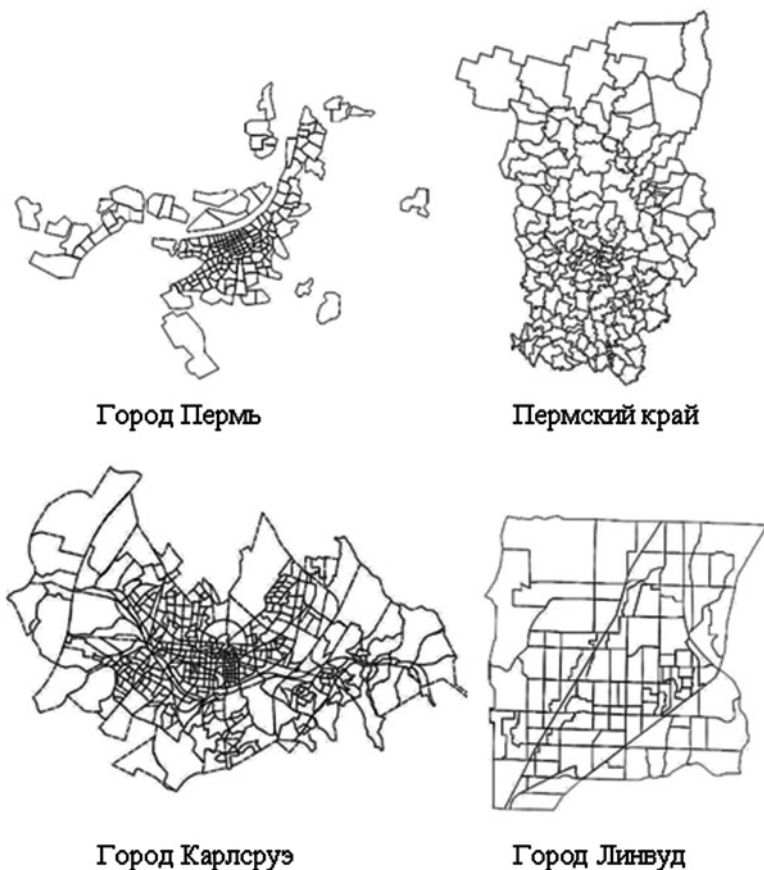
Вид передвижения	Среднее время
Пешком	20,5
Легковой автомобиль	30,6
Автобус	46,4
Двухколесный транспорт	21,5

В конечном итоге именно расстояние пешего перемещения и среднее время, затрачиваемое на такое перемещение, будут определять максимальные размеры единичного транспортного района и в целом уровень дискретизации всей исследуемой области – территории города.

Такой подход к дискретизации определил основные параметры районирования для большинства городов и регионов России и мира (рис. 2.2).

Однако в ряде европейских городов транспортный спрос рассчитывается на гораздо более мелких моделях городского расселения. Например, для города Карлсруэ (Германия) при населении около 300 тыс. человек модель формирования транспортного спроса состоит из 600 транспортных районов, а для маленького городка Линвуд на севере США с населением 30 тыс. человек модель разбита на 150 транспортных районов.

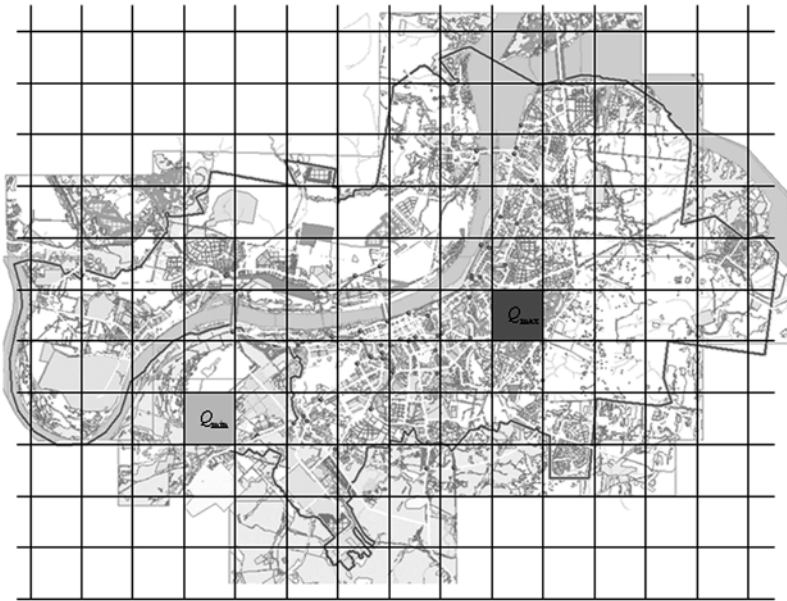
Кроме различий в уровне детализации моделей транспортного спроса различных городов, существенно различаются общие подходы к формированию отдельных транспортных районов. Отличия наблюдаются как в плане геометрии транспортных районов, так и в принципах задания конфигурации их границ.



**Рис. 2.2.** Способы дискретизации территорий городов и регионов России и мира

Распределение элементов городской структуры по территории города в общем случае не подчиняется известным законам распределения случайных величин. Для установления его неравномерностей целесообразно использовать регулярное деление территории города, например, прямоугольной сеткой (рис. 2.3).

Деление города производится в три этапа сетками различной плотности. Цель первого этапа – определение размеров транспортных районов с различным уровнем их освоения. После двух итераций на территории города получаем неравномерную сетку в качестве основы дальнейшего ручного формирования границ транспортных районов. Количество районов при таком делении оказывается приблизительно равным требуемому (в частности, для города Перми – 386). Формирование границ каждого транспортного района не имеет како-



**Рис. 2.3.** Первый шаг деления территории города регулярной сеткой

го-либо принципиального значения для создания модели транспортного спроса, однако их удобнее формировать с учетом сложившегося квартального деления территории города и естественных границ, затрудняющих транспортный обмен между соседними транспортными районами – оврагов, рек, железнодорожных путей и т.п. На этом этапе территория города делится регулярной прямоугольной сеткой с количеством ячеек  $N/4$ , где  $N$  – предполагаемое количество транспортных районов в модели городской структуры.

На первом этапе определяются абсолютные значения, определяющие транспортный спрос параметра в каждой ячейке, например количество трудоспособного населения. Находим два крайних значения –  $Q_{\min}$  и  $Q_{\max}$ .

Все ячейки, у которых значение определяющего спрос параметра больше, чем  $(Q_{\min} + Q_{\max}) / 2$ , делятся дополнительно еще на четыре равные части. Далее из ячеек сетки нового деления также находим минимальное и максимальное значение определяющего спрос параметра, и часть ячеек делим еще на четыре равные части (рис. 2.4).

Целью следующего, второго этапа районирования территории города и транспортных районов является поиск центра генерации и потребления транспортных потоков в каждом транспортном районе. Центры районов в конечном итоге будут определять затраты времени на все перемещения внутри одного транспортного района. От выбора

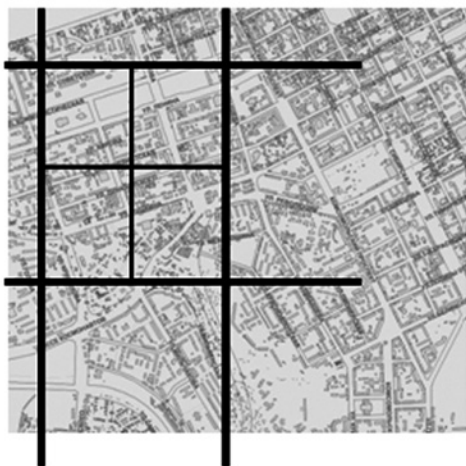


Рис. 2.4. Второй шаг деления территории города регулярной сеткой

местоположения этого центра, например, существенно зависит конечное перераспределение спроса на пассажирские передвижения с использованием транспорта общего пользования.

Технология определения дислокации центра каждого транспортного района заключается в получении и фиксации существенных среднеквадратических отклонений от среднего величин, по которым производится построение модели транспортного спроса (плотности застройки, плотности населения и

т.п.) на территории района в ячейках регулярной прямоугольной сетки (рис. 2.5).

Процедура выявления центра района представляет собой итерационную процедуру на сетках разной размерности с последующим уменьшением размеров ячейки. Найденные центры больших по площади периферийных районов должны в итоге размещаться не в гео-

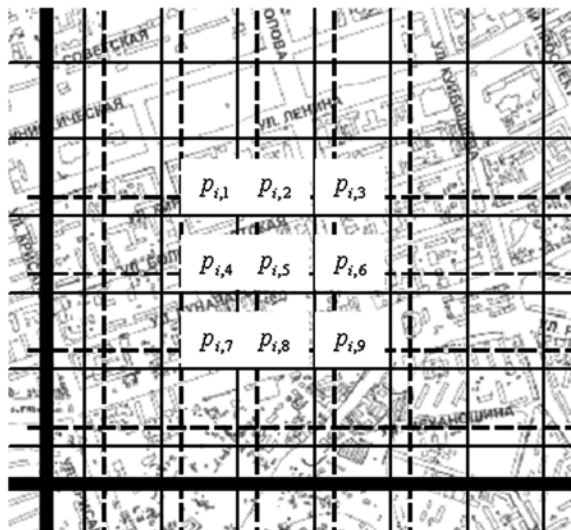


Рис. 2.5. Технология отыскания центров транспортных районов

метрическом центре планировочного элемента, а чаще всего смещенными в направлении центра города относительно геометрического центра планировочного элемента.

С целью определения и фиксации транспортных районов для последующего построения модели транспортного спроса и формирования матриц – источников и целей транспортного движения требуются отдельные (независимые) процедуры для районирования по пассажирским и грузовым перемещениям.

Итоговое геометрическое изображение модели городской структуры будет представлять из себя поле точек – центров генерации и потребления транспортных потоков каждого транспортного района (рис. 2.6).



**Рис. 2.6.** Центры транспортных районов и их возможные связи с графом улично-дорожной сети города

Каждый транспортный район является источником (генератором) и потребителем транспортных потоков. Объемы этого потребления и генерации определяются сложившимися в настоящее время видами использования городских территорий, которые на протяжении длительного периода времени остаются неизменными.

Модель городской структуры будет представлять собой универсальную систему хранения всей формализованной атрибутивной информации о параметрах использования территории города. В свою очередь, эти параметры будут определять как объемы имеющегося на данной территории транспортного спроса, так и теоретические возможности транспортной инфраструктуры и всей территории в целом удовлетворить этот спрос (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Данные статистики о транспортных районах

Задача исследования территории с позиции ее возможностей удовлетворить транспортный спрос в последующем позволяет перейти к постановке задач управления транспортным спросом на данной территории. Для ее решения, кроме анализа использования территории и построения модели городской структуры, требуются отдельные исследования в области формирования транспортного спроса и исследования транспортного поведения людей.

Широко распространенные в зарубежной специальной литературе и периодике термины «управление транспортным спросом» (Transportation Demand Management – TDM) или «управление мобильностью» (Mobility Management – MM) имеют следующие определения: «TDM – обобщающий термин для стратегий, которые приводят к более эффективному использованию транспортных ресурсов» (Victoria Transport Institute, Канада); «...MM – ориентированный на спрос подход к пассажирскому и грузовому транспорту, использующий новые инструментарий и формы взаимодействия».

Его цель состоит в том, чтобы поддерживать и поощрять изменение отношения к устойчивым видам транспортного обслуживания. Инструментарий MM основан на информационных и организационных методах, координации...» (К.Н. Posch, координатор ЕРОММ). При этом особый акцент делается на рациональном использовании индивидуального автомобильного парка. Управление транспортным спросом активно применяется в европейских странах и стало объ-



ектом совместных европейских программ, выполняемых под эгидой организации European Platform on Mobility Management (ЕРОММ, <http://www.epommweb.org>) и самой Европейской комиссии ([www.ecomm2010.eu](http://www.ecomm2010.eu)).

### 2.1.2. Методика анализа территориального баланса городских территорий

Современный город состоит из множества взаимоувязанных элементов городской структуры – здания, территории общего пользования, рекреации, транспортные сооружения и т.п. Все эти элементы имеют свои атрибуты, характеризующие их качественные и количественные характеристики, а также географические координаты их дислокации на исследуемой территории.

Первичным этапом проведения баланса городской территории является создание инструмента для получения картограмм пространственного распределения элементов городской структуры. Территория города разбивается на области с помощью регулярной сетки с квадратными ячейками со стороной 500 м. Параметр дискретности разбиения территории города зависит и от его площади, и от количества элементов городской структуры. В частности, для Перми сетка с шагом 500 м была признана оптимальной при площади города 800 кв. км (около 44 тысяч объектов недвижимости). В результате деления его территория разбита регулярной прямоугольной сеткой: 80 x 70 ячеек.

Для выполнения анализа были сгенерированы координаты центров и узлов решетки следующим образом. Пусть вершины  $i$ -ой ячейки обозначены  $a_p, b_p, c_p, d_p$ , а центр  $i$ -ой ячейки –  $o_i$ .

Координатами первой ячейки, которая находится в левом нижнем углу, являются:

$$\begin{aligned} a_1 &= (-25000, -15000), & b_1 &= (-25000, -14500), \\ c_1 &= (-24500, -14500), & d_1 &= (-24500, -15000) \\ o_1 &= (-24750, -14750) \end{aligned}$$

Тогда координаты для ячеек  $i = 2$  до 80 и т. д.  $i = i + 80$  будут рассчитываться:

$$\begin{aligned} Xa_{i+1} &= Xa_i + 500, Ya_{i+1} = Ya_i \\ Xb_{i+1} &= Xb_i + 500, Yb_{i+1} = Yb_i \\ Xc_{i+1} &= Xc_i + 500, Yc_{i+1} = Yc_i \\ Xd_{i+1} &= Xd_i + 500, Yd_{i+1} = Yd_i \\ Xo_{i+1} &= Xo_i + 500, Yo_{i+1} = Yo_i \end{aligned} \quad (2.1)$$

Координаты ячейки  $i = 81$ , и т. д.  $i = i + 80$ , будут рассчитываться:

$$\begin{aligned}
 Xa_{i+1} &= Xa_i, Ya_{i+1} = Ya_i + 500 \\
 Xb_{i+1} &= Xb_i, Yb_{i+1} = Yb_i + 500 \\
 Xc_{i+1} &= Xc_i, Yc_{i+1} = Yc_i + 500 \\
 Xd_{i+1} &= Xd_i, Yd_{i+1} = Yd_i + 500 \\
 Xo_{i+1} &= Xo_i, Yo_{i+1} = Yo_i + 500
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Сетка была вставлена в модель в виде объектов «области». На рис. 2.8 перпендикулярными линиями выделены ячейки сетки, светло-серым цветом – здания, черным – улично-дорожная сеть.



**Рис. 2.8.** Фрагмент территории города с нанесенными объектами: здания, дороги, сетка

Для каждой полученной области (ячейки, сетки) определяют суммарные параметры элементов городской структуры: суммарных площадей проезжих частей улиц, зданий, водных объектов, а также количество населения, рабочих мест, студентов, учебных мест, автомобилей.

Формирование итоговых сумм рассмотрим на примере объектов недвижимости. Выделим отдельную ячейку сетки (элемент застроенной городской территории) (рис. 2.9).

Для выбранной ячейки создается параметр  $S_{зд}$ , который оценивает объем площадей зданий, входящих в контур ячейки.

Для каждого контура здания происходит проверка принадлежности его контуру ячейки:

– если здание попадает в контур целиком с площадью  $S_i$ , то параметр  $S_{зд} = S_{зд} + S_i$ ;

– если здание попадает в контур частично, то вычисляется площадь  $S_i$  той части здания, которая попадает в рассматриваемый контур ячейки. Тогда  $S_{зд} = S_{зд} + S_i$ ;

– если здание не попадает в контур, то  $S_{зд} = S_{зд}$ .

Аналогично для остальных исходных данных вводят параметры и обрабатывают данные на принадлежность той или иной ячейке.

Когда для каждой ячейки параметры рассчитаны, строят картограммы распределения исходных данных по территории города. Например, картограммы плотности распределения различных элементов

городской структуры, являющиеся генераторами и потребителями транспортных потоков города Перми, приведены на рис. 2.10–2.14 (см. цветную вклейку).

Аналогично строятся картограммы пространственного распределения остальной базовой информации, определяющей величину и структуру транспортного спроса на урбанизированной территории.

Нельзя решать задачи развития территорий и их транспортных систем, не зная первопричин и источников поведения людей и законов развития общества, городов и территорий.

Нередко эти знания лежат за гранью технической науки, представители которой в настоящий момент трудятся по всему миру над решением задач сбалансированного развития транспортных систем городов.

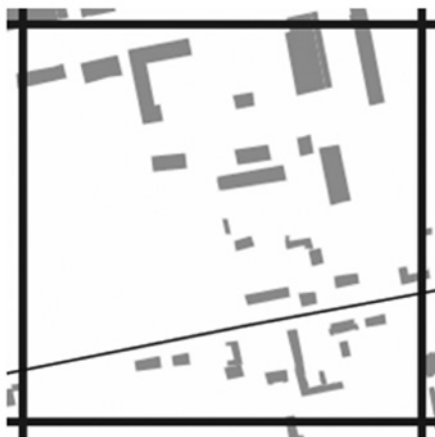
Главная идея настоящей главы – показать первоочередную важность и теоретическую возможность проведения достаточно глубоких исследований транспортных систем городов и регионов исключительно на основании анализа транспортного спроса на территории.

Наиболее важным представляется интерес к спросу на территорию при реализации транспортного движения с точки зрения удовлетворения транспортных потребностей людей, даже не проживающих на ней (имеется в виду ее пропускная способность, а также способность «переварить» потенциальное моторизованное движение).

Таким образом, первоочередной интерес представляют технологии и алгоритмы оценки территории с точки зрения возможности удовлетворения транспортного спроса.

### **Транспортный спрос в городах. Сегменты транспортного спроса. Особенности представления транспортного спроса на территории. Виды городов, конфигурации**

Транспортный спрос как объект исследования формализуется посредством анализа взаимодействия транспортных районов. Транспортный район является элементарным носителем информации, определяющей впоследствии объем транспортного спроса для всего города.



**Рис. 2.9.** Фрагмент территории города  
500 × 500 м

Источниками получения необходимой информации обычно являются базы данных: избирательных участков городских избирательных комиссий; регистрации индивидуального автомобильного транспорта; формируемые органами государственной статистики субъектов Федерации.

Представляется интересным уделить внимание формированию базы данных по количеству учащейся студенческой молодежи для каждого транспортного района города. Формализация дислокации мест ее жительства при формировании отдельного слоя спроса на перемещения, связанные с посещением учебных мест, представляет собой нетривиальную задачу.

Натурные и теоретические исследования, проведенные на статистических материалах нескольких городов Приволжского федерального округа, позволили получить методику формирования такой базы данных [124]. Для того чтобы определить количество студентов в транспортном районе, была выдвинута следующая гипотеза: количество студентов в транспортном районе коррелирует с уровнем благосостояния жителей, которое, в свою очередь, наглядно представлено уровнем автомобилизации. Таким образом, существует некая зависимость количества студентов в транспортном районе от уровня автомобилизации.

Необходимо найти количество студентов в каждом здании, поэтому введем обозначение  $S_i$ . Алгоритм его нахождения: нужно рассчитать количество студентов с учетом коэффициентов, которые рассчитываются, исходя из количества жителей в здании в возрасте от 18 до 23 лет, численности автомобилей и уровня автомобилизации.

Общий алгоритм расчета состоит из четырех шагов. На каждом шаге уточняется количество студентов в зависимости от перечисленных параметров.

*Первый шаг алгоритма* расчета количества студентов в каждом здании состоит в том, что оно определяется в зависимости от количества всех жителей, проживающих в доме, в возрасте от 18 до 23 лет, а затем нормируется относительно общего количества студентов в городе. Для этого:

Для каждого жилого здания определяем долю населения в возрасте от 18 до 23 лет, проживающего в доме, от общего количества населения в возрасте от 18 до 23 лет, проживающего в городе:

$$k_{1i} = \frac{m_i}{M}, \quad (2.3)$$

где  $k_{1i}$  – коэффициент, учитывающий количество жителей студенческого возраста, проживающих в здании, относительно количества жи-

телей города студенческого возраста;  $m_i$  – население  $i$ -го здания в возрасте от 18 до 23 лет;  $M$  – население в возрасте от 18 до 23 лет в городе.

Рассчитываем количество студентов, проживающих в здании, пропорционально доле населения в возрасте от 18 до 23 лет:

$$s_i^* = S \times k_{ii} \quad (2.4)$$

где  $s_i^*$  – количество студентов в здании, определенное пропорционально доле населения в возрасте от 18 до 23 лет;  $S$  – общее количество студентов, проживающих в городе;  $k_{ii}$  – коэффициент, учитывающий количество жителей здания в студенческом возрасте.

На *втором шаге алгоритма* при расчете количества студентов необходимо учесть долю количества зарегистрированных индивидуальных автомобилей в жилом здании от общего количества автомобилей, зарегистрированных в городе, и существующего уровня автомобилизации в городе, для этого:

Находим уровень автомобилизации жителей каждого здания (в пересчете на одного жителя).

$$avt_i = \begin{cases} \frac{a_i}{n_i}, n_i > 0 \\ 0, n_i = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $avt_i$  – уровень автомобилизации жителей в каждом здании (в пересчете на одного жителя);  $a_i$  – количество зарегистрированных автомобилей в  $i$ -м здании;  $n_i$  – население  $i$ -го здания.

Затем определяем долю зарегистрированных автомобилей в здании от общего количества автомобилей в городе.

$$da_i = \frac{a_i}{A}, \quad (2.6)$$

где  $da_i$  – доля количества зарегистрированных в здании автомобилей от общего количества автомобилей;  $a_i$  – количество зарегистрированных автомобилей в  $i$ -м здании;  $A$  – количество зарегистрированных автомобилей в городе.

Рассчитываем коэффициент  $k_{2i}$ , который будет учитывать количество студентов в зависимости от количества зарегистрированных в здании автомобилей:

$$k_{2i} = (avt_i + da_i) / 2, \quad (2.7)$$

где  $k_{2i}$  – коэффициент, учитывающий уровень автомобилизации в здании и количество автомобилей в здании;  $avt_i$  – уровень автомобилизации в каждом здании (на одного жителя);  $da_i$  – доля количества зарегистрированных в здании автомобилей от общего количества автомобилей.

Рассчитываем количество студентов в здании с учетом коэффициента  $k_{2i}$ :

$$s_i^{**} = s_i^* \cdot k_{2i}, \quad (2.8)$$

где  $s_i^{**}$  – количество студентов, проживающих в здании, определенное пропорционально доле населения в возрасте от 18 до 23 лет и уровню автомобилизации;  $s_i^*$  – количество студентов, проживающих в здании, определенное пропорционально доле населения в возрасте от 18 до 23 лет;  $k_{2i}$  – коэффициент, учитывающий уровень автомобилизации в здании и количество автомобилей в здании.

*Третий шаг алгоритма:*

Рассчитываем коэффициент, который учитывает и количество жителей в возрасте от 18 до 23 лет, и количество автомобилей в здании. Для этого находим долю каждого  $s_i^{**}$  от общего количества полученных студентов:

$$k_i = \frac{s_i^{**}}{\sum_i s_i^{**}} \quad (2.9)$$

где  $k_i$  – коэффициент, который учитывает жителей здания студенческого возраста и уровень автомобилизации одновременно;  $s_i^{**}$  – количество студентов, проживающих в здании, определенное пропорционально доле населения в возрасте от 18 до 23 лет и уровню автомобилизации.

Определим количество студентов, проживающих в здании, в соответствии с  $k_i$ :

$$s_i = k_i \cdot S, \quad (2.10)$$

где  $s_i$  – количество студентов, проживающих в  $i$ -м здании;  $k_i$  – коэффициент, который учитывает жителей студенческого возраста, проживающих в здании, и уровень автомобилизации жителей здания одновременно;  $S$  – общее количество студентов в городе.

Студентов назначим исходя из ограничения  $s_i \leq m_i$ :

$$s_i = \min(s_i, m_i), \quad (2.11)$$

где  $s_i$  – количество студентов, проживающих в  $i$ -ом здании;  $m_i$  – население  $i$ -го здания в возрасте от 18 до 23 лет.

Так как  $s_i$  является минимальным значением между  $s_i$  и  $m_i$ , то

$$\sum_i s_i < S.$$

На *четвертом шаге алгоритма* необходимо дополнить количество студентов в каждом здании так, чтобы выполнялось равенство

$\sum_i s_i = S$ , то есть чтобы рассчитанное количество студентов в городе совпадало с реальным количеством студентов, проживающих в городе. Для этого итоговое количество студентов получим путем распределе-

ния разности  $S - \sum_i s_i$  пропорционально доле разности  $m_i - s_i$  от раз-

ности  $M - \sum_i s_i$ :

$$s_i = s_i + (S - \sum_i s_i) \cdot \frac{m_i - s_i}{M - \sum_i s_i}, \quad (2.12)$$

где  $s_i$  – количество студентов, проживающих в  $i$ -ом здании;  $m_i$  – население  $i$ -го здания в возрасте от 18 до 23 лет;  $S$  – общее количество студентов, проживающих в городе;  $M$  – население города в возрасте от 18 до 23 лет.

Таблица 2.3

#### Характеристики спроса в транспортных районах

Номер транспортного района	Население района	Количество автомобилей	Количество студентов
1	1314	537	78
2	513	141	21
3	1611	478	66
4	398	48	5
5	1535	628	87
6	101	16	5
7	906	375	53
8	645	183	30
9	234	94	13
10	702	380	1629

Пример распределения студентов для нескольких транспортных районов Перми приведен в табл. 2.3.

### **Методы формализации пространственного распределения структурных элементов городской среды при транспортном анализе территории**

При пространственном сопоставлении полученных картограмм уже можно получать важнейшие выводы о расселении людей, теоретической подвижности населения и о прогнозных объемах километровой годовой подвижности всего населения города.

Не менее интересным представляется структурный анализ городского ядра, а впоследствии – всей городской территории по отдельным зонам, равноудаленным от центра городского ядра. Итогом такого анализа станут диаграммы плотности концентрации элементов городской структуры на разных удалениях от центра. Такой анализ призван, в первую очередь, оценить равномерность эффективности использования городских территорий и рассчитать предельные теоретические нагрузки транспортного движения в равноудаленных от центра и в центральных районах города.

Для поиска системы отсчета исследуемых параметров городской структуры и последующего уточнения процедуры расчета матрицы корреспонденций целесообразно математически описать сложившееся на территории города распределение параметров городской среды, влияющих на формирование транспортного спроса.

Каждый город имеет свои характеристики и особенности – физические, географические, социальные. Для исследования потенциальных характеристик функционирования транспортных систем городов представляется важным оценить взаимодействие географических и социальных характеристик территорий города, получить общие зависимости распределения населения, рабочих мест или зарегистрированного автомобильного транспорта в зависимости от концентрации объектов недвижимости и удаленности этих объектов от центра города.

При исследовании пространственного распределения каждого элемента городской структуры можно построить поверхность, которая будет отображать распределение того или иного элемента городской структуры по территории города с учетом его плотности на территории.

К рассматриваемым элементам можно отнести различные объекты и их характеристики, формирующие городскую структуру. Рассмотрим технологию такого анализа на следующих элементах:

- 1) распределение жилых домов с учетом населения, проживающего в них;
- 2) распределение жилых домов без учета населения;



3) распределение индивидуального транспорта, зарегистрированного на физических лиц (жителей города).

Каждый из элементов представляется в виде точки на карте города с координатами объекта недвижимости ( $X$ ,  $Y$ ) и количеством единиц заданного параметра ( $P$ ) (например, населения в доме). Количество таких точек –  $m$ . Объем распределенного параметра для всего города равен  $N$ , например, численность населения в городе.

Допустим, что распределение по территории города того или иного элемента городской структуры (жилые дома, индивидуальный транспорт и т. п.) подчиняется нормальному закону распределения. В таком случае для расчета плотности нормального распределения воспользуемся соотношением:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(x-MX)^2}{\sigma_x^2} - 2\rho\frac{(x-MX)(y-MY)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-MY)^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \quad (2.13)$$

Эта функция двух аргументов представляет собой поверхность, где  $x$ ,  $y$  – аргументы функции (координаты на плоскости – территории города).

Математические ожидания распределения величин рассчитываются как:

$$MX = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m X_i P_i \quad \text{и} \quad MY = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m Y_i P_i, \quad (2.14)$$

где  $X_i, Y_i, P_i$  – пространственные координаты распределенных единиц городской структуры и их вес соответственно.

Стандартные отклонения находятся как:

$$\sigma_x = \sqrt{MX^2 - (MX)^2} \quad \text{и} \quad \sigma_y = \sqrt{MY^2 - (MY)^2}. \quad (2.15)$$

Коэффициент корреляции между  $X$  и  $Y$ :

$$\rho = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_x\sigma_y} \quad (2.16)$$

где  $\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m (X_i - MX) \cdot (Y_i - MY)$ .

Рассмотрим примеры построения поверхностей для распределенных параметров, таких как жилые дома с учетом населения, проживающего в них, и жилые дома без учета населения, на примере двух городов: Перми и Екатеринбурга. Для Перми дополнительно проанализируем распределение зарегистрированного индивидуального легкового транспорта на его территории.

Определим вид функций плотности нормального распределения и их графическое представление для названных выше примеров. Для Перми функция плотности нормального распределения для жилых зданий с учетом жителей примет вид:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot 7408,61 \cdot 4818,0796 \cdot \sqrt{1 - 0,65^2}} \times e^{\left[ \frac{-1}{2(1-0,65^2)} \left( \frac{(x+1172,616)^2}{7408,61^2} - 2 \cdot 0,65 \frac{(x+1172,616)(y+380,2037)}{7408,61 \cdot 4818,0796} + \frac{(y+380,2037)^2}{4818,0796^2} \right) \right]} \quad (2.17)$$

Графическое представление поверхности, образованной функцией (2.17), приведено на рис. 2.15 (см. цветную вклейку).

Для Перми функция плотности нормального распределения для жилых домов без учета населения примет вид:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot 7046,3426 \cdot 4701,0601 \cdot \sqrt{1 - 0,58^2}} \times e^{\left[ \frac{-1}{2(1-0,58^2)} \left( \frac{(x+927,2094)^2}{7046,3426^2} - 2 \cdot 0,58 \frac{(x+927,2094)(y+478,1996)}{7046,3426 \cdot 4701,0601} + \frac{(y+478,1996)^2}{4701,0601^2} \right) \right]} \quad (2.18)$$

Графическое представление поверхности, образованной функцией (2.18), приведено на рис. 2.16.

Функция плотности нормального распределения для зарегистрированного транспорта на территории города Перми примет вид:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot 7046,3426 \cdot 4701,0601 \cdot \sqrt{1 - 0,58^2}} \times e^{\left[ \frac{-1}{2(1-0,58^2)} \left( \frac{(x+927,2094)^2}{7046,3426^2} - 2 \cdot 0,58 \frac{(x+927,2094)(y+478,1996)}{7046,3426 \cdot 4701,0601} + \frac{(y+478,1996)^2}{4701,0601^2} \right) \right]} \quad (2.19)$$

Графическое представление поверхности, образованной функцией (2.19), приведено на рис. 2.17.

Для Екатеринбурга функция плотности нормального распределения для жилых домов с учетом населения примет вид:

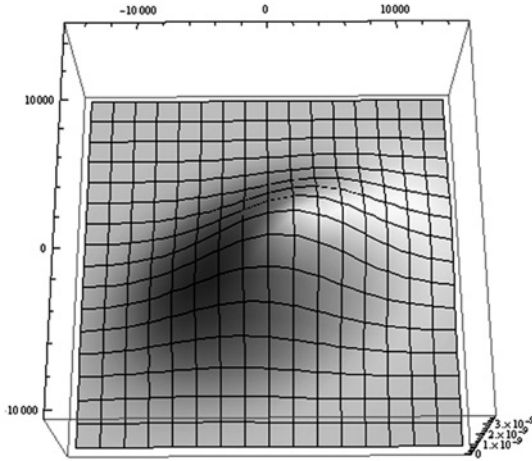


Рис. 2.16. Представление функции (2.18) в виде поверхности. Поверхность плотности нормального распределения городской застройки

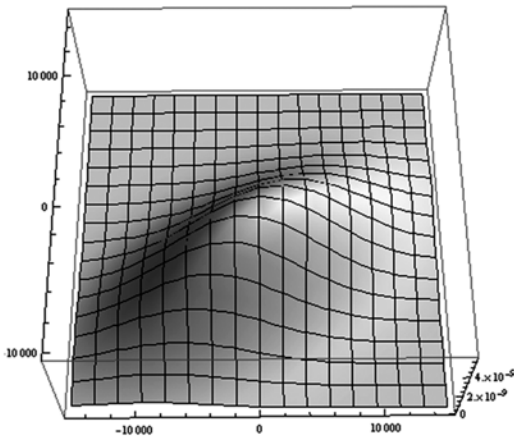


Рис. 2.17. Представление функции (2.19) в виде поверхности. Поверхность плотности нормального распределения дислокации индивидуального транспорта

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot 3625,0741 \cdot 4816,2895 \cdot \sqrt{1 - 0,24^2}} \times \quad (2.20)$$

$$\times e^{-\left[ \frac{-1}{2(1-0,24^2)} \left( \frac{(x-1028,0776)^2}{3625,0741^2} + 2 \cdot 0,24 \frac{(x-1028,0776) \cdot (y+272,4556)}{3625,0741 \cdot 4816,2895} + \frac{(y+272,4556)^2}{4816,2895^2} \right) \right]}$$

Тогда функция плотности нормального распределения для жилых домов без учета населения примет вид:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot 3861,1268 \cdot 4606,4346 \cdot \sqrt{1 - 0,24^2}} \times e^{\left[ \frac{-1}{2(1-0,24^2)} \left( \frac{(x-918,868)^2}{3861,1268^2} + 2 \cdot 0,24 \cdot \frac{(x-918,868)(y+1291,2798)}{3861,1268 \cdot 4606,4346} + \frac{(y+1291,2798)^2}{4606,4346^2} \right) \right]} \quad (2.21)$$

Графическое представление поверхностей, образованных функциями (2.20) и (2.21), приведено на рис. 2.18 (см. цветную вклейку).

Опишем распределение исследуемых единиц городской структуры фигурами на плоскости. Сечение полученной поверхности плоскостью, параллельной координатной, на некотором расстоянии от нее даст эллипс. Расстояние плоскости эллипса от координатной плоскости позволит выявить необходимую вероятность при построении эллиптической модели города. Представим структуру распределения объектов по территории города как эллипс, который получим сечением поверхности, описанной функцией (2.13), плоскостью, параллельной  $XOY$ .

Одним из сечений выберем такое, при котором 90% всех исследуемых единиц городской структуры попадут во внутреннюю область эллипса (вероятность  $P = 0,9$ ). Для построения сечения зададим произвольную плотность вероятности.

Обозначим значение плотности вероятности  $\lambda$ . Для каждого значения  $\lambda$  существует геометрическое место точек  $B(\lambda)$ :

$$\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[ \frac{(x-MX)^2}{\sigma_x^2} - 2\rho \frac{(x-MX)(y-MY)}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{(y-MY)^2}{\sigma_y^2} \right] = \lambda \quad (2.22)$$

Функция вероятности для геометрического места точек –  $B(\lambda)$  представляется следующим образом:  $P(x, y) = 1 - e^{-\lambda}$ . Тогда для выбранной вероятности  $P = 0,9$  значение  $\lambda = 4,61$ .

$$\frac{(x-MX)^2}{\sigma_x^2} - 2\rho \frac{(x-MX)(y-MY)}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{(y-MY)^2}{\sigma_y^2} = 2\lambda(1-\rho^2) \quad (2.23)$$

Полученное уравнение определяет геометрическое место точек – в данном случае это эллипс с центром в точке  $(MX, MY)$ .

Обозначим  $\phi$  – угол между осью  $OX$  и большой осью эллипса,  $a$  – большая полуось,  $b$  – малая полуось,  $c$  – расстояние между центром и фокусами.

Чтобы избавиться от множителя  $\frac{(x-MX)(y-MY)}{2\lambda\sigma_x\sigma_y}$ , необходимо координатную ось повернуть на угол:

$$\operatorname{ctg}(2\phi) = \frac{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}{2\sigma_x\sigma_y\rho}. \quad (2.24)$$

Тогда параметры эллипса примут вид:

$$a = \sigma_y\sqrt{2\lambda(1-\rho^2)}, \quad b = \sigma_x\sqrt{2\lambda(1-\rho^2)}, \quad c = \sqrt{\sigma_y^2 - \sigma_x^2}\sqrt{2\lambda(1-\rho^2)}, \quad (2.25)$$

а координаты фокусов эллипса на плоскости:

$$F_1(c \cos \phi + MX, c \sin \phi + MY) \text{ и } F_2(-c \cos \phi + MX, -c \sin \phi + MY). \quad (2.26)$$

Для приведенных функций (2.18)–(2.22) рассчитаем параметры эллипсов, которые охватывают с 90%-й вероятностью распределенные элементы городской структуры по территории города.

Для Перми эллипс 90%-й вероятности нормального распределения для жилых зданий с учетом жителей примет вид, изображенный на рис. 2.19 (красный цвет) (см. цветную вклейку).

Параметры эллипса, описывающего распределение жилых зданий, следующие: центр эллипса находится в точке:  $(-1172,616; -380,2037)$ . Система координат – городская, плоская;

угол поворота эллипса между осью  $OX$  и большей полуосью эллип-

$$\text{са } b: \phi = \frac{4\pi}{21};$$

полуоси эллипса:  $a = 11117$ ,  $b = 17095$ ;

расстояние между фокусами:  $c = 12986$ .

Для жилых зданий, расположенных на территории Перми, с учетом их площадей параметры эллипса равны (синий цвет, рис. 2.19):

центр эллипса находится в точке:  $(1158,8068; 1700,2714)$ .

угол поворота эллипса между осью  $OX$  и большей полуосью эллип-

$$\text{са } b: \phi = \frac{20\pi}{77},$$

расстояние между фокусами:  $c = 17271$ .

Распределение автотранспортных средств, принадлежащих гражданам и зарегистрированных на территории города Перми, описывает эллипс, имеющий следующие параметры (зеленый цвет, рис. 2.19):

центр эллипса находится в точке:  $(-927,2094; -478,1996)$ ;

угол поворота эллипса между осью  $OX$  и большей полуосью эллип-

$$\text{са } b: \phi = \frac{20\pi}{101};$$

полуоси эллипса:  $a = 11628$ ,  $b = 17429$ ;

расстояние между фокусами:  $c = 12983$ .

Для Екатеринбурга эллипс 90%-й вероятности нормального распределения для жилых зданий с учетом жителей примет вид, изображенный на рис. 2.20 (красный цвет) (см. цветную вклейку). Параметры эллипса, описывающего распределение населения по территории города, будут определены следующим образом:

центр эллипса находится в точке:  $(1028,0775; -272,4556)$ ;

угол поворота эллипса между осью  $OX$  и большей полуосью эллип-

$$\text{са } a: \phi = \frac{7\pi}{9};$$

полуоси эллипса:  $a = 14197$ ,  $b = 10686$ ;

расстояние между фокусами:  $c = 9347$ .

Распределение жилых объектов недвижимости в Екатеринбурге описывается эллипсом на рис. 2.20 (синий цвет), имеющим следующие параметры:

центр эллипса находится в точке:  $(918,868; -1291,2798)$ ;

угол поворота эллипса между осью  $OX$  и большей полуосью эллип-

$$\text{са } a: \phi = \frac{347\pi}{494};$$

полуоси эллипса:  $a = 13578$ ,  $b = 11381$ ;

расстояние между фокусами:  $c = 7405$ .

Рассмотрим графические представления различных распределенных величин для городов Пермь и Екатеринбург на одной координатной плоскости, без привязки к географическим картам (рис. 2.21) (см. цветную вклейку).

Нетрудно заметить, что эти города при сравнительно одинаковой численности населения, в территориальном плане существенно различны. Приведенное на рис. 2.21 графическое описание городской структуры представляет собой модель города, способную дать формализованное представление об основных характеристиках города, влияющих на потенциал и эффективность функционирования городских транспортных систем.

В качестве такой математической формализации может быть предложена эллиптическая модель города, которая представляет собой плотность нормального распределения двумерного вектора пространственно распределенных единиц городской структуры (например, плотности жителей города или городской застройки).

Параметрами данной модели будут межфокусное расстояние, азимут, сумма радиусов эллипса либо соотношения длин полуосей эллипса.

Различные единицы городской структуры:

- плотность застройки;
- численность населения;
- численность мест приложения труда;
- численность учащихся;
- численность зарегистрированного индивидуального транспорта.

Данные единицы городской структуры распределены по территории города неравномерно, поэтому в общем случае для каждого структурного элемента можно построить свою эллиптическую модель и с ее помощью найти, например, точку отчета для построения распределений интересующих параметров по территории в зависимости от удаления от центра.

По наглядному представлению города в эллиптической модели можно судить о протяженности активной части города. Например, сравнение разных эллипсов в пределах одного города показывает, что население города Перми наиболее плотно распределено в его центре, поэтому протяженность активной части города меньше ее территориальных границ.

Для распределения населения в Екатеринбурге в настоящий момент характерно то, что оно в большей степени распределено на периферийной части города, поэтому красный эллипс по протяженности превышает синий, следовательно, можно говорить о том, что активные границы города шире, чем территориальные.

При проведении сравнительного анализа городов очевидно то, что Пермь является более протяженным, но с меньшим количеством насе-

ления, следовательно, он более затратный в плане совершения транспортных корреспонденций.

Полученную методику расчетов можно применять на практике для уточнения распределения неизвестных параметров. Например, имея точные и достоверные данные по распределению населения на территории города Перми, мы можем восстановить распределение данных по населению в другом городе, имеющем схожую структуру. Эти методики применимы для вывода определяющих соотношений, участвующих в дальнейшем анализе транспортного потенциала территорий и построении транспортных моделей городов.

Рассмотрим возможности пространственного анализа распределения городской структуры на основе построенных эллиптических моделей. Проведем анализ городского землепользования – для этого найдем изменения площадей дорог, зданий, водных объектов в зависимости от их расстояния до центра Перми (центра эллипса с координатами:  $-1172,616$ ;  $-380,2037$ ). Подобным образом определим зависимость количества населения, трудящихся, студентов, рабочих и учебных мест.

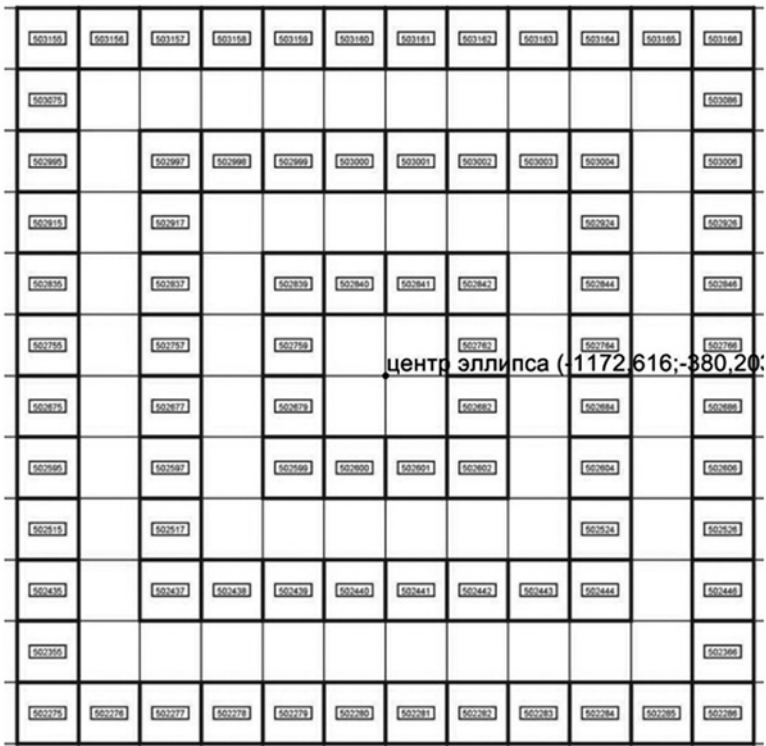


Рис. 2.22. Разбиение территории города регулярной сеткой на ряды-кольца в зависимости от расстояния до центра города



Для простоты расчета используем регулярное разбиение территории города в плоской декартовой системе координат в виде сетки последовательности квадратов-колец, как показано на рис. 2.22.

Ряды определяются как удаленные от центра, первый на расстоянии 500 м (ближние от центра 4 ячейки), второй – 1000 м (12 ячеек) и т.д. Для каждого ряда суммируются параметры, характеризующие тот или иной вид анализируемых исходных данных.

Для диаграммы на рис. 2.23 (см. цветную вклейку) суммируются по рядам параметры площадей жилой застройки (коричневый цвет), параметры площадей дорог (серый цвет), параметр водных объектов (синий цвет), затем данные выстраиваются в зависимости от расстояния.

Для диаграммы (рис. 2.24, см. цветную вклейку) суммируются по рядам рассчитанные суммы количества населения, рабочих мест, студентов, учебных мест, а также количество зарегистрированных автомобилей. Результаты расчета суммируются по ячейкам, равноудаленным от центра. Итоговые значения сумм строятся в виде диаграмм в зависимости от расстояния от центра.

Предварительный визуальный анализ диаграмм на рис. 2.23 и 2.24 позволяет заметить существенную неравномерность использования территории города. Это исторически определяется последовательностью этапов его формирования от момента основания до современного вида.

Очевидно, что Пермь, как и многие города, основанные на транспортных коммуникациях, сформирована отчасти искусственным образом: путем объединения ряда поселений в территориальное образование с общим центром муниципального управления. Кроме того, нетрудно заметить, что распределение потенциальных территорий генераторов и потребителей (истоков и стоков) транспортных потоков, в свою очередь, также неравномерно.

В дополнение к этому можно отметить, что распределение населения по территории города не совпадает с распределением объектов недвижимости. Это существенно влияет на обобщенные показатели функционирования транспортной системы города, определяя значительный объем неравномерных в течение суток транспортных потоков по основным магистралям, связующим городское ядро и территории города, отстоящие от центра на 10–15 км. Эти закономерности позволяют на этапе построения модели транспортного спроса (а именно функции предпочтений дальности совершения поездки) корректно учитывать выявленную неравномерность.

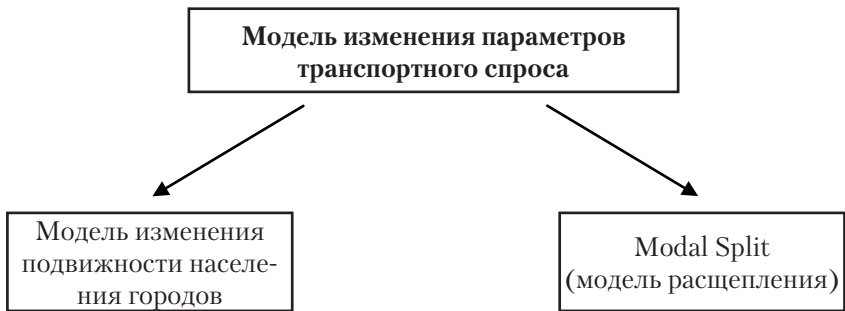
## 2.2. Анализ транспортной подвижности населения

Объем и структуру транспортного спроса в городах принято считать довольно статичными параметрами, мало меняющимися по терри-

тории в связи с локальными изменениями режимов ее использования, как-то: новое строительство объектов недвижимости или объектов транспортной инфраструктуры. Однако анализ статистики уровня автомобилизации и объемов дорожного движения наглядно показывает, что существуют довольно ярко выраженные изменения общих объемов транспортного спроса, а также способы его реализации.

Можно проследить, как изменяется уровень автомобилизации в городах, растет интенсивность дорожного движения на улично-дорожной сети. Но простое интерполирование статистических зависимостей этого роста на долгосрочную перспективу, очевидно, не будет обладать достаточной степенью достоверности. Представляется интересным получить необходимые для построения прогнозных моделей транспортного спроса в городах параметры, характеризующие общую подвижность жителей, на основе анализа статистики более развитых по уровню автомобилизации европейских стран.

Поставим задачу: определить основные параметры транспортного спроса в крупном российском городе (до 2030 г.). Прогноз параметров транспортного спроса будет проводиться в двух направлениях (рис. 2.25): прогноз подвижности населения и прогноз разделения (расщепления) всего объема транспортных корреспонденций по видам транспорта (Modal Split).



**Рис. 2.25.** Принципиальная схема построения прогнозных моделей объемов транспортного спроса в городах

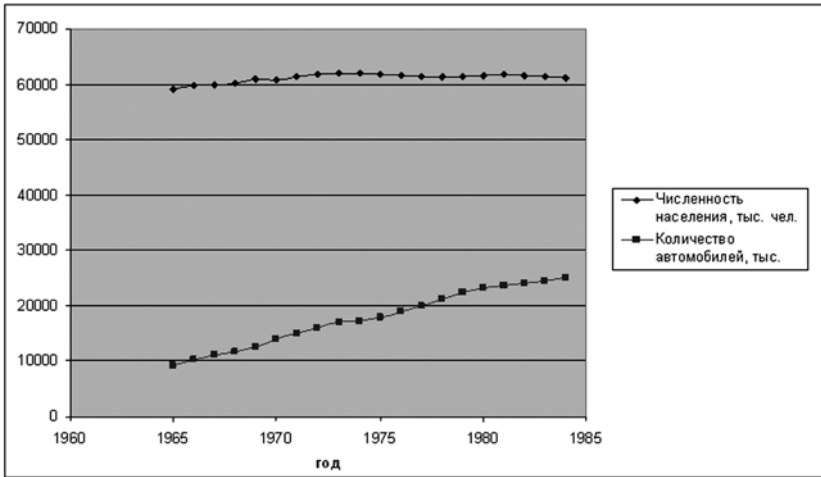
### 2.2.1. Анализ автомобилизации и общей подвижности населения городов

В основу моделей легли статистические данные параметров подвижности, а также уровня использования различных видов транспорта для городов Германии, предоставленные компанией Роугу [125, 126] (<http://www.roугу.com/>), и статистическая информация по городам Италии от компании Systematica [126, 127] (<http://www.systematica.net/>).

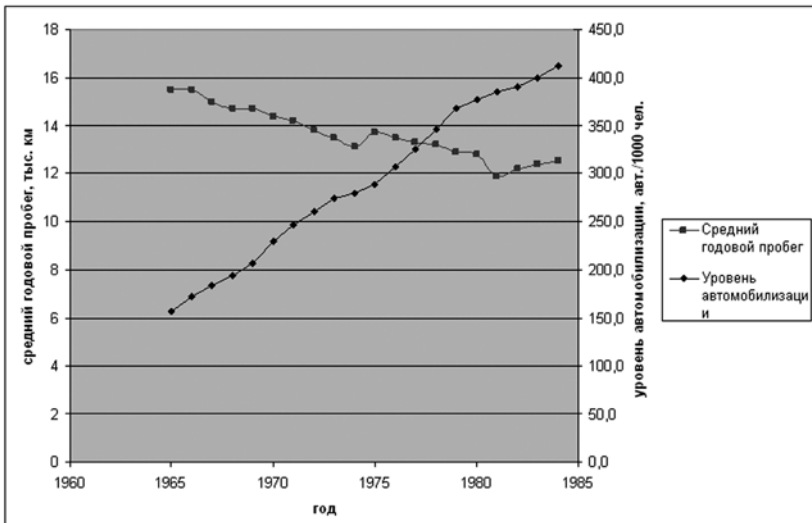
Таблица 2.4

**Статистические данные количества населения, уровня автомобилизации и среднегодового пробега автомобиля для городов Германии**

Год	Численность населения, тыс. чел.	Количество автомобилей, тыс.	Уровень автомобилизации, авто / 1000 жителей	Средний годовой пробег, тыс. км	Применительно к городам России
1960	55433	4490	81,0	16,3	
1965	59012	9267	157,0	15,5	
1966	59638	10302	172,7	15,5	
1967	59873	11016	184,0	15	
1968	60184	11683	194,1	14,7	Российские города ≈ 2008
1969	60848	12585	206,8	14,7	
1970	60651	13941	229,9	14,4	
1971	61302	15115	246,6	14,2	
1972	61672	16055	260,3	13,8	
1973	61976	17023	274,7	13,5	
1974	62054	17341	279,5	13,1	
1975	61829	17898	289,5	13,7	
1976	61531	18920	307,5	13,5	Российские города ≈ 2016
1977	61400	20020	326,1	13,3	
1978	61327	21212	345,9	13,2	
1979	61359	22535	367,3	12,9	Российские города ≈ 2020
1980	61566	23192	376,7	12,8	
1981	61682	23730	384,7	11,9	
1982	61638	24105	391,1	12,2	
1983	61423	24580	400,2	12,4	
1984	61175	25218	412,2	12,5	



**Рис. 2.26.** График изменения численности населения и количества автомобилей, зарегистрированных в городах Германии (по годам)



**Рис. 2.27.** График изменения уровня автомобилизации и среднего годового пробега в Германии (по годам)

Для построения модели и прогнозирования подвижности населения использованы данные немецких исследователей, полученные в результате статистического анализа и наблюдений в различных городах Германии (табл. 2.4, рис. 2.26 и 2.27).

Оценку изменения подвижности будем проводить по интегрированному показателю – суммарному пробегу всех автомобилей за сутки

(км/сутки). Для этого представим исходные данные в виде суточного пробега автомобиля и затем подсчитаем общий пробег всех автомобилей.

За точку отсчета возьмем 1968 г. Именно этот год в Германии по основным параметрам, определяющим функционирование транспортных систем, соответствует 2008 г. для крупных российских городов. Суммарный пробег для этого года составил:  $14\,700 \text{ км} / 365 \text{ суток} \times 11\,683\,000 \text{ авто} = 506\,847\,945 \text{ км/сутки}$ . 1976 г. соответствует по основным достигаемым показателям 2016 г. для крупных российских городов. Суммарный пробег составил:  $13\,500 \text{ км} / 365 \text{ суток} \times 18\,920\,000 \text{ авто} = 699\,780\,822 \text{ км/сутки}$ .

Таким образом, с 1968 по 1976 год, по данным наблюдений в городах Германии, отношение количества автомобилей на 1000 жителей увеличилось в  $307,5/194,1 = 1,584$  раза, общее количество автомобилей увеличилось в  $18920 / 11683 = 1,62$  раза, суммарный пробег автомобилей увеличился в  $699\,780\,822 / 506\,847\,945 = 1,38$  раза.

Выполнив аналогичные действия для всех предыдущих периодов времени каждого года, получим результаты суммарного пробега автомобилей в сутки (табл. 2.5).

Полученные значения суммарного пробега парка автомобилей используются для ретроспективного прогнозирования уровня подвижности населения городов Германии в течение 1985–1990 гг. В последующем полученные данные используем для расчета параметров подвижности населения в крупном российском городе на 2030 г. Построим функциональные зависимости для наблюдаемых параметров. Для аппроксимации выберем логарифмический вид функции.

По результатам многочисленных исследований определили, что логарифмическая зависимость наиболее точно описывает основные параметры роста автомобилизации и транспортной подвижности населения городов. График итоговой логарифмической функции представлен на рис. 2.28.

В результате аппроксимации получен следующий вид функции уровня автомобилизации в зависимости от года:

$$y = 27729 \cdot \ln(x) - 210117, \quad (2.27)$$

где  $x$  – прогнозируемый период (год).

На основании этого определим уровень автомобилизации на перспективу до 1990 г. (табл. 2.6).

Сравним фактические данные об уровне автомобилизации с рассчитанными. Коэффициент корреляции равен 0,984. Средняя относительная ошибка 3,6%,  $R^2 = 0,97$ , стандартное отклонение 5,047. Таким образом, нам удалось достаточно точно аппроксимировать кривую изменения уровня автомобилизации. Уровень автомобилизации в

Таблица 2.5

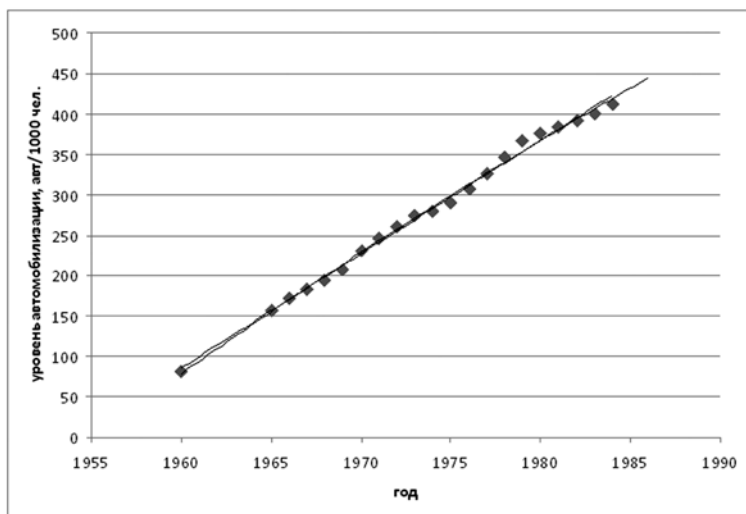
**Значения суммарного пробега всех автомобилей в пересчете на сутки  
из статистического анализа наблюдений по городам Германии**

Год	Численность населения, тыс. чел.	Количество автомобилей, тыс.	Уровень автомобилизации, авт./1000 жителей	Среднегодовой пробег на автомобиль, тыс. км	Суммарный пробег всех автомобилей в сутки, км
1960	55433	4490	81	16,3	200512329
1965	59012	9267	157	15,5	393530137
1966	59638	10302	172,7	15,5	437482192
1967	59873	11016	184	15	452712329
1968	60184	11683	194,1	14,7	470520822
1969	60848	12585	206,8	14,7	506847945
1970	60651	13941	229,9	14,4	550001096
1971	61302	15115	246,6	14,2	588035616
1972	61672	16055	260,3	13,8	607010959
1973	61976	17023	274,7	13,5	629617808
1974	62054	17341	279,5	13,1	622375616
1975	61829	17898	289,5	13,7	671787945
1976	61531	18920	307,5	13,5	699780822
1977	61400	20020	326,1	13,3	729495890
1978	61327	21212	345,9	13,2	767118904
1979	61359	22535	367,3	12,9	796442466
1980	61566	23192	376,7	12,8	813308493
1981	61682	23730	384,7	11,9	773663014
1982	61638	24105	391,1	12,2	805701370
1983	61423	24580	400,2	12,4	835046575
1984	61175	25218	412,2	12,5	863630137

городах Германии за 1990 г., составляющий 509 автомобилей на 1000 жителей, мы принимаем как прогнозный уровень автомобилизации крупного российского города, ожидаемый к 2030 г.

Аналогично аппроксимируем и экстраполируем данные для суммарного суточного пробега (рис. 2.29).

Результат аппроксимации для функции суммарного суточного пробега:



**Рис. 2.28.** Аппроксимация уровня автомобилизации логарифмической функцией

*Таблица 2.6*

**Расчитанный и фактический уровень автомобилизации  
для городов Германии**

Год	Расчитанный уровень автомобилизации	Фактический уровень автомобилизации
1985	440	423
1986	454	440
1987	468	455
1988	482	467
1989	495	474
1990	509	481

$$y = 51\,405\,954 \ln(x) - 389\,424\,486; \quad (2.28)$$

где  $x$  – прогнозируемый период (год).

Проведя экстраполяцию на 1985–1990 гг., получим следующие значения (см. табл. 2.7).

Таким образом, проведя соответствие между расчетными годами и показателями подвижности, получим следующие расчетные данные

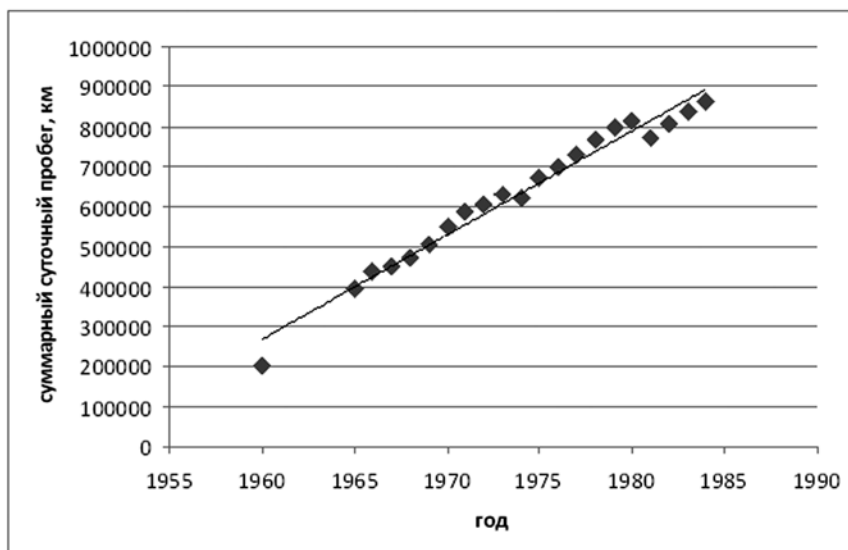


Рис. 2.29. Аппроксимация суммарного суточного пробега логарифмической функцией

Таблица 2.7

**Экстраполированные значения суммарного суточного пробега автомобилей в городах Германии**

Год	Суммарный суточный пробег, тыс. км
1985	920161,73
1986	946052,42
1987	971930,07
1988	997794,7
1989	1023646,3
1990	1049485

для прогнозирования этих параметров в крупных российских городах для трех периодов прогнозирования (табл. 2.8).

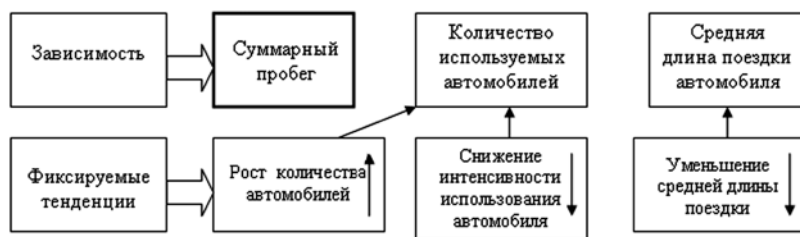
Для расчета уровня изменения подвижности будем использовать зависимости изменения суммарного пробега, так как этот показатель учитывает в себе как изменение уровня автомобилизации, так и степень (частоту) использования автомобиля (рис. 2.30).



Таблица 2.8

**Значения уровня автомобилизации и относительного изменения суммарного пробега для крупных российских городов**

Год	Уровень автомобилизации	Относительное изменение суммарного пробега относительно 2009 г.
2016	308	1,38
2022	391	1,59
2030	509	2,07



**Рис. 2.30.** Принципиальная схема общего вклада в показатели подвижности городского населения различных характеристик транспортного спроса

Рост количества автомобилей в собственности граждан опережает рост суммарного пробега всех зарегистрированных автомобилей. Это связано со следующими двумя факторами:

- во-первых, наблюдается снижение интенсивности использования личных автомобилей;
- во-вторых, наблюдается падение средней длины поездки, приходящейся на один зарегистрированный автомобиль.

Оценить уменьшение средней длины поездки, приходящейся на один автомобиль, можно из стремления водителями сохранить ощущаемое время поездки в определенных рамках, поэтому при падении скорости движения вследствие увеличения интенсивности и загрузки участков улично-дорожной сети водители сокращают общую длину каждой поездки с целью экономии своего личного времени.

Соответствующие поправки, учитывающие данный факт, необходимо вносить в транспортную модель городов на этапе генерации транспортного спроса.

### 2.2.2. Анализ разделения (расщепления) транспортных корреспонденций по видам транспорта (Modal Split)

Для построения модели расщепления и исследования изменения отношения Modal Split считаем возможным использовать данные, представленные компанией Systematica (табл. 2.9).

Таблица 2.9

#### Данные, предоставленные компанией Systematica (Италия)

Год	Количество автомобилей	Население, чел.	Автомобилей на 1000 жителей	Всего корреспонденций	Из них на индивидуальном транспорте	Среднее число корреспонденций на чел. в день
2001	33 239 029	56 960 692	584	124 827	74 094	3,0
2002	33 706 153	56 993 742	591	118 497	66 705	3,0
2003	34 310 446	57 321 070	599	122 664	74 418	3,0
2004	33 973 147	57 888 245	587	115 419	63 397	2,9
2005	34 667 485	58 462 375	593	118 285	71 471	3,0
2006	35 297 282	58 751 711	601	117 371	74 475	2,9
2007	35 680 097	59 131 287	603	127 940	84 127	3,2
2008	36 105 183	59 619 290	606	128 968	83 620	3,2
2009	—	60 045 068	—	116 981	78 882	3,0

Следует отметить, что существуют определенные трудности имплементации исследованных статистических данных для целей прогнозирования транспортного спроса в крупных российских городах:

- сложно однозначно определить соответствие между различными годами для сопоставления показателей долей корреспонденций для городов Италии и крупных российских городов;

- из-за большого разрыва в годах, приведенных в представленных статистических материалах для Германии и Италии, вызывает затруднение сопоставление этих данных и объединение в общий тренд.

Из этих данных можно определить изменение Modal Split по годам для Италии (табл. 2.10).

Таблица 2.10

## Изменение Modal Split в городах Италии по годам

Год	Доля корреспонденций ИТ	Доля корреспонденций ОТ
2001	0,594	0,406
2002	0,563	0,437
2003	0,607	0,393
2004	0,549	0,451
2005	0,604	0,396
2006	0,635	0,365
2007	0,658	0,342
2008	0,648	0,352
2009	0,674	0,326

Доля корреспонденций индивидуального транспорта рассчитана как отношение количества корреспонденций индивидуального транспорта к общему количеству корреспонденций. Доля корреспонденций общественного транспорта рассчитана как отношение количества корреспонденций общественного транспорта к общему количеству корреспонденций.

На основе данных по городам Италии можно экстраполировать значения для общего количества корреспонденций в виде логарифмической функции. В итоге был получен следующий вид функции:

$$y = 1\,506\,283,89671 \ln(x) - 11\,330\,754,94793, \quad (2.29)$$

где  $x$  – прогнозируемый период (год).

Мы провели ретроспективную экстраполяцию статистических данных для городов Италии и получили данные по уровню автомобилизации в соответствии с данными, полученными для Германии. Таким образом, данные по уровню автомобилизации по Италии для 2007 г. соответствуют данным по Германии 1994 г. Следовательно, временное соотношение искомых параметров между городами Италии и России выстроится как соответствие 1982 г. к 2008 г.

Таблица 2.11

**Общее количество корреспонденций**

Год		Общее количество транспортных корреспонденций по городам Италии, тысяч	Общее количество транспортных корреспонденций в крупном российском городе
Италия	Россия		
1982	2008	104744	1950000
1989	2016	110055	2048865
1995	2022	114592	2105202
2003	2030	122664	2283611

Таблица 2.12

**Доля корреспонденций на индивидуальном транспорте (по годам)**

Год		Доля корреспонденций на индивидуальном транспорте
Италия	Россия	
1982	2008	0,55
1989	2016	0,612
1995	2022	0,593
2003	2030	0,607

Затем мы получили общее количество транспортных корреспонденций по крупным российским городам для прогнозных временных отрезков как пропорциональное увеличение относительно 2008 г. (табл. 2.11). Пропорциональные соотношения строились относительно исходных данных по городам Италии.

Таким образом, к 2030 г. общий объем транспортных корреспонденций вырастет на 17%. Важно понимать, как изменится соотношение между корреспонденциями ИТ и ОТ внутри этого объема.

Проследим, как меняются доли корреспонденций на индивидуальном транспорте от общего количества корреспонденций по данным, приведенным в табл. 2.11.

Проведем экстраполяцию для долей корреспонденций на индивидуальном транспорте (табл. 2.12), для которой выберем экспоненциальный вид функции:

$$y = 0,00000130193978385121e^{0,00651711962543928000x}, \quad (2.30)$$

где  $x$  – прогнозируемый период (год).

Приведем еще один способ получения суммарного суточного пробега парка автомобилей для крупного города. Определять его будем в результате выполнения следующих последовательных действий:

Поделим среднегодовой пробег одного автомобиля на 365 и получим среднесуточный пробег одного автомобиля.

Умножим показатель среднесуточного пробега одного автомобиля на количество автомобилей и получим суммарный суточный пробег всех зарегистрированных в городе автомобилей.

Для того чтобы получить среднегодовой пробег на прогнозные годы для крупного российского города, проведем экстраполяцию данных по среднегодовому пробегу в Германии. Полученные данные будем использовать для вычислений по алгоритму, описанному выше, в пунктах 1 и 2.

Основное отличие такого подхода от приведенного в начале главы способа получения суммарного суточного пробега путем экстраполяции самого суточного пробега заключается в том, что производится экстраполяция исходных данных (то есть годового пробега автомобиля), а не значений, полученных в результате последующих вычислений. Так как суммарный суточный пробег всех автомобилей зависит от двух параметров – количества автомобилей и среднесуточного пробега одного автомобиля, то предполагается, что наиболее достоверные данные получатся, если экстраполировать каждый из параметров отдельно, а не их произведение.

Проведем экстраполяцию для среднегодового пробега одного автомобиля (рис. 2.31). В этих целях будем использовать логарифмический вид функции (см. рис. 2.29). Для среднегодового пробега одного автомобиля получилась функция следующего вида:

$$y = -343,59354 \ln(x) + 2\,620,85052. \quad (2.31)$$

Численное значение экстраполируемых данных о среднегодовом пробеге одного автомобиля приведено в табл. 2.13 и выделено в рамку.

На материале полученных данных был определен суточный пробег одного автомобиля и суммарный суточный пробег по состоянию на базовый 2008 г. и последующих прогнозных временных отрезков (табл. 2.14).

Все полученные параметры транспортной подвижности сведены в итоговую таблицу (табл. 2.15).

Для удобства восприятия в табл. 2.15 (с. 128–129) перечислены источники информации, на базе которых получены итоговые цифры

Таблица 2.13

## Среднегодовой пробег одного автомобиля

Год		Среднегодовой пробег одного автомобиля, тыс. км
для городов России	для городов Германии	
2008	1969	14,7
	1970	14,4
	1971	14,2
	1972	13,8
	1973	13,5
	1974	13,1
	1975	13,7
2016	1976	13,5
	1977	13,3
	1978	13,2
	1979	12,9
	1980	12,8
	1981	11,9
2022	1982	12,2
	1983	12,4
	1984	12,5
	1985	11,82
	1986	11,64
	1987	11,47
	1988	11,30
	1989	11,12
2030	1990	10,95

прогнозных временных отрезков для транспортной подвижности в крупных российских городах.

Изменение подвижности населения спрогнозировано до 2030 г. Уровень автомобилизации к этому времени достигнет показателя 509 автомобилей на 1000 жителей. Среднесуточный пробег одного автомобиля сократится до 30 км. Соотношение объемов транспортных корреспонденций достигнет уровня 60% на индивидуальном транспорте и 40% транспортных корреспонденций на общественном транспорте.

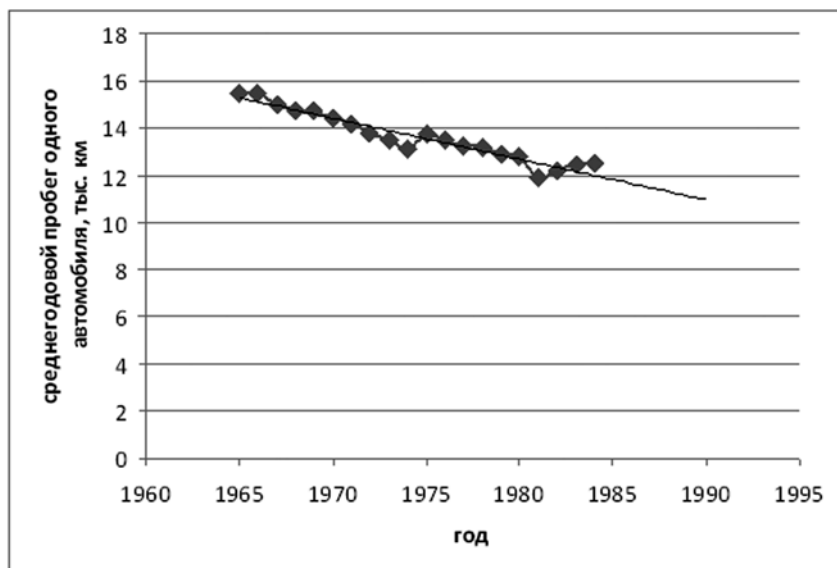


Рис. 2.31. Экстраполяция среднего годового пробега одного автомобиля

Таблица 2.14

## Суммарный суточный пробег и суточный пробег одного автомобиля

Год для российских городов	Среднесуточный пробег одного автомобиля	Суммарный суточный пробег
2008	44,1	9077539
2016	37,0	11391781
2022	33,4	13069041
2030	30,0	15270000

Полученные соотношения являются базовыми параметрами для построения моделей изменения транспортной подвижности населения крупных городов во времени. Можно предположить, что найденные зависимости статичны по отношению к большинству макроэкономических показателей жизни общества в современных крупных индустриальных городах Европы и России. Полученные параметры и их прогнозы на перспективу позволят исследователям в области транспортного планирования и организации дорожного движения давать качественные и количественные оценки эффективности тех или иных проектов в области развития транспортных систем городов.

Таблица 2.15

**Итоговые значения параметров транспортной подвижности**

Год	Параметр		
	Уровень автотомобилизации, авт./тыс. жителей	Среднесуточный пробег одного автомобиля, км	Суммарный суточный пробег всех автомобилей, км
2008	206	44,0	9 077 539
2016	308	37,0	11 391 781
2022	391	33,4	13 069 041
2030	509	30,0	15 270 000
Источник	Данные по городам Германии		Расчет
Способ получения	Соответствие по годам	Соответствие по годам + экстраполяция исходных данных	Произведение среднесуточного пробега одного автомобиля и кол-ва автомобилей

### **2.3. Система мониторинга состояния и режимов функционирования дорожно-транспортного комплекса крупных городов**

Для создания качественных инструментов выработки управленческих решений по формированию эффективной, безопасной и устойчивой транспортной системы крупного города необходимо решить три методические задачи:

- создать модель транспортного спроса;
- создать модель транспортного предложения;
- разработать систему мониторинга состояния и условий движения на улично-дорожной сети.

Решение этих трех задач открывает возможность разработки прикладных математических моделей, необходимых при решении задач



Таблица 2.15

## населения крупного российского города по годам

Параметр		
Общее количество корреспонденций	Доля корреспонденций на индивидуальном транспорте	Кол-во корреспонденций на индивидуальном транспорте
1 995 000	0,55	1 097 250
2 048 865	0,612	1 253 905
2 105 202	0,593	1 248 385
2 283 611	0,607	1 386 152
Данные по городам Италии		Расчет
Экстраполяция исходных данных, их пропорциональное изменение данных для городов России	Экстраполяция исходных данных	Произведение доли корреспонденций на индивидуальном транспорте и общего кол-ва корреспонденций

развития транспортных систем городов, транспортного планирования и организации дорожного движения.

Оценка состояния и условий движения на улично-дорожной сети – необходимый этап при создании системы моделирования и прогнозирования транспортных потоков, состояния загрязнения атмосферы городов, шумового загрязнения, моделирования и прогнозирования параметров транспортной безопасности. От качества, полноты и достоверности исходной информации напрямую зависят как адекватность создаваемой модели, так и результаты моделирования и прогнозирования многих процессов [128, 97].

Возникает необходимость в создании методики ведения непрерывного мониторинга состояния и условий движения на УДС города, обладающей максимальной функциональностью и применимостью для

разрешения наибольшего количества проблем, возникающих при эксплуатации транспорта в условиях большого города.

Методика оценки состояния и условий движения на улично-дорожной сети города должна удовлетворять ряду основных требований:

1. Требование универсальности.

Количество и перечень оцениваемых параметров о составе транспортных потоков и условий их движения по улично-дорожной сети города, равно как и точность и степень дискретизации всех необходимых для расчета параметров, не должны зависеть от каких-либо пространственных или временных факторов.

2. Требование непрерывности и системности.

Методика сбора любой необходимой информации должна обеспечивать возможность ведения непрерывного наблюдения за всеми параметрами в режиме постоянного мониторинга. Степень дискретизации, полнота и точность информации, характеризующей состояние и условия движения на улично-дорожной сети, должны позволять построение адекватных и непрерывных во времени математических моделей поведения каждого исследуемого параметра.

3. Требование минимизации стоимости натуральных исследований.

Учитывая тот факт, что величина затрат на создание системы моделирования и прогнозирование транспортных систем городов напрямую зависит от затрат на сбор необходимой исходной информации в ходе проведения натуральных исследований, методика сбора показателей должна обеспечивать получение максимума информации при минимуме материальных затрат.

Выбор основных параметров, включенных в систему мониторинга транспортных потоков на улично-дорожной сети города, основывался на следующих принципах:

1. Состав и количество параметров должны максимально полно и однозначно определять характер и степень удовлетворения существующего на территории транспортного спроса имеющимся в распоряжении сообщества транспортным предложением.

2. Технология сбора выбранных показателей должна обеспечивать максимальную достоверность собираемой информации. Выполнение этого требования в большей степени определяет итоговую ошибку получаемых на основе такой информации математических моделей.

Например, в ходе замеров показателей интенсивности транспортных потоков можно задать цель измерения мгновенной скорости транспортного потока или замер некоторых параметров ездовых циклов отдельных групп автомобилей, а также автоматически на этапе подсчета количества транспорта более детально делить весь транспортный поток на отдельные группы.

Все эти шаги способствуют более полному и детальному изучению характера движения и, как следствие, приводят к более качественным

и достоверным результатам. Однако проведенные многочисленные эксперименты по учету и замерам ряда дополнительных параметров транспортных потоков заставили отказаться от учета многих, без сомнения полезных, параметров, характеризующих движение транспортного потока.

Проанализировав собранную в процессе проведения пробных замеров информацию о некоторых дополнительных параметрах транспортных потоков, исследователи обнаруживают крайне низкую стабильность результатов наблюдений, небольшой коэффициент автокорреляции между сходными по смыслу параметрами, существенную величину случайной ошибки. Подобные объективные трудности при сборе информации по ряду параметров заставили отказаться, например, от замеров количества автомобилей, находящихся в очереди перед регулируемым перекрестком, а также автоматического деления транспортного потока на мелкие составные группы по видам транспорта, как требует того ряд известных методик.

Состав и количество параметров, механизм, технология и методика сбора необходимой исходной информации, как и дальнейшее получение расчетной информации должны отвечать принципу минимизации затрат на их проведение. Работы по проведению натурных обследований структуры и интенсивности транспортных потоков чрезвычайно дорогостоящие и требуют привлечения большого количества людей. Поэтому увеличение количества измеряемых показателей, как и ужесточение методик по сбору информации, автоматически приводит к увеличению числа учетчиков, принимающих участие в исследованиях или к росту продолжительности проведения исследований.

В предлагаемой методике предусмотрены различные варианты, позволяющие максимально сократить прямые затраты на сбор информации о параметрах транспортных потоков.

Комплексное выполнение всех этих принципов позволяет создать функционально независимую систему. Наиболее полно и детально методика сбора, описания и анализа информации о характере функционирования улично-дорожной сети города Перми изложена в специальной литературе [7, 129].

В данной главе приводятся основные результаты проведенных многочисленных обследований состояния и условий движения на улично-дорожной сети Перми, а также основные закономерности поведения ряда параметров, определяющих величину выбросов загрязняющих веществ транспортным потоком во времени.

Система мониторинга состояния и условий движения на улично-дорожной сети города включает в себя:

- анализ количественного состава и технического состояния парка АТС города;

– анализ режимов работы улично-дорожной сети города с использованием современных геоинформационных систем.

Анализ режимов работы улично-дорожной сети города проводится отдельно по четырем группам перегонов города:

1) участки УДС городского центра (зона А) (1 зона):

– для зон данного типа характерна максимальная деловая активность;

2) участки УДС в центральных районах города, прилегающие к городскому центру (зона В) (4 зоны):

– для зон данного типа характерна преобладающая высотная застройка и многофункциональное использование территории;

3) участки УДС в удаленных районах (зона С) (3 зоны):

– зоны данного типа имеют собственные центры деловой и социальной активности. Перспектива – преобразование данных участков в самостоятельные поселения и их автономизация;

4) участки УДС на въездах и выездах из города.

При этом исследуются суточная интенсивность транспортных потоков, недельные и сезонные колебания интенсивности, а также структура и скоростные параметры транспортных потоков.

### **2.3.1. Анализ объемов транспортного предложения в крупных городах**

Проведем анализ состояния транспортной системы крупного города на примере Перми, отдельно рассмотрев транспортное предложение, а также основные закономерности функционирования транспортной системы города.

#### **Анализ состава парка транспортных средств крупных городов**

Анализ количественного состава парка АТС проводится на основании данных статистической отчетности РЭО ГИБДД и транспортной инспекции за несколько лет по основным видам транспорта: грузовые автомобили, легковые автомобили, а также по принадлежности: частный, муниципальный или государственный, прочий.

Особенностью современного периода является непрогнозируемый и неконтролируемый рост парка легкового индивидуального транспорта. По данным 1970 г., парк автомобилей в мире составлял около 250 млн единиц, к 2000 г. он достиг 604 млн единиц.

По Пермскому краю к 2010 г. количество зарегистрированных автомобилей составило 845 274 единицы. Таким образом, количество автомобилей, приходящихся на 1000 жителей области, составляет около 312 единиц (для сравнения: уровень 10-летней давности – 216 единиц транспортных средств на 1000 жителей).

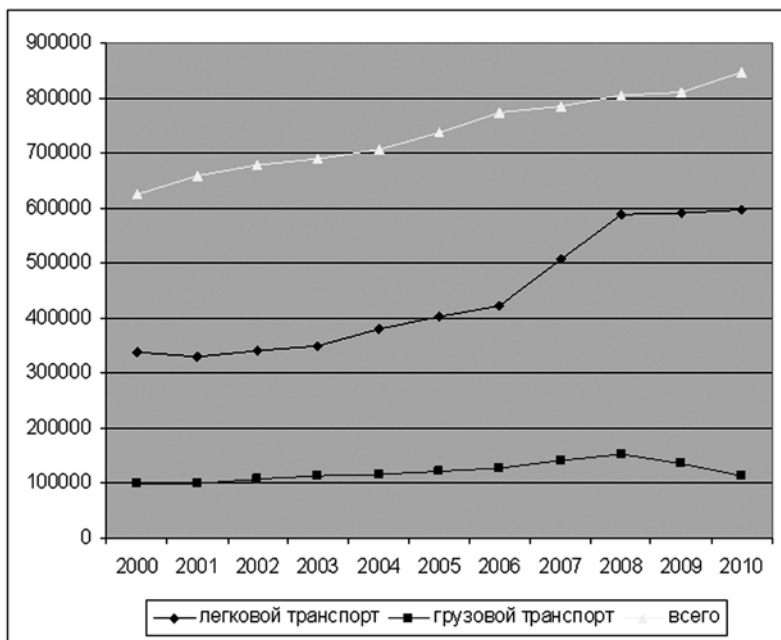


Рис. 2.32. Количество зарегистрированного транспорта на территории Пермского края

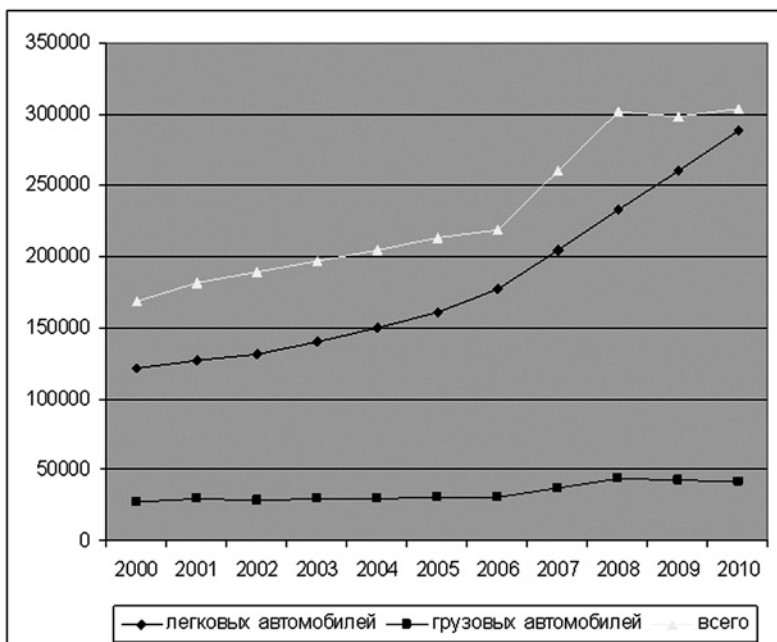


Рис. 2.33. Количество зарегистрированного транспорта в Перми

Рост общей численности автотранспортных средств в Перми и Пермском крае происходит в основном за счет легкового транспорта, кроме того, из года в год повышается доля автотранспорта, принадлежащего индивидуальным владельцам (физическим лицам).

На графиках (рис. 2.32 и 2.33) видно, что за последние 5 лет количество автомобилей в Пермском крае увеличилось на 9,5%, а в Перми – на 39%. Этот прирост происходит в основном за счет увеличения количества частного автомобильного транспорта.

Анализируя статистическую информацию о динамике изменения автомобильного парка города и области, можно построить функциональные зависимости количества зарегистрированных автомобилей по годам за последние 10 лет. Уравнение (2.32) описывает закономерность роста парка автомобилей в Пермской области, а уравнение (2.33) – в г. Перми.

$$y = 21300 \times x - 41969725, \quad (2.32)$$

$$y = 19737 \times x - 39356121, \quad (2.33)$$

где  $y$  – количество зарегистрированного автотранспорта;  $x$  – год (2000, 2001, ...).

Прогнозирование увеличения автомобильного парка Перми и области на следующие несколько лет показывает с достоверностью 95%, что при таких темпах роста к 2015 г. число автомобилей в г. Перми может достигнуть величины более 400 000 единиц, а в Пермской области – около 950 000.

На рис. 2.32 и 2.33 также показано, что рост автомобильного парка как в Перми, так и в области, происходит в основном за счет легковых автомобилей, доля которых в общем количестве автомобилей в Перми составляет около 80%, а в Пермской области – около 75%.

Такая ситуация с изменением количественного и качественного структурного состава парка транспортных средств, характерная в целом и для России, привела к лавинообразному росту интенсивности транспортных потоков на улично-дорожной сети городов при этом особенно тяжелое положение складывается в центральных частях крупных городов [59].

Повышение интенсивности транспортных потоков с одновременным снижением пропускной способности отдельных транспортных связей вследствие значительного паркования транспортных средств в системе УДС приводит к ухудшению качественных показателей функционирования улично-дорожной сети. Средняя скорость транспортного потока по данным 2010 г. в центральной части за день самая низкая относительно других (нецентральных и периферийных) районов

города и составляет 22,1 км/ч, при удалении от центра города скорость возрастает и в среднем составляет 31,1 км/ч [66].

Следствием такой ситуации является снижение эффективности функционирования улично-дорожной сети, увеличение времени нахождения транспортных средств на улично-дорожной сети, повышение путевого расхода топлива всех транспортных средств, составляющих транспортный парк. Все это приводит к ухудшению качества жизни на исследуемой территории.

Косвенно о техническом состоянии автомобильного парка крупных городов можно судить по среднему возрасту транспортных средств, зарегистрированных на территории города: так, к концу 2010 г. средний возраст АТС составляет 8 лет и 4 месяца. В 2004 г. средний возраст АТС был 12 лет и 8 месяцев, в 2006 г. – 9 лет и 1 месяц. Парк транспортных средств молодеет. На рис. 2.34 приведена диаграмма количества легковых автомобилей разных годов выпуска, зарегистрированных в Перми.



**Рис. 2.34.** Количество автомобилей разных годов выпуска, зарегистрированных в Перми

Техническое состояние АТС, движущихся в транспортном потоке, оказывает серьезное влияние на показатели эффективности функционирования всей транспортной системы города.

Анализ подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования

По данным ГИБДД, представленным в 2010 г., на территории Перми зарегистрировано 2547 автобусов. Их средний возраст составляет 17 лет 2 месяца. Количество используемого на территории Перми общественного транспорта представлено в табл. 2.16.

Таблица 2.16

**Парк транспортных средств используемых на маршрутной сети  
городского пассажирского транспорта общего пользования**

Год	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Общее количество единиц подвижного состава общественного транспорта	1464	1493	1453	1498	1524	1493	1346
Трамвай	222	219	223	221	209	198	193
Троллейбус	131	129	130	127	120	113	126
Автобус	1111	1145	1100	1150	1195	1182	1027

Таблица 2.17

**Коэффициент выпуска на линию по видам транспорта**

Год	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Трамваи	0,758	0,649	0,621	0,548	0,53	0,615	0,68
Троллейбусы	0,638	0,627	0,678	0,681	0,82	0,859	0,653
Автобусы	0,542	0,68	0,58	0,652	0,592	0,626	0,73

В течение дня подвижной состав транспортных средств, используемых для осуществления перевозки пассажиров ГПТ ОТ, выходит на линию не полным составом. В табл. 2.17 приведены коэффициенты выпуска на линию парка транспортных средств ГПТ ОТ.

Показатели работы городского пассажирского транспорта общего пользования указаны в таблицах, средний возраст используемых средств общественного транспорта превышает средний возраст всех зарегистрированных транспортных средств почти на 10 лет. Нестабильность и неудовлетворительное состояние общественного транспорта стимулируют пассажиров пересаживаться на легковые автомобили.

### **Техническое состояние и динамика развития улично-дорожной сети**

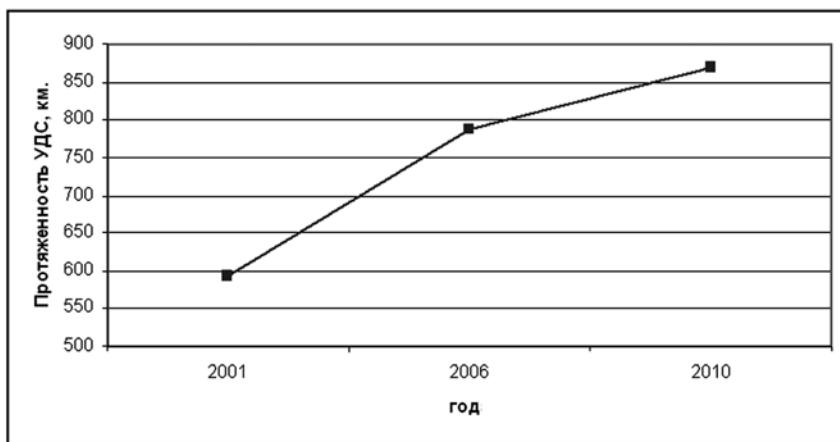
Основной дорожно-транспортного комплекса городов является улично-дорожная сеть города. Требуются надежные источники информации об основных технических характеристиках УДС, а также инструментальные способы формализации этой информации. Чтобы более полно охарактеризовать ситуацию с загрязнением автотранспортом атмосферы города, рассмотрим современное состояние УДС города Перми.



Состояние улично-дорожной сети предлагается оценивать по следующим показателям:

- протяженность улично-дорожной сети и ее элементы различного назначения;
- средняя плотность дорог в различных частях города;
- пропускная способность участков сети, различные системы транспорта;
- основные технические характеристики элементов сети, заданные эксплуатационные ограничения.

Общая протяженность улично-дорожной сети Перми составляет около 868 км. На рис. 2.35 приведена диаграмма изменения протяженности улично-дорожной сети с 2001 по 2010 г.

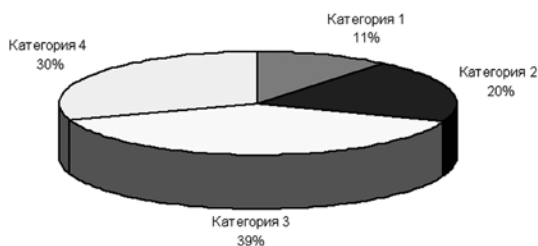


**Рис. 2.35.** Изменения протяженности улично-дорожной сети г. Перми с 2001 по 2010 г.

По данным управления внешнего благоустройства администрации города Перми, площадь автомобильных улиц и дорог по категориям изменялась с 2001 по 2010 г. следующим образом (табл. 2.18).

Категории участков дорог и улиц в городе определяют исходя из уровня их содержания.

На диаграмме (рис. 2.36) отражено процентное соотношение разных категорий автомобильных дорог в Перми.



**Рис. 2.36.** Соотношение разных категорий автомобильных дорог в Перми по состоянию на 2010 г.

Таблица 2.18

## Площадь дорог по содержанию в 2001, 2006 и 2010 гг.

Категории	2001 г.		2006 г.		2010 г.	
	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Процент категории от общей площади	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Процент категории от общей площади	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Процент категории от общей площади
I	287,46	4	652,36	6,9	1021,505	10,7
II	1286,6	18	1986,98	21,0	1913,291	20,1
III	4601,1	64,7	4260,26	45,1	3700,975	38,9
IV	941,35	13,2	2544,41	26,9	2885,577	30,3

В Перми ситуацию с протяженностью автомобильных дорог нельзя назвать критической. Средняя плотность улично-дорожной сети на всей площади города (799,68 км<sup>2</sup>) составляет 1,09 км на км<sup>2</sup>, без учета площади городских лесов и водных объектов этот показатель равен 2,13 км на км<sup>2</sup>, тогда как оптимальной величиной считается значение 2,2–2,4 км на км<sup>2</sup>.

Значит, можно сделать вывод о том, что уменьшения нагрузки автотранспорта на экологию города необходимо добиваться путем правильной организации дорожного движения.

### 2.3.2. Анализ режимов работы улично-дорожной сети города с использованием современных геоинформационных систем

В качестве основы для проведения анализа режимов работы УДС крупных городов использованы данные экспериментальных исследований параметров транспортных потоков, собранных на УДС г. Перми в 2001–2010 гг.

Под режимами работы УДС в нашем случае будем понимать совокупность всех формализуемых параметров, описывающих состояние транспортного потока во времени и УДС в пространстве, влияющих в итоге по факту на показатели эффективности функционирования транспортной системы и определяющих их.

Исследуемые параметры, характеризующие состояние и условия движения на улично-дорожной сети городов, в свою очередь, зависят от целого ряда формализуемых, а также неформализуемых параметров. Они в целом образуют два класса параметров, изменяющихся:

- в пространстве;
- во времени.

Введение какой-либо классификации для параметров транспортных потоков, имеющих пространственную принадлежность, в самом общем случае сопряжено с одной существенной проблемой, а именно: далеко не всегда возможно сформулировать четкие и понятные прин-

ципы деления различных участков улично-дорожной сети на какое-то ограниченное число классов по территориальной принадлежности. Кроме того, именно на этом этапе при последующем моделировании транспортных систем городов теряется самое главное – общность подходов.

Каждый город по-своему уникален, что делает абсолютно бесперспективными попытки разработки универсальных моделей, описывающих поведение транспорта в городах. Как следствие, теряется общность, возможность масштабирования и переноса создаваемых математических моделей на другие города.

Попытки описания различных параметров, определяющих как поведение транспортных потоков, так и изменение состояния сети во времени, гораздо более успешны. Давно является бесспорным фактом то, что поведение транспортных потоков – это полное отражение состояния деловой активности населения городов. Как и в других сферах человеческой деятельности, здесь существуют спады и подъемы деловой активности, связанные, в первую очередь, с объективно существующими законами, определяющими ритм жизни человека. На самом низком уровне они определяют суточные, недельные и сезонные колебания интенсивности транспортных потоков.

Конечная прикладная задача получения функциональных зависимостей интенсивности транспортных потоков в различных циклах их колебаний – это возможность ее прогнозирования на всей улично-дорожной сети города в любой момент времени.

Необходимая информация для проведения анализа режимов работы УДС и разработки математических моделей, описывающих состояние сети во времени, получена из четырех основных источников:

- натуральных наблюдений при помощи учетчиков;
- из районных отделов ГИБДД, данные о регистрации АТС – из РЭО УГИБДД УВД Пермской области;
- о проезжающих транспортных средствах – с постов ДПС, оборудованных аппаратно-программными комплексами (АПК) «Сова-2», а также с камер видеонаблюдения, установленных на центральных перекрестках города, обрабатываемых СМЭУ ГУВД;
- с GPS-навигаторов индивидуальных владельцев автомобилей с последующей обработкой треков.

В качестве основных характеристик элементов УДС города использованы данные о геометрических параметрах сети и некоторых средствах регулирования (в том числе технических) дорожного движения.

Кроме основных параметров, определяющих эффективность функционирования транспортной системы города (интенсивности, структуре и скорости транспортного потока), проанализировано влияние ряда дополнительных параметров, влияющих на параметры функцио-

нирования всей транспортной системы. К дополнительным предлагается отнести параметры, характеризующие:

- УДС: величину продольного профиля участков дорог (перегонов);
- транспортный поток: загрузку транспортных средств; величину задержек транспортного потока; ездовые циклы различных групп АТС в потоке.

Регистрацию параметров транспортных потоков выполняли одновременно на 247 перекрестках города (811 перегонов улично-дорожной сети города) в течение 13 часов – с 7:00 до 20:00. В качестве основного инструмента для обработки и анализа собранной информации выбрана геоинформационная система (ГИС) «Вега». Информация о параметрах транспортных потоков занесена в базу данных и затем при помощи ГИС «Вега» привязана к электронному плану города. ГИС подразумевает наличие основы – цифровой карты территории, к которой привязана информация, содержащаяся в базах данных. ГИС хранит информацию о городе и его УДС в виде набора тематических слоев, объединенных на основе географических координат.

Собранная информация позволила:

- в целом оценить состояние и условия движения на улично-дорожной сети г. Перми;
- спрогнозировать ситуацию с дорожным движением в г. Перми на ближайшую перспективу;
- получить ряд качественных и количественных показателей, характеризующих эффективность функционирования УДС и влияние автомобильного транспорта на загрязнение атмосферы города.

Детально методика сбора и анализа информации о режимах работы УДС г. Перми изложена в специальной литературе [7, 129].

Система мониторинга состояния и условий функционирования транспортной системы города, кроме самостоятельной ценности, является необходимым звеном в построении транспортных моделей городов.

На заключительном этапе – калибровки транспортной модели – производится сопоставление натуральных и статистически установленных параметров функционирования транспортной системы с расчетными параметрами, появившимися в результате моделирования.

Ценность информации, получаемой в результате мероприятий по мониторингу, определяется не столько возможностью прогнозировать ее во времени, сколько тем, насколько адекватной в последующем будет созданная на основе этой информации (после процедуры калибровки) транспортная модель города.

### Анализ общего роста интенсивности дорожного движения на УДС города

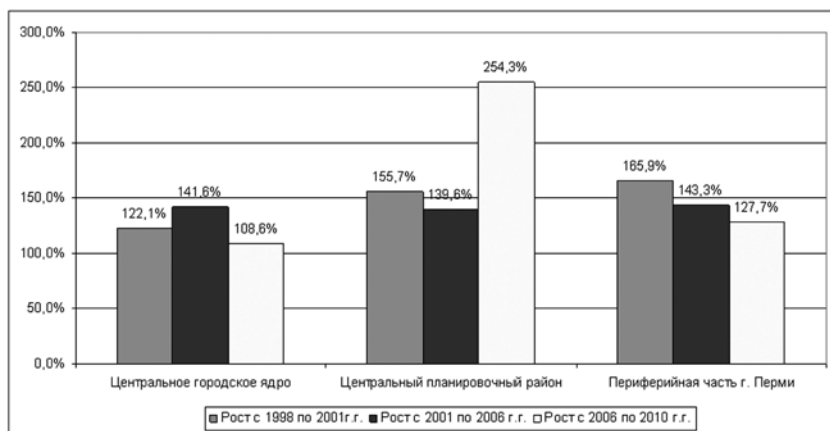
Анализ общего роста интенсивности дорожного движения на УДС выполнен по результатам обследований характеристик транспортных потоков (ТП), проводимых в 2001 и 2010 гг.

При проведении анализа под *транспортным потоком* будем понимать совокупность всех АТС, находящихся на проезжей части определенного участка УДС.

Под *структурой ТП* будем понимать марочный состав потока, то есть долю автомобилей каждой марки и модели в общем количестве АТС, составляющих ТП.

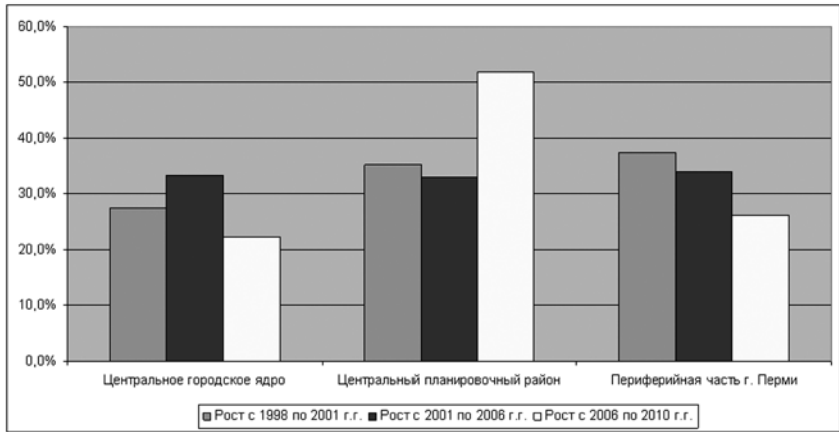
Интенсивность транспортного потока определяется количеством АТС, проследовавшим по перегону за определенный промежуток времени. Под *перегоном* понимается часть дороги, ограниченная с обеих сторон перекрестками, по которой осуществляется движение автомобилей в одну сторону [7].

Сравнив данные интенсивности транспортных потоков, полученные в 2010 г., с данными за 2001 г. и проанализировав сравнительную диаграмму, мы отметили рост интенсивности движения автомобильного транспорта (рис. 2.37, 2.38).



**Рис. 2.37.** Рост интенсивности движения в зависимости от территориального расположения улицы за 1998–2010 гг., %

В основном рост интенсивности дорожного движения приходится на улицы центрально-планировочного района города. Рост интенсивности на 2010 г. на них составляет 254,3% от уровня 2006 г. Это объясняется тем, что многие улицы центральной части уже исчерпали предел своей пропускной способности, и транспортный поток пере-



**Рис. 2.38.** Доля общего роста интенсивности движения в зависимости от территориального расположения улицы за 1998–2010 гг., %

распределяется на УДС вне ее (пользуется объездами центральных магистралей), чтобы избежать задержек в движении.

Следует предполагать, что такая тенденция останется характерной для УДС города в ближайшие годы.

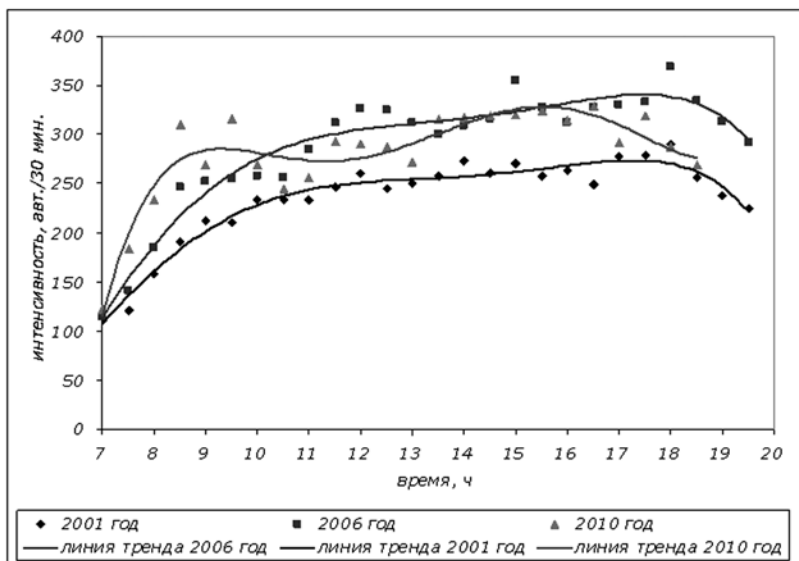
### Анализ суточной интенсивности транспортного потока на УДС города

**Перегоны центральной части города (зона А).** На перегонах центральной части города следует отметить высокую насыщенность автомобильных потоков в период с 8:00 до 20:00, не наблюдается ярко выраженных спадов и пиков интенсивности потоков транспорта. Рассмотрим суточные колебания интенсивности, усредненные по всем перегонам центральной части города для разных временных срезов (рис. 2.39).

Убедившись, что закономерность изменения интенсивности транспортного потока во времени на перегонах центральной части города незначительно зависит от направления движения, можем принять зависимость, приведенную на рис. 2.39, как приемлемую для всех перегонов центральной части города.

Динамика суточной интенсивности наилучшим образом описывается полиномиальной линией тренда пятой степени в соответствии с уравнением (2.34). Коэффициент детерминации при аппроксимации кривой составляет 0,8529:

$$y = 0,0435x^5 - 2,966x^4 + 78,915x^3 - 1024,4x^2 + 6490,5x - 15813, \quad (2.34)$$



**Рис. 2.39.** Суточные колебания интенсивности, усредненные по перегонам центральной части города (зона А)

где  $y$  – количество транспортных средств, проходящих через перегон за 30 мин;  $x$  – время обследования.

Для анализа степени загруженности участков сети будем использовать понятие «час пик» – часовой интервал времени, в течение которого наблюдается максимальная интенсивность на данном перегоне (группе перегонов) улично-дорожной сети. Анализ графика показывает, что поток транспорта, проходящий в течение часа пик, составляет 9,77% от дневного потока.

Один из показателей, характеризующих транспортные потоки, – коэффициент суточной неравномерности для суммарного потока – отношение (2.35). Он представляет собой отношение максимального часового потока к среднему часовому потоку:

$$K_{\text{н}}^{\text{сут}} = \frac{P_{\text{max}}^{\text{сут}}}{P_{\text{ср}}^{\text{сут}}}, \quad (2.35)$$

где  $P_{\text{max}}^{\text{сут}}$  – максимальный часовой поток транспорта в сутки, авт./ч;

$P_{\text{ср}}^{\text{сут}}$  – средний часовой поток транспорта в сутки, авт./ч.

Для перегонов центральной части города эта величина составляет 1,17. На наш взгляд, неравномерность незначительна, в дневное время использование улично-дорожной сети в центральных районах города

практически постоянно, так как поездки делового характера совершаются в рабочее время (см. рис. 2.39).

Еще одним показателем, характеризующим транспортные потоки, является коэффициент неравномерности движения по направлениям. Он вычисляется для каждого перегона, как частное от деления интенсивности движения в одном направлении к интенсивности движения в противоположном направлении, и затем усредняется для всего района:

$$K_{\text{напр}}^{\text{ср}} = \frac{P_{\text{пр.напр}}^{\text{ср}}}{P_{\text{обр.напр}}^{\text{ср}}}, \quad (2.36)$$

где  $P_{\text{пр.напр}}^{\text{ср}}$  – средний часовой поток транспорта в прямом направлении, авт./ч;  $P_{\text{обр.напр}}^{\text{ср}}$  – средний часовой поток транспорта в обратном направлении, авт./ч.

На перегонах центральной части города этот коэффициент близок к 1, что свидетельствует о равномерности загрузки улично-дорожной сети по направлениям. Объясняется это тем, что деловая активность населения равномерно распределена по центральной части города.

**Участки улично-дорожной сети в прилегающих к центру районах (зона В).** Интенсивность движения в зонах В существенно возросла по сравнению с предыдущими периодами. Дневные колебания интенсивности транспортных потоков в этих зонах приведены на рис. 2.40.

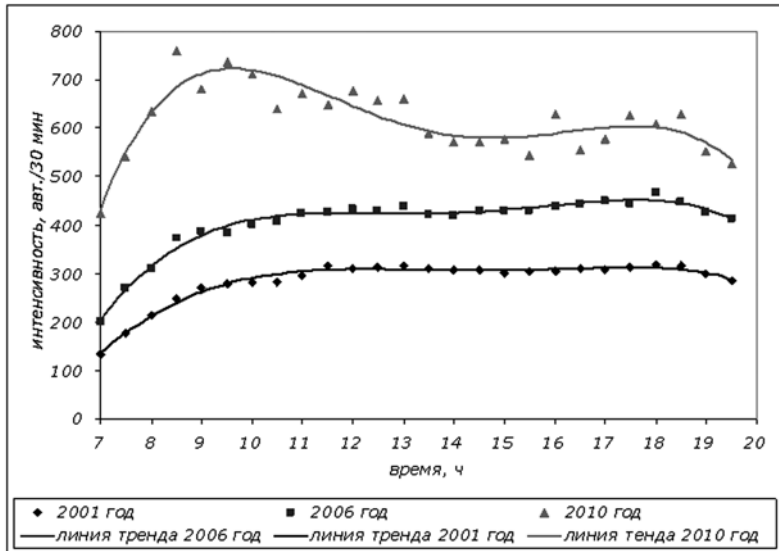


Рис. 2.40. Суточные колебания интенсивности, усредненные по перегонам прилегающих к центру районов города (зона В)



В час пик в среднем по всем перегонам данной группы проходит 8,87% от дневного потока автомобилей. Коэффициент суточной неравномерности (2,35) составляет 1,25.

На магистралях в зонах В города коэффициент неравномерности движения транспорта по направлениям колеблется в пределах 1,09–1,23 (большее значение соответствует утреннему и вечернему времени) и составляет в среднем 1,15.

Таким образом, на этой группе перегон, так же как и на перегон центральной части города, наблюдается примерно одинаковая степень загруженности дорог в обоих направлениях, хотя и в меньшей степени, чем в центре города. Это можно объяснить движением транспортного потока к центру города в начале рабочего дня и его оттоком к периферии – в конце.

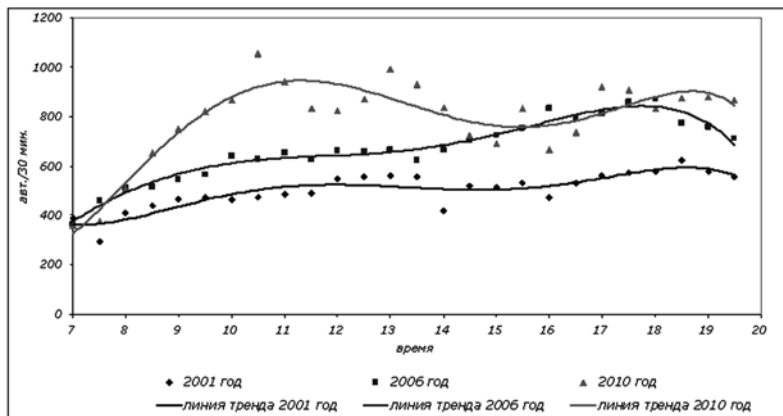
#### **Участки улично-дорожной сети в удаленных районах (зона С).**

В среднем в час пик по перегон периферийных районов проходит 10,7% от дневного потока.

Коэффициент суточной неравномерности составляет 1,25, а неравномерности по направлениям движения – 1,15. Такой характер колебаний интенсивности транспортных потоков указывает на рабочий характер поездок: в утреннее время поток направляется из спального района к центральной части города, а вечером – возвращается.

**Автомагистрали, являющиеся продолжением внешних автомобильных дорог, – въезды в город.** Рассмотрим интенсивность движения транспортного потока на въездах в город (рис. 2.41 и 2.42) в различных временных срезах.

Перегоны этой группы характеризуются более высоким коэффициентом суточной неравномерности – 1,3, чем в остальных районах города. В часы пик (на въезде 8:30–9:30 и на выезде 11:00–12:00) че-



**Рис. 2.41.** Дневная интенсивность на выезде из города

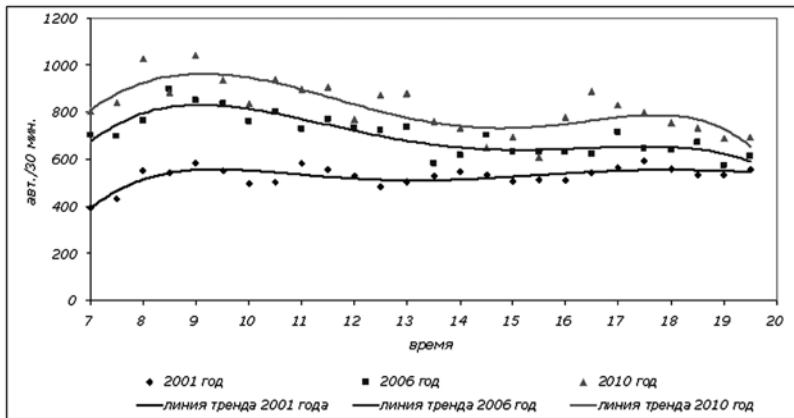


Рис. 2.42. Дневная интенсивность на въезде в город

рез въезды в город проходит 11,44% дневного потока автотранспорта. Коэффициент неравномерности распределения потока по направлениям – 1,15, что свидетельствует о небольшом различии в степени загруженности направлений въезда и выезда из города и еще раз подтверждает предположение о ежедневном движении населения к месту работы и обратно.

### Структурный анализ транспортного потока

Для получения наиболее полной картины режимов работы дорожно-транспортного комплекса города необходимо провести анализ структуры наблюдаемых транспортных потоков. Данные о процентном содержании различных типов транспортных средств в общем потоке, дополненные информацией об их загруженности, могут позволить точнее оценить объемы транспортной работы в системе.

На перегонах центральной части города (зона А) потоки достаточно однородны. По данным 2010 г., удельный вес грузовых автомобилей в потоке составляет около 3,5% от всего транспортного потока по сравнению с тем же показателем 2001 г. – 7%. Снижение процентного содержания грузовых автомобилей в общем потоке произошло из-за увеличения использования индивидуального транспорта.

Доля общественного транспорта в транспортном потоке по центральным улицам в процентах составляет в среднем 4–7% от суммарного потока. Доля общественного транспорта в среднем по всем перегонам в суммарном потоке составляет 6,2% по данным 2010 г. По этому показателю также произошло незначительное снижение по сравнению с 2001 г., когда процент общественного транспорта в общем потоке составлял 7,34%.

Грузовая составляющая транспортного потока на перегонах в зоне, прилегающей к городскому центру (зона В), по данным 2010 г., составляла в среднем 7,79% от общего транспортного потока, по сравнению с 2001 г., когда этот показатель был 9,39%. Как и на центральных улицах, заметно снижение доли грузового транспорта в общем потоке.

На некоторых типичных перегонах периферийных районов города (зона С) удельный вес грузовых автомобилей колеблется от 1 до 30% и составляет в среднем 13%, а удельный вес общественного транспорта – от 0 до 30%. Причем на главных магистралях спальных районов, например на проспекте Парковом, грузовая составляющая транспортного потока крайне мала – 1,01%, а доля общественного транспорта достаточно высока – 17,03%. Такая картина характерна для всех спальных районов крупных городов.

По данным 2010 г., автомагистрали, являющиеся продолжением внешних автомобильных дорог (въезды в город), характеризуются относительно высоким уровнем грузовой составляющей – около 15% от общего потока и невысокой составляющей общественного транспорта – в среднем около 4,5%. В 2001 г. фиксировались соизмеримые показатели: соответственно 17 и 5,5%.

### **Недельные колебания интенсивности транспортных потоков**

В результате проведенных исследований по каждому классу перегонов были выявлены некоторые закономерности в недельных колебаниях для различных групп магистралей города.

После построения функциональных зависимостей интенсивности движения от времени (день недели) оказалось:

- среди перекрестков центральных районов города (зоны А и В) идентичными (одинаковыми) были зависимости для разных перекрестков и направлений движения транспортных потоков;
- среди перекрестков периферийных (спальных) районов (зона С) идентичными оказались зависимости интенсивности движения на разных перекрестках в разное время суток;
- среди перекрестков дорог въезда в город и выезда из города идентичными оказались зависимости интенсивности движения на разных перекрестках, а на направлениях выезда из города – и интенсивности движения в разное время суток.

Наблюдения, для которых зависимости интенсивности транспортных потоков идентичны, будем считать однородными, выборка составляет 18 наблюдений.

Затем определяем средние значения идентичных зависимостей интенсивности и строим их объединенные графики недельных колебаний.

**Расчет и получение коэффициентов пересчета суточной интенсивности транспортных потоков** для назначенных групп участков улично-дорожной сети. Для получения прогнозных значений недельных колебаний интенсивности транспортных потоков для всей улично-дорожной сети необходимо значения параметров суточной интенсивности транспортного потока каждого перекрестка умножить на переводные коэффициенты.

Переводные коэффициенты определяем следующим образом:

1. Находим расчетные значения среднесуточной интенсивности транспортных потоков, полученные из уравнения тренда, построенного по объединенным графикам недельной интенсивности одного типа транспортных средств. Для этого в уравнение линии тренда поочередно подставляем в качестве аргумента численные значения, определяющие каждый из дней недели (1 – понедельник; 2 – вторник и т.д.).

2. Для каждого объединенного графика строим матрицу переводных коэффициентов. По горизонтали располагаются дни недели, в которые проводили замер суточной интенсивности данного перекрестка, по вертикали – дни недели, в которых нужно получить результат. Ячейки матрицы заполняют значениями переводных коэффициентов. Для этого необходимо найти отношение интенсивности транспортного потока в нужный день недели к интенсивности транспортного потока в замеренный день недели.

Чтобы найти суточную интенсивность транспортного потока в первой половине дня понедельника у перекрестка, суточная интенсивность которого обследована в четверг, надо каждый замер его суточной интенсивности в первой половине дня умножить на соответствующий переводной коэффициент. Графики изменения интенсивности транспортных потоков по дням недели и матрицы переводных коэффициентов для разных групп перегонов приведены.

Используя матрицы переводных коэффициентов и данные по интенсивности транспортных потоков за один день недели, можно с достаточной точностью определить их интенсивность в любой день недели.

### **Анализ скоростных параметров транспортных потоков**

Характерной чертой развития процесса дорожного движения является стремление осуществлять передвижение с возможно более высокой скоростью. Скорость представляет собой одно из важнейших качеств дорожного движения, определяющих его эффективность. Скорость транспортного потока – наиболее важная характеристика для анализа режимов работы УДС, используемая для определения плотности транспортного потока.

Средняя плотность транспортных потоков на перегоне определяется отношением средней, суммарной по всем видам транспорта, интенсивности к средней скорости этого потока, а их максимальная плотность – отношением максимальной, суммарной по всем видам транспорта, интенсивности к средней скорости этого потока.

Плотностью транспортного потока оценивают степень использования пропускной способности дороги и в зависимости от этого определяют, исчерпала ли дорога свою расчетную пропускную способность или нет.

Анализ скоростных параметров транспортных потоков, проведенный на основе данных, полученных при обследовании, позволил оценить средние дорожные скорости потоков автомобильного транспорта на улицах города в зависимости от их территориального расположения. Изменение скоростных характеристик с 2001 по 2010 г. по зонам города приведено в табл. 2.19.

Таблица 2.19

#### Средние суточные скорости движения по УДС города Перми

Территория	Скорость, км/ч		
	2001	2006	2010
Городской центр (зона А)	27,9	27,8	20,6
Центральные районы (зона В)	31,2	25,5	28,3
Периферийная часть (зона С)	36,0	29,4	35,7
Весь город	31,8	27,0	24,9

По данным 2010 г., на перегонах городского центра (зона А) этот показатель составляет 20,6 км/ч; в центральной части города (зона В) – 28,3; в периферийных районах (зона С) – 35,7; на въездах и выездах из города, а также по объездной трассе – 52,3 км/ч. В целом по городу средняя дорожная скорость равна 24,9 км/ч.

Приведем аналогичные данные за 2001 г.: на перегонах городского центра (зона А) этот показатель составлял 27,93 км/ч; в центральной части города (зона В) – 31,21; в периферийных районах (зона С) – 35,96; на въездах и выездах из города – 38,61 км/ч. В целом по городу средняя дорожная скорость была равна 31,78 км/ч.

При сопоставлении данных 2010 и 2001 гг. можно отметить, что в целом по городу скорость транспортных потоков сократилась на 6,31 км/ч. Снижение скорости особенно заметно в центре города (зона А) и вблизи центрального района (зона В). Ввиду того, что в последние годы достаточно хорошо развиваются объездные магистрали, можно заметить рост скоростных характеристик транспортных потоков в целом на въездах в город и объездных магистралях города. Полу-

чаемые в результате выполнения программы мониторинга скоростные параметры транспортных потоков также служат исходными данными для калибровки транспортных моделей городов.

Сопоставление расчетных и натуральных данных о скорости транспортных потоков позволяет уточнять заданные величины пропускной способности отдельных элементов УДС города, а также отдельные параметры функций сопротивлений участков сети, перекрестков и отдельных маневров на перекрестках.

### Анализ количества ежедневно эксплуатируемого автотранспорта

Определим количество транспортных средств, одновременно движущихся по всей улично-дорожной в дневной межпиковый период. Для этого воспользуемся соотношением (2.37):

$$S_{\text{движ}} = L \times Q_{\text{сред}}, \quad (2.37)$$

где  $S_{\text{движ}}$  – сумма всех транспортных средств, одновременно движущихся по всей улично-дорожной сети Перми в данный момент (автомобилей);  $L$  – протяженность улично-дорожной сети города Перми, км;  $Q_{\text{сред}}$  – плотность транспортного потока (авт./км).

Определим среднюю плотность транспортного потока:

$$Q = N/V, \quad (2.38)$$

где  $Q$  – плотность транспортного потока на дороге с двумя полосами движения в одном направлении (авт./км);  $N$  – суммарная интенсивность транспортного потока по двум полосам движения (авт./ч);  $V$  – средняя скорость транспортного потока (км/ч).

Используя соотношение (2.37), можно найти сумму всех транспортных средств, одновременно движущихся по улично-дорожной сети в каждый получасовой интервал времени. Из соотношения (2.37) сумма всех транспортных средств, одновременно движущихся по УДС, находится как произведение протяженности УДС на среднюю плотность транспортного потока.

После этого определим, какой процент от общего количества зарегистрированных автомобилей одновременно движется по дорогам города. Для этого найдем отношение среднего количества движущихся ТС по всей УДС города к общему количеству зарегистрированных автомобилей.

Зная среднюю плотность транспортных потоков и критическую плотность для двухполосной в одном направлении дороги, нетрудно определить, при каком количестве ТС, находящихся на дорогах города, начнутся заторы. Эту величину определяют по формуле (2.39):

$$S_{крит} = S_{факт} \times \frac{q_{крит}}{q_{факт}}, \quad (2.39)$$

где  $S_{крит}$  – количество ТС, находящихся на дорогах города, при котором начнутся заторы;  $S_{факт}$  – количество ТС, находящихся на дорогах города в этот день;  $q_{крит}$  – критическая плотность транспортных потоков 120 авт./км;  $q_{факт}$  – фактическая средняя плотность транспортных потоков на УДС города.

Плотность парковки определяется отношением:

$$q_{парк} = \frac{S_{парк}}{L_{УДС}}, \quad (2.40)$$

где  $q_{парк}$  – плотность парковки;  $S_{парк}$  – сумма припаркованных автомобилей;  $L_{УДС}$  – длина УДС в данном районе.

Количество ТС, припаркованных вне мест постоянного хранения не в центральной части города, определяется как:

$$S_{парк} = q_{парк} \times (L_{УДС} - L_{УДС}^{центр}), \quad (2.41)$$

где  $q_{парк}$  – плотность парковки;  $S_{парк}$  – сумма припаркованных автомобилей;  $L_{УДС}$  – длина всей УДС в городе;  $L_{центр}$  – длина всей УДС в центральной части города;

Затем определим количество транспортных средств, одновременно двигавшихся по всей улично-дорожной сети Перми в дневной межпиковый период в 2010 г. Воспользуемся соотношением (2.37). По данным 2010 г., интенсивность транспортного потока по двум полосам движения в среднем составляет 14,9 авт./мин. Определим среднюю плотность транспортного потока по формуле (2.38):

$$Q = 14,9 \text{ авт./мин} \times 60 \text{ мин/24,9км/ч} = 36 \text{ авт./км.}$$

Приведем среднесуточную плотность движения по одной полосе по разным временным срезам с 2001 по 2010 г. Данные представлены на рис. 2.43.

Используя соотношение (2.37), находим сумму всех транспортных средств, одновременно движущихся по улично-дорожной сети Перми в каждый получасовой интервал времени. Из соотношения (2.37) сумма всех транспортных средств, одновременно движущихся по УДС, находится как произведение протяженности УДС на среднюю плотность

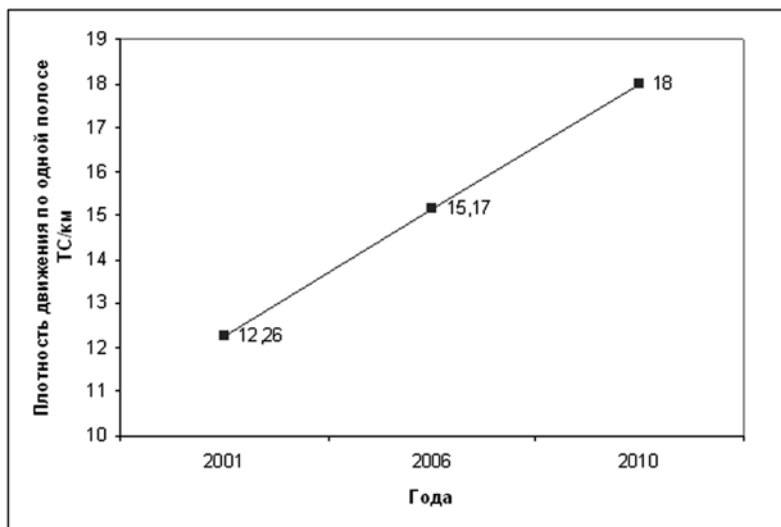


Рис. 2.43. Среднесуточная плотность движения по одной полосе, ТС/км

транспортного потока (36 ТС/км). По данным 2010 г., протяженность улично-дорожной сети г. Перми – 868 км, соответственно количество одновременно движущихся транспортных средств будет составлять 31 248 единиц в среднем по городу.

Сравнив этот показатель с 2001 г., когда этот параметр составлял 12 564 ТС, и с 2006 г. – 16760 ТС, можно сделать вывод о том, что количество одновременно движущихся транспортных средств на УДС Перми возросло в 2,5 раза по сравнению с 2001 г. и в 1,9 раза по сравнению с 2006 г. На рис. 2.44 приведен график изменения количества одновременно движущихся транспортных средств на УДС города по различным временным срезам.

Определим, какой процент от общего количества автомобилей, зарегистрированных в Перми, одновременно движется по дорогам города. Найдя отношение среднего количества движущихся ТС по всей УДС города к общему количеству автомобилей, зарегистрированных в Перми, получим 10,3%. Зная среднюю плотность транспортных потоков (36 авт./км) и критическую плотность для двухполосной в одном направлении дороги (120 авт./км), установим, при каком количестве ТС, находящихся на дорогах города, начнутся заторы. Определим значение этой величины для города Перми по формуле (2.39):

$$S_{\text{крит}} = 31248 \text{ авт.} \times (120 \text{ авт./км}) / (36 \text{ авт./км}) = 104\,160 \text{ авт.}$$

Количество ТС, находящихся на дорогах города, при котором начнутся заторы, равно 104 160 автомобилей, что составляет 34% от парка



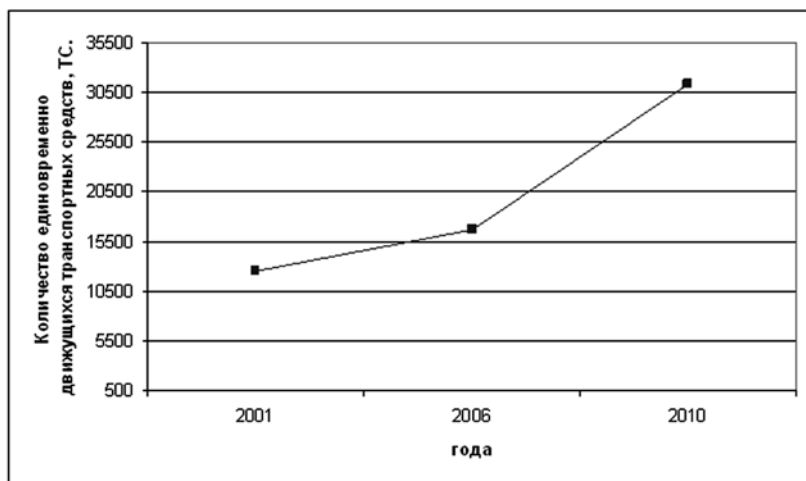


Рис. 2.44. Изменение количества одновременно движущихся транспортных средств, по данным 2001, 2006 и 2010 гг.

зарегистрированных в городе автомобилей (303 637 автотранспортных средств). Цифра 104 160 носит приближенный характер, и для ее уточнения требуются дополнительные обследования, в частности в области определения критических плотностей транспортного потока для городских дорог разного типа.

Для определения характера пользования всем транспортом необходимо проанализировать и те ТС, которые в данный момент времени не движутся, а припаркованы вне мест постоянного хранения. В качестве исходных данных используем данные о парковке автомобилей в центральной части города (зона А) и данные об изменении количества припаркованных ТС в течение дня с получасовым интервалом. Эти упрощения были приняты исходя из трудоемкости выполнения подсчета припаркованных ТС на всей УДС города.

Произведя подсчет припаркованных автомобилей в зоне А, мы определили, что в 15:00 здесь были припаркованы 2 490 автомобилей. Плотность парковки для зоны А определяем по формуле (2.40):

$$q_{\text{парк}} = 2\,490 \text{ авт.} / 18,9 \text{ км} = 131,74 \text{ авт./км.}$$

Теперь, зная характер изменения количества припаркованного автотранспорта в зависимости от времени суток, допустим, что такой характер свойствен всей территории центральной части города (зоны А и В), и можем рассчитать, как изменяется плотность припаркованных ТС в центральной части города (зоны А и В) в зависимости от времени суток.

Зная суммарную длину улично-дорожной сети центральной части города, которая составляет 104 583,25 м, имеем возможность определить количество ТС припаркованных в центральной части города (зоны А и В) в каждый временной интервал. Средняя плотность парковки в центральной части города за день составляет 131,74 авт./км, а вне ее – в 7 раз меньше (в среднем 18,9 авт./км). Число 7 носит приближенный характер и требует дополнительных обследований. Учитывая, что нам известна протяженность УДС города и дорог в центральной части города, можем определить количество ТС, припаркованных вне мест постоянного хранения вне центральной части города (зоны А и В) по формуле (2.41):

$$S_{\text{парк}} = 18,9 \text{ авт./км} \times (868\,000 \text{ м} - 104\,583,25 \text{ м}) / 1\,000 = 14\,428 \text{ авт.}$$

Просуммировав количество ТС, припаркованных вне мест постоянного хранения в центральной части города (зоны А и В), и количество ТС, припаркованных вне мест постоянного хранения за пределами центральной части, получим общее количество ТС, припаркованных вне мест постоянного хранения:

$$S_{\text{парк}} = 9\,030 \text{ авт.} + 14\,428 \text{ авт.} = 23\,728 \text{ авт.}$$

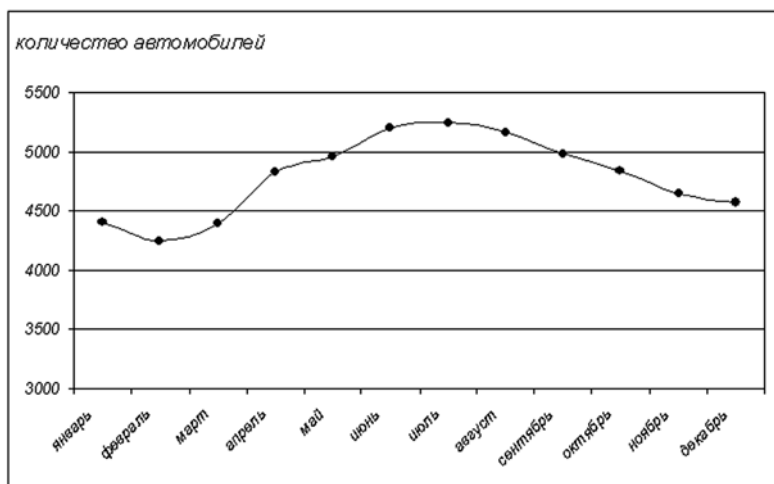
Таким образом, мы получили общее количество ТС, припаркованных вне мест постоянного хранения, которое составило 23 728 авт., или 7,8% зарегистрированных в городе автомобилей. В течение дня на улично-дорожную сеть выезжают не менее одного раза около 55 тыс. транспортных средств (18% парка зарегистрированных транспортных средств).

### **Анализ сезонной динамики изменения параметров движения в выбранных сечениях УДС**

Сезон года косвенно влияет практически на все показатели, определяющие в той или иной степени параметры загрузки улично-дорожной сети, а значит, на эффективность функционирования транспортной системы:

- скоростной режим движения автомобилей в транспортном потоке;
- тепловой режим работы автомобильных двигателей;
- загрузку транспортных средств;
- структуру транспортного потока;
- интенсивность транспортного потока.

Зависимости сезонной динамики интенсивности транспортного потока были получены на основе статистических данных аппаратно-



**Рис. 2.45.** Сезонные колебания среднесуточной интенсивности транспортных потоков на въездах в Пермь, по данным АПК «Сова-2»

программных комплексов «Сова-2», установленных на трех стационарных постах ГИБДД на въездах из Перми (рис. 2.45). По графику видно, что суточная интенсивность транспортных потоков начиная с сентября падает и в период с ноября по декабрь стабилизируется, а с марта опять наблюдается ее рост.

### **Программа мониторинга состояния и условий движения на улично-дорожной сети городов**

Экономический смысл мероприятий по мониторингу состояния и условий движения на улично-дорожной сети городов предполагает использование его результатов в максимально широкой сфере применения. В связи с этим целями создания системы мониторинга транспортных потоков, кроме получения исходных данных для моделирования и прогнозирования развития ситуации с состоянием и условиями функционирования транспортной системы во времени, будут:

- разработка и внедрение макроскопических методов организации дорожного движения (организация грузового движения, одностороннего движения, зональные методы организации движения, информационное обеспечение участников движения и др.);
- разработка и уточнение поэтапных планов реконструкции и строительства новых элементов улично-дорожной сети;
- разработка и внедрение управленческих решений в сфере дорожного движения (регламентация объемов ввода объектов нового строительства, совершенствование структуры размещения мест притяжения грузовых и пассажирских перевозок, введение ограничений

на транзитный транспорт, совершенствование парковочной политики, оценка потребности в автостоянках и др.);

- получение достоверных данных для прогнозирования дорожно-транспортной ситуации в городе;

- создание *системы моделирования* условий движения на улично-дорожной сети города.

Реализация указанных целей возможна с помощью системы, позволяющей предусмотреть:

- осуществление сбора показателей для трех основных элементов магистральной сети города: узлы, перегоны, магистрали в целом;

- систематизацию сбора данных по параметрам транспортных потоков с проведением натурных обследований с использованием счетчиков, применением детекторов транспорта, аэрофотосъемки, передвижной дорожной лаборатории и отчетно-статистических данных;

- перечень показателей в составе мониторинга в количестве 10 наименований;

- определение основных поставщиков и потребителей информации;

- установление для каждой организации – поставщика информации перечня показателей, единиц измерения и периодичности их представления;

- включение в мониторинг группы специальных показателей, отражающих влияние основных параметров транспортных потоков на различные сферы жизни города.

Все работы по сбору информации о параметрах ТП необходимо проводить регулярно с учетом динамически меняющейся ситуации на УДС города. Рекомендуемая периодичность проведения работ по мониторингу транспортных потоков на примере города Перми, способ получения данных и список поставщиков информации по каждому показателю представлены в табл. 2.20. Для каждого показателя разработана структура базы данных хранения информации и способы ее отображения на электронном плане города средствами ГИС и программного модуля «Транспортные потоки».

Дальнейшие расчеты недостающих параметров ТП и актуализация информации основаны на замерах интенсивности и других характеристик движения автотранспорта по некоторым перекресткам города. Затем строятся интерполяционные полиномы для определения всех характеристик движения по нескольким замерам на всех остальных перекрестках по часам суток, дням недели и сезонам года.

Такой подход позволяет создать компактную базу по хранению основных параметров транспортных потоков и с минимальными затратами производить ее актуализацию на любой расчетный период.

Таблица 2.20

**Периодичность проведения работ по мониторингу транспортных потоков,  
способ получения данных и список поставщиков информации**

Показатель	Единица измерения	Метод сбора информации	Место сбора информации	Периодичность	Поставщик информации
Интенсивность движения (суточные колебания)	авт./мин	Натурные обследования с использованием счетчиков	280 узловых точек УДС города	1 раз в 5 лет	Определяется на конкурсе
Интенсивность движения (недельные колебания)	авт./мин	Натурные обследования с использованием счетчиков	6 узловых точек УДС города	1 раз в год	
Интенсивность движения (сезонные колебания)	авт./мин	Натурные обследования с использованием счетчиков	6 узловых точек УДС города	Ежегодно	
Суточная интенсивность структурированного транспортного потока (легк., груз., автоб.)	авт./мин	Натурные обследования с использованием счетчиков	280 узловых точек УДС города	1 раз в 5 лет	
Суточная интенсивность движения общественного транспорта	ед./мин	Отчетно-статистические данные	Маршруты движения	Ежегодно	Департамент дорог и транспорта
Схема организации движения в узле (разрешенные направления движения)	—	Натурные обследования с использованием счетчиков и отчетно-статистические данные	Узлы и перекрестки на УДС города	Ежегодно	Дирекции дорожного движения

Продолжение табл. 2.20

Показатель	Единица измерения	Метод сбора информации	Место сбора информации	Периодичность	Поставщик информации
Схема организации движения на перегоне (одностороннее движение, ограничение скоростного режима, стоянки и т.п.)	—	Отчетно-статистические данные	На перегонах	Ежегодно	Дирекции дорожного движения
Схема расстановки светофоров в узле тип светофора	—	Отчетно-статистические данные	Узлы и регулируемые перекрестки на УДС города		
Циклы и фазы светофорного регулирования	с	Отчетно-статистические данные	Узлы и регулируемые перекрестки на УДС города		
Средняя скорость транспортного потока (суточные колебания)	км/ч	Аэрофото-съемка, передвижные лаборатории	На перегонах	1 раз в год	Определяется на конкурсе
Средняя суммарная задержка транспорта	с	Передвижные лаборатории			
Количество транспортных средств припаркованных вне мест постоянного хранения в течение дня	ед.	Натурные обследования с использованием счетчиков, аэрофотосъемка, космические снимки	УДС города	Ежегодно	

Показатель	Единица измерения	Метод сбора информации	Место сбора информации	Периодичность	Поставщик информации
Количество транспортных средств одновременно передвигающихся по магистралям города	ед.	Аэрофото-съемка	УДС города	Ежегодно	Определяется на конкурсе
Опрос водителей транспортных средств	чел.	Натурные обследования с использованием счетчиков, СМИ		1 раз в 5 лет	

### Выводы

В общем случае исследования транспортных систем городов необходимо оценить потенциал городской территории с точки зрения генерации транспортного спроса и потенциальных возможностей территории удовлетворить его. Способы и методики такой оценки предлагается назвать *транспортным анализом территории*. На этом этапе никак не оценивается, даже с качественных позиций, имеющееся на исследуемой территории транспортное предложение (УДС города, инфраструктура, подвижной состав), а также качество транспортного планирования и организации движения. Значимой на этом этапе исследования является оценка территориального баланса использования территории, характера поведенческой активности жителей и результатов функционирования транспортной системы посредством мониторинга условий передвижения.

Пространственный анализ различной территориально распределенной информации о городской структуре уже позволяет сделать первые выводы о потенциальных проблемах действующей транспортной системы. Это касается исследования объектов городской структуры, формирующих транспортный спрос.

Предложенные в ходе анализа универсальные подходы к оценке характера распределения элементов городской структуры, влияющих на

транспортный спрос, позволяют в будущем расчетным образом формировать требуемые для создания прогнозных транспортных моделей массивы информации, касающиеся распределения транспортной подвижности населения по территории.

Наряду с закономерностями пространственного распределения объектов генерации транспортного движения существенно значимы и параметры транспортной подвижности населения, которые предложено формализовать по аналогии с городами развитых стран, прошедших уровень взрывной автомобилизации значительно раньше крупных городов России.

Кроме анализа и последующего построения характеристик транспортного спроса, для создания качественных инструментов выработки управленческих решений по формированию эффективной, безопасной и устойчивой транспортной системы крупного города необходимо создание системы мониторинга состояния и условий движения на улично-дорожной сети городов. Предложенная система мониторинга охватывает всю специфику функционирования транспортной системы города, и в дальнейшем результаты мониторинга могут быть использованы на многих стадиях построения математических моделей транспортного спроса, транспортного предложения, их верификации и калибровки. От качества проводимого мониторинга по оценке состояния и условий движения на улично-дорожной сети напрямую зависят как адекватность создаваемых моделей, так и результаты моделирования, прогнозирования и оптимизации исследуемых процессов.



## **Глава 3**

# **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ГОРОДОВ**

### **3.1. Теоретико-прикладные основы создания прогнозных транспортных моделей городов**

Методика формирования эффективной транспортной системы крупного города представляет собой набор методов, позволяющих строить математические модели функционирования транспортной системы города и на их основе давать доказательное обоснование выбранным инструментам повышения ее эффективности.

По аналогии с целями и задачами формирования эффективной транспортной системы крупного города как отдельного проекта можно выделить также несколько научных задач, представляющих собой необходимое звено в построении общей методики.

Каждая из задач сформулирована и раскрыта в виде отдельной главы. Основные научные задачи, а также последовательность их решения в построении общей методики можно сформулировать следующим образом:

- формирование подходов к анализу функционирования городских транспортных систем;
- методы транспортного анализа городской территории. Мониторинг транспортной системы;
- построение прогнозных транспортных моделей городов;
- методы анализа эффективности функционирования городских транспортных систем;
- построение оптимальных моделей формирования эффективных транспортных систем городов, их решение и анализ.

Эти задачи отчасти основываются на уже известных научных подходах, которые применяются для решения локальных задач в области транспортного планирования, организации движения и в целом развития транспортных систем городов, причем каждая из них представлена с позиции ее научного вклада в общую задачу формирования эффективной транспортной системы крупного города.

В настоящей главе особое внимание уделяется последовательному разбору создания и принципам функционирования прогнозных транспортных моделей на отдельных шагах и стадиях. В дальнейшем рассмотренная технология построения четырехшаговых прогнозных транспортных моделей будет использована в отдельных своих частях как самостоятельная основа постановки ограничений и целевой функции при создании математической модели оптимальной задачи построения эффективной транспортной системы крупного города.

В этом плане рассмотренная в настоящей главе прогнозная транспортная модель служит лишь инструментом, без которого невозможно создание математической модели оптимальной задачи. Все этапы создания и последующие шаги по верификации и оценке качества функционирования транспортной модели будут рассмотрены на примере города Перми, транспортная модель которого была создана автором в 2008 г. Накопленный за это время опыт разработки модели и последующей ее актуализации и калибровки позволил сформировать стройную и последовательную стратегию создания подобных моделей, которая является самостоятельной научной ценностью.

Задача прогноза загрузки транспортной сети обычно состоит в расчете усредненных характеристик движения, таких как объемы межрайонных передвижений, интенсивность потока, распределение автомобилей и пассажиров по путям движения и др. Имитационное моделирование ставит своей целью воспроизведение всех деталей движения, включая развитие процесса во времени. При этом усредненные параметры транспортных потоков и их распределение по различным путям движения считаются известными и служат исходными данными для этих моделей. Таким образом, прогноз интенсивности и имитационное моделирование являются дополняющими друг друга направлениями.

Имитационные модели позволяют оценить скорости движения, задержки на перекрестках, длины и динамику образования очередей, или заторов, и другие характеристики движения. Применять такие модели целесообразно при разработке проектов организации дорожного движения, оптимизации светофорных циклов регулирования и т.п.

Решая задачу совершенствования организации дорожного движения в отдельном элементе улично-дорожной сети города, нельзя ориентироваться только на существующие в нем объемы движения. Изменение в транспортном предложении неминуемо повлечет за собой

изменение спроса на этот участок сети других участников дорожного движения. Для решения задачи организации дорожного движения на отдельном элементе или узле может быть использована имитационная модель. Одновременно улучшение условий проезда по данному участку может привести к тому, что большее количество водителей будет выбирать маршруты проезда с использованием этой улицы, что, в свою очередь, приведет к ослаблению нагрузки на другие участки сети и к дальнейшему перераспределению потоков.

Таким образом, возникает задача получения нового прогноза распределения транспортных потоков по городу, которое установится после проведения данного мероприятия. Эта задача будет решена при помощи уже прогнозных моделей. Новое распределение транспортного движения по сети и изменившиеся нагрузки и объемы движения на этом конкретном участке опять потребуют корректировок организации дорожного движения, настройки работы светофорных объектов, и такая последовательность операций может повторяться бесконечно.

Прогнозные и имитационные модели в своих алгоритмах уже учитывают основные определяющие предпочтения всех участников дорожного движения при выборе маршрутов по сети. Существует, однако, большое количество моделей, предназначенных для оптимизации функционирования транспортных сетей (оптимизационные модели). Точнее, они призваны решать локальные прикладные задачи, связанные с перевозочным процессом отдельных субъектов – пользователей автомобильных дорог (участников дорожного движения): оптимизировать маршруты пассажирских и грузовых перевозок, расписание движения транспорта, создавать оптимальную конфигурацию маршрутной сети и др.

Группы моделей подчиненно связаны друг с другом. Прогнозы интенсивности движения транспорта служат исходными данными для последующей имитации этого движения во времени. Имитация порождает видимую потребность в оптимизации того или иного транспортного процесса. Такая связь моделей различных групп и назначений позволяет говорить о некоторой модельной основе, так или иначе необходимой при создании каждой из них и объединенной одним термином – «транспортная модель города».

### **3.1.1. Мировой опыт создания прогнозных моделей. Современные инструменты моделирования**

Сложившийся подход к решению задач транспортного планирования и организации дорожного движения обычно находится в плоскости создания программ мониторинга состояния и условий движения на улично-дорожной сети городов. В дальнейшем на основе данных мониторинга строятся статистические модели, описывающие измене-

ние состояния транспортной системы во времени и ее влияние на состояние жизни в городах.

На основе этих моделей делаются попытки прогнозировать поведение транспортной системы во времени, но огромное число факторов, кроме основных – интенсивности и скорости транспортных потоков, делают эту задачу почти невыполнимой.

Для построения некоей стационарной усредненной модели поведения и функционирования УДС города требуются значительные по времени наблюдения за состоянием движения, после чего можно описать это поведение математически и постараться учесть максимальное количество факторов, влияющих на него. Но жизнеспособность таких моделей ничтожна: с таким трудом построенная модель работы городской транспортной системы полностью разрушается при сколь угодно малом изменении транспортного предложения (например, при организации движения или строительстве новых элементов сети).

Движение транспортных потоков, описываемое рядом сравнительно легко получаемых параметров этого движения, само по себе не несет практически никакой информации для целей последующего моделирования этих процессов. Возникает вопрос о целях моделирования, ибо значимость модели можно оценить только ее прикладным характером. Построив модели поведения производных величин, мы не получим инструмента для реализации управленческих решений по воздействию на систему в целом, не зная причин и внутренних законов ее функционирования.

Главная задача всех математических моделей – заглянуть в будущее, в то время, когда моделируемого объекта еще нет, либо создать условия, в которых этот объект еще не был.

Среди всего разнообразия математических моделей, применяемых для анализа транспортных систем городов и регионов, можно выделить три основные группы [41]: прогнозные, имитационные и оптимизационные модели.

Каждой группе моделей соответствует определенный круг задач. В нашем случае это будут задачи:

- транспортного планирования;
- организации дорожного движения;
- оптимизации перевозочного процесса.

Моделирование дает возможность наглядно изобразить комплексные процессы деятельности транспорта, прогнозировать перераспределения транспортных потоков в результате таких внешних воздействий на участки УДС, как:

- строительство новых участков сети;
- реконструкция (расширение) участков сети;
- закрытие отдельных участков сети;
- изменения условий движения в сети.

Основываясь на результатах наблюдений за действующей УДС, можно выявить только несбалансированность сети и устранить ее, уделяя при этом внимание не узким (проблемным) местам, а исключительно поиску резервов и разработке мероприятий по их задействованию, которые чаще всего решаются средствами организации дорожного движения.

Отсюда следует вывод: слабое место на УДС – это тот ее участок, где есть резервы в использовании пропускной способности. Следовательно, риски в дорожном планировании (проектировании и строительстве) в первую очередь связаны с недополученной транспортной работой при реализации дорожного проекта. И эта ошибка в принятии решений почти всегда остается неустранимой, в отличие от проектов, в результате реализации которых может быть проделана большая транспортная работа даже при значительных транспортных издержках.

Прогнозные модели предназначены для моделирования объемов транспортной работы в сетях при известном размещении потокообразующих объектов города. С их помощью можно прогнозировать последствия изменений в транспортной сети города. Модели этого типа применяют для поддержки решений в области транспортного планирования города, анализа последствий тех или иных мер по организации движения, выбора альтернативных проектов развития транспортной сети и др.

Транспортные модели, основанные на принципах компьютерного моделирования распределения транспортных потоков, впервые созданы в 1960 г. в Великобритании. Они востребованы и в российских городах. В настоящее время в России сформировалось более 10 коллективов, которые с успехом используют отечественные и зарубежные пакеты прикладных программ для решения статических и динамических задач транспортного планирования и организации дорожного движения в городах. Большинство исследователей решают частные, локальные задачи на отдельных участках УДС, и лишь немногие задумываются об оценке эффективности транспортной системы в целом, влияющей на качество жизни, с учетом эволюции транспортной системы. Такие исследования очень важны не столько для решения текущих проблем, например транспортных заторов, сколько для выработки научно обоснованной стратегии развития транспортных систем городов на перспективу с учетом изменения транспортной мотивации людей под влиянием различных факторов, прежде всего связанных с изменением их потребностей.

Современные транспортные модели и сейчас используют основные определяющие соотношения поведения людей в процессе удовлетворения их транспортных потребностей, выведенные во второй половине XX в. Однако бурное развитие вычислительных мощностей современных компьютеров позволило за последние 20 лет в десятки раз уско-

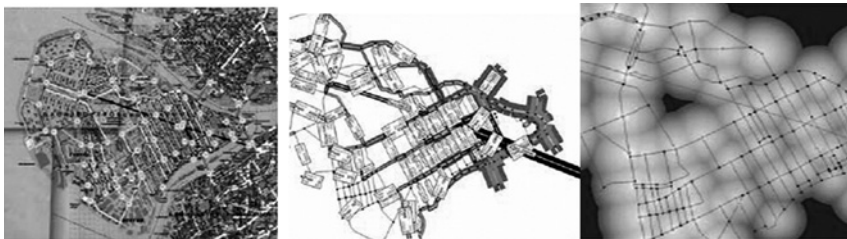
речь основные вычислительные процедуры, существенно уточнить и детализировать модели транспортных сетей городов, учесть в расчетах гораздо большее количество различных факторов, определяющих поведение современных участников дорожного движения.

К настоящему времени созданы транспортные модели всех крупных городов мира. В США есть модели всех городов с населением более 1 млн жителей. В Германии и Нидерландах транспортные модели имеет каждый город с населением более 100 тыс. человек. С помощью коммерческих программных комплексов построены транспортные модели в таких городах, как Нью-Йорк, Лос-Анджелес, Лондон, Париж, Милан и другие, а также модель транспортной сети почти всей Европы от границ СНГ до Атлантического океана (рис. 3.1).



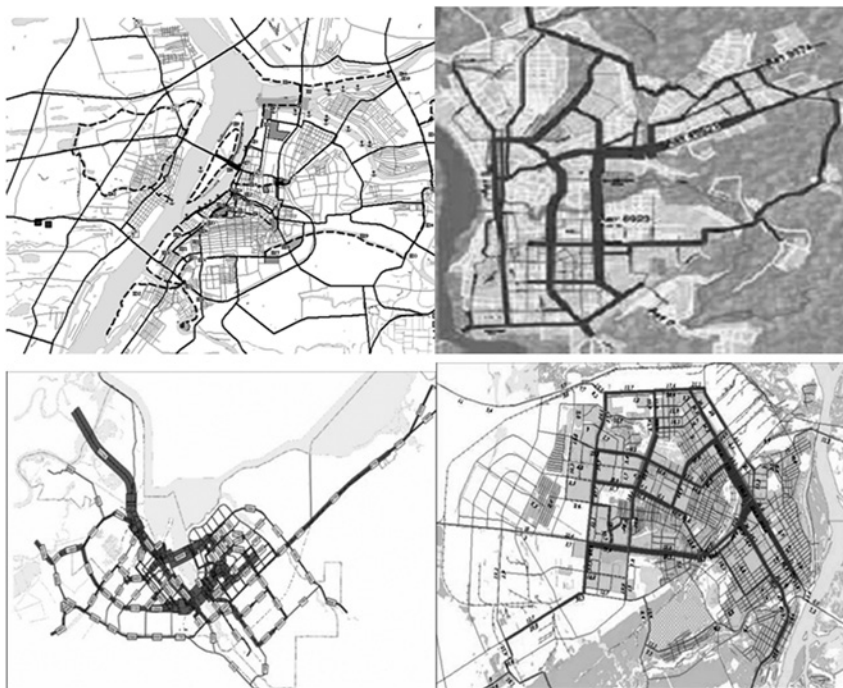
**Рис. 3.1.** Фрагменты транспортных моделей Европы, городов Лос-Анджелес (США) и Карлсруэ (Германия)

За два последних года сразу несколько российских городов закончили создание своих транспортных моделей и успешно их эксплуатируют (рис. 3.2 и 3.3).



**Рис. 3.2.** Транспортная модель Васильевского острова в Санкт-Петербурге

Найденные еще в прошлом веке закономерности перераспределения транспортных потоков по улично-дорожной сети городов в наши дни достаточно подробно алгоритмизированы, запрограммированы и превращены в коммерческие программные продукты, которые, как и транспортные модели, можно разделить по назначению и типу решаемых задач на несколько классов. Однако производители программных продуктов в области транспортного моделирования и прогнозирова-



**Рис. 3.3.** Транспортные модели российских городов: Томска, Астрахани, Барнаула, Волгодонска

ния в условиях жесткой конкуренции на рынках программного обеспечения стремятся унифицировать свои продукты, создавая целые программные комплексы, охватывающие решение задач различного назначения и использующие транспортные модели разных классов.

Чаще в единые программные комплексы объединяются инструменты, реализующие задачи и работающие с моделями первого и второго класса, то есть в области транспортного планирования и организации дорожного движения. Для простоты восприятия назначения отдельных модулей программных комплексов производители используют классификацию, определяющую степень детализации модели и геометрические размеры моделируемых систем. Различают программные продукты макро- и микроуровня моделирования.

В мире только формируется рынок программных продуктов в области транспортного планирования (макромоделирования) и организации движения (микромоделирования). Одной из первых и наиболее известной в прошлом программ, реализующих четырехшаговую процедуру прогнозирования загрузки транспортных сетей, была программа ЕММЕ/2 (Equilibre Multimodal, Multimodal Equilibrium, или Мультимодальное Равновесие).

Впервые транспортные модели в ЕММЕ/2 созданы в Канаде и Финляндии. ЕММЕ/2 была разработана как интерактивно-графическая гибкая среда моделирования для городского и регионального транспортного планирования.

Успешным результатом построения мультимодальной транспортной модели для большого города стала модель, построенная для Монреаля (Канада). Собственно, программный комплекс ЕММЕ/2 и был разработан именно для этого города.

Не так давно на российском рынке почти одновременно появились две системы моделирования движения: *Vissim+Visum (PTV Vision)* и *Aimsun NG (TSS)*. По своим возможностям и области решаемых задач они практически идентичны и объединяют в себе полный пакет программного обеспечения для планирования, анализа и организации транспортного движения.

Наиболее широко в России представлены программные продукты компании PTV AG – *PTV vision® VISUM* и *PTV vision® VISSIM*. Они представляют собой единый комплекс, реализующий задачи макро- и микромоделирования транспортных систем.

Например, *PTV Vision® VISUM* объединяет в себе полный пакет программного обеспечения для планирования, анализа и организации транспортного движения, позволяет отображать все виды индивидуального и общественного транспорта в единой модели. Область применения *PTV Vision®* обширна: от подготовки проектов организации и анализа схем движения на перекрестках и развязках до исследований комплексных транспортных систем городов и регионов, включая создание перспективных интегрированных транспортных концепций для индивидуального и общественного транспорта. Одновременно с этим *PTV Vision®* решает задачи оперативного и стратегического транспортного планирования.

Благодаря многообразию функций *PTV Vision®* круг его пользователей очень широк и разнообразен. К нему относятся проектировщики, чиновники транспортных министерств и ведомств, инженерные компании, транспортные управления, управления железных дорог и многие другие. Уже сегодня специалисты более чем 70 стран мира применяют *PTV Vision®*, а это свыше 1100 различных организаций по всему миру. Пакет программ *PTV Vision* привлекают для решения проблем моделирования транспортных систем такие города России, как Санкт-Петербург (ЗАО «Петербургский НИПИГрад», комитет по транспорту), Томск (Томский государственный архитектурно-строительный университет), Иркутск (Иркутский государственный технический университет).

В модуле *VISUM PTV Vision®* реализован первый уровень моделирования – макромоделирование, в котором объектом моделирования служит транспортный поток. Основными пользователями данного мо-



дуля *VISUM PTV Vision*® являются городские и федеральные департаменты и комитеты по транспорту, транспортные компании-перевозчики, транспортные компании, предоставляющие услуги общественного транспорта, компании, специализирующиеся на транспортном консультировании, а также вузы.

Область применения *PTV Vision*® *VISUM*: разработка комплексных транспортных схем городов и регионов; планирование городского строительства; составление схем перевозок, в том числе мультимодальных; планирование и контроль деятельности транспортных предприятий, объединений и исполнителей заказов; прогнозирование рентабельности общественных пассажироперевозок с учетом интересов пассажиров.

Кроме того, в мире существует множество специальных систем для микромоделирования транспортных потоков, например VISSIM, TRANSIMS, PARAMICS, EMME/2, SATURN.

### 3.1.2. Структурная схема прогнозной транспортной модели

Из всего разнообразия типов транспортных моделей, обзор которых изложен в специальной литературе [97, 128], подробнее остановимся на моделях, используемых в транспортном планировании городов. В отличие от задач организации дорожного движения, где находят широкое применение имитационные модели движения транспорта, в транспортном планировании используют прогнозные модели, которые оперируют следующими макроскопическими параметрами: скоростью и интенсивность транспортного потока, интенсивность пассажиропотоков.

Основой моделирования городских транспортных систем обычно является решение задачи реализации пассажирских транспортных корреспонденций, доля которых в общем объеме транспортного движения крупного города составляет 85–95%.

Транспортная модель в целом представляет собой программный комплекс, включающий в себя информационные и расчетные блоки. Информационные блоки составляют единую базу данных, предназначенную для хранения и обработки информации, необходимой для прогноза транспортных потоков. Расчетные блоки реализуют алгоритмы решения задач математического программирования, ориентированные на прогноз потребности в передвижениях и расчет реализующих ее транспортных потоков.

Любая математическая модель функционирования транспортной сети основывается на большом объеме исходных данных, получение которых вызывает серьезные затруднения. И это, в первую очередь, является основной трудностью на пути создания транспортных моделей крупных городов. Очевидно, что сбор исходных данных представ-

ляет собой наиболее трудоемкий и продолжительный по времени этап при построении транспортных моделей [8].

Алгоритм каждой из известных групп транспортных моделей в конечном итоге решает задачу о степени соответствия существующего транспортного спроса имеющемуся транспортному предложению. В связи с этим и создание основы модели, и наполнение ее исходными данными можно разделить на два независимых друг от друга этапа: создание транспортного предложения и создание (расчет) транспортного спроса.

На заключительном этапе, имея сформированные и формализованные параметры транспортного спроса и предложения, можно свести задачу к совершенствованию алгоритмов распределения транспортного спроса по существующему транспортному предложению и калибровке модели по собранным натурным данным, характеризующим основные параметры транспортного движения на действующей в настоящее время сети. При этом формализация параметров, характеризующих существующее состояние дорожно-транспортного комплекса, будет первым этапом в создании транспортной модели города (создание транспортного предложения).

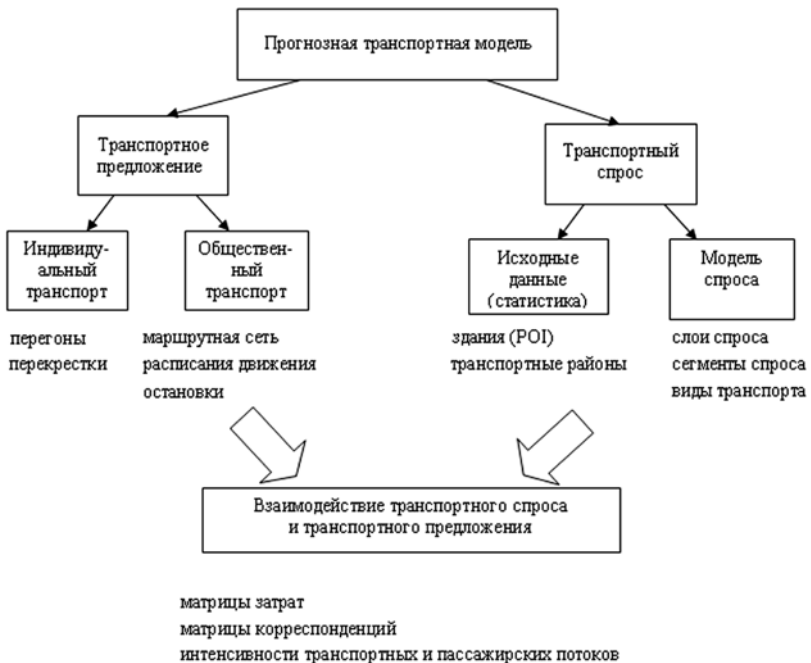


Рис. 3.4. Структура основных составляющих прогнозной транспортной модели

Второй этап в построении модели – создание или расчет транспортного спроса представляет собой куда более сложную и трудоемкую задачу. Схематично структура основных составляющих прогнозной транспортной модели представлена на рис. 3.4.

*Транспортное предложение* состоит из элементов, с помощью которых транспортная система (города либо региона) удовлетворяет существующий транспортный спрос и в итоге определяет, какой объем спроса и насколько качественно может удовлетворить транспортная система.

*Транспортный спрос* количественно и качественно обусловлен потребностью жителей города в перемещении.

Весь объем необходимых для формализации исходных данных в целях создания прогнозной транспортной модели состоит из большого числа составляющих.

Транспортное предложение:

- картографическая информация (цифровой план города);
- сеть путей движения для различных видов транспорта, ее свойства и условия движения, включая технические средства организации дорожного движения;
- типы улиц и дорог, среднегодовая суточная интенсивность, пропускная способность перегонов и перекрестков и т. д.

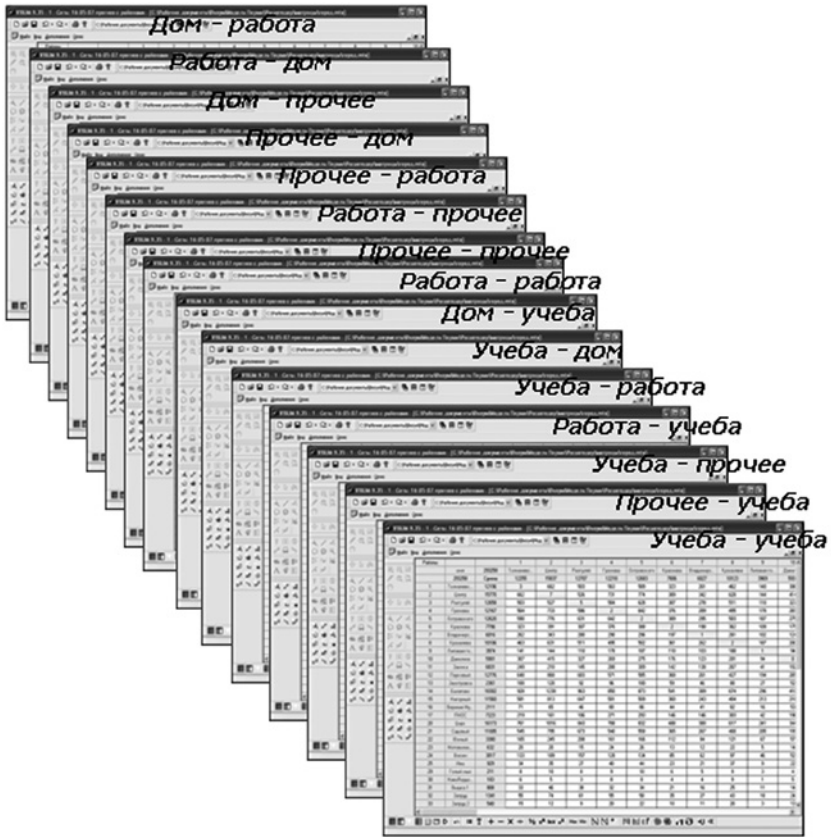
Транспортный спрос:

- данные статистики: сведения о населении, в том числе трудоспособном, о рабочих местах, включая сферу услуг, о количестве студентов и учебных местах;
- данные статистики о распределении корреспонденций по целям поездок;
- модель Split: общее разделение транспортных потоков по видам транспорта на исследуемой территории.

Расчет прогноза в такой транспортной модели осуществляется по четырехшаговому алгоритму, вследствие чего эти прогнозные транспортные модели называют «четырёхшаговыми». В создании и последующей работе такой модели можно выделить четыре этапа (шага):

1. *Генерация спроса (Trip Generation)*. Во время выполнения процедуры генерации транспортного спроса определяется объем движения источника и цели для каждого района по слоям спроса. Понятие слоя спроса тождественно понятию цели поездки (на учебу, домой, поездки по работе и т.д.). Расчет объемов производят на основе данных статистики.

2. *Распределение спроса (Trip Distribution)*. Во время выполнения процедуры распределения транспортного спроса производится расчет матриц корреспонденций для слоев спроса без учета способа их реализации (видов транспорта) на основе матриц затрат (или линейной комбинации матриц затрат для разных видов транспорта) и функций



**Рис. 3.5.** Матрицы корреспонденций в транспортной модели Перми

предпочтения. Функция предпочтения определяет вероятность совершения корреспонденции в зависимости от затрат, при этом каждому слою спроса может соответствовать своя функция предпочтения.

В настоящее время в транспортных моделях крупных городов используются 15 слоев спроса и соответственно 15 матриц корреспонденций (рис. 3.5).

*3. Выбор режима (Mode Choice).* Во время выполнения процедуры выбора режима определяют способ реализации корреспонденции – на ИТ или на ОТ. Выбор происходит путем расщепления матрицы корреспонденций на две. Расщепление матриц корреспонденций также происходит на основе матриц затрат (или линейной комбинации матриц затрат для разных видов транспорта) и функций предпочтения. При этом функции предпочтения для выбора режима могут отличаться от функций предпочтения для распределения спроса.

4. *Перераспределение (Assignment)*. Во время выполнения процедуры полученные матрицы корреспонденций по видам транспорта распределяют по транспортному предложению для выбора того или иного пути их реализации. Процедура перераспределения основывается на поиске алгоритмов, которые определяют маршруты или соединения между источником и целью. Поиск процедуры следует за ее выбором, который распределяет спрос отношений источник-цель на маршруты/соединения.

Процедуру перераспределения выполняют отдельно для индивидуального и общественного транспорта. Для индивидуального транспорта учитывают такие факторы, как ширина проезжей части, наличие светофорного регулирования и его режимы, наличие одностороннего движения, запретов на проезд грузового транспорта по участкам УДС, запретов маневров на перекрестках, а также парковок, оказывающих влияние на условия движения транспорта.

При перераспределении общественного транспорта принимают во внимание все отдельные маршруты и расписание движения по ним. При этом учитывают время в пути для каждого варианта маршрута, пересадок, а также время в пути пешком от центра тяжести района-источника до остановки и от остановки до центра тяжести района-цели.

Схема четырехшаговой модели представлена на рис. 3.6.

*Транспортное предложение* задается в виде узлов, отрезков (перегонов), примыканий (точек доступа в системы), а для каждого из элементов – свои характеристики. Транспортное предложение для системы городского пассажирского транспорта общего пользования, кроме перечисленных элементов, включает маршруты прохождения ОТ, остановки и расписания. В транспортных моделях этот вид транспорта представляет собой единую систему, формально не разделяемую на транспортные средства и транспортную инфраструктуру.

Кроме информационной основы, модель транспортного предложения содержит некий набор определяющих соотношений, описывающих основные процессы взаимодействия транспортной инфраструктуры и транспортных средств, основу которых составляют функции сопротивления, или функции затрат.

В процедурах *распределения* и *выбора режима* транспортное предложение участвует как источник формирования матриц затрат. На основе сформированных матриц затрат определяют временные затраты на совершение корреспонденций из района в район. Впоследствии сформированные матрицы затрат ИТ и ОТ используют при выполнении процедуры выбора режима.

На этапе *перераспределения* для индивидуального транспорта учитывают детализацию транспортного предложения: конкретные характеристики и конфигурацию каждого из элементов УДС. Для каждого элемента УДС определяют значение функции сопротивления – за-

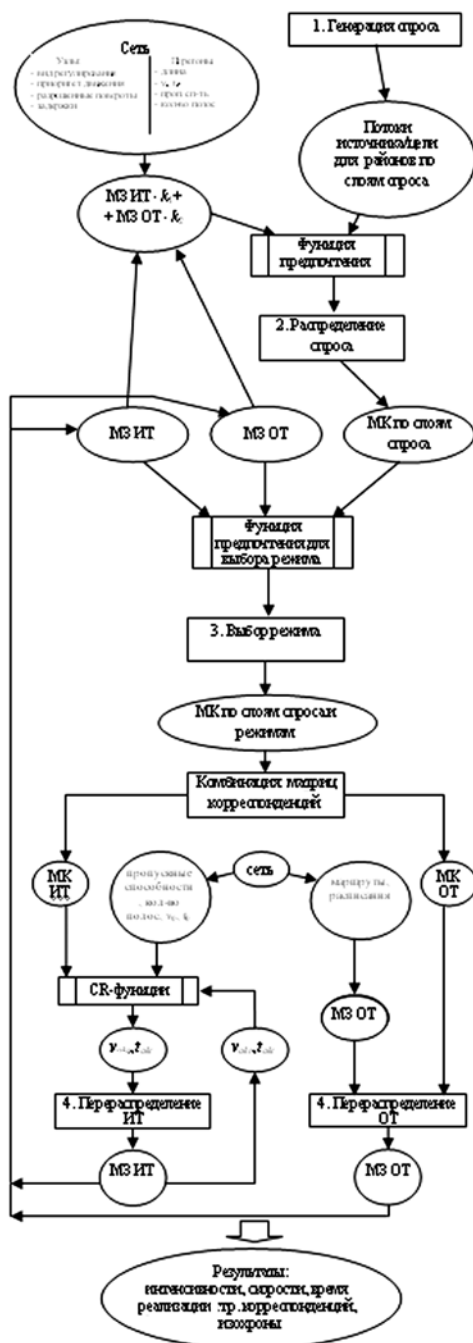


Рис. 3.6. Схема работы четырехшаговой модели расчета

держки на элементе нагруженной сети в зависимости от интенсивности транспортного потока и пропускной способности элемента.

При перераспределении общественного транспорта аналогично индивидуальному транспорту каждой корреспонденции ОТ назначается свой путь в существующей маршрутной сети. В качестве критерия для выбора пути ОТ используют инфраструктурное сопротивление, то есть воспринимаемое время в пути, включающее в себя время пешеходного подхода, поездки, ожидания и пересадок.

### 3.1.3. Основные показатели качества транспортных моделей

После создания транспортной модели часто бывает необходимо оценить ее качество, основными показателями которого являются:

1. Размер модели (статистика), а именно количество:

- узлов (дополнительно – их детализация: учет метода регулирования перекрестка, разные задержки для поворотных маневров);
- отрезков;
- примыканий;
- транспортных районов;
- пунктов остановок ОТ;
- маршрутов ОТ.

2. Детализация модели транспортного спроса:

- количество режимов (ИТ или ОТ);
- количество систем транспорта (ИТ – ЛА, ГА, ОТ – автобус, трамвай, троллейбус);
- количество слоев спроса;
- количество используемых функций предпочтения (одна для разных слоев спроса или разные).

3. Качество результатов расчета модели, его значения:

- количество мест подсчета;
- коэффициент корреляции;
- средняя относительная ошибка;
- средняя абсолютная ошибка.

Таким образом, предложенные показатели качества транспортных моделей позволяют оценить как объем и качество используемых для их создания исходных данных, так и качество функционирования модели, то есть степень ее достоверности. В табл. 3.1 приведены значения показателей качества транспортных моделей некоторых городов.

### 3.1.4. Калибровка транспортных моделей

С совершенствованием методики и технологий разработки транспортных моделей городов на первое место выходят вопросы оценки их адекватности. Процесс калибровки – один из самых важных этапов в создании транспортной модели, в ходе которого необходимо добиться

Таблица 3.1

**Значение показателей качества транспортных моделей городов Перми,  
Екатеринбурга и Самары**

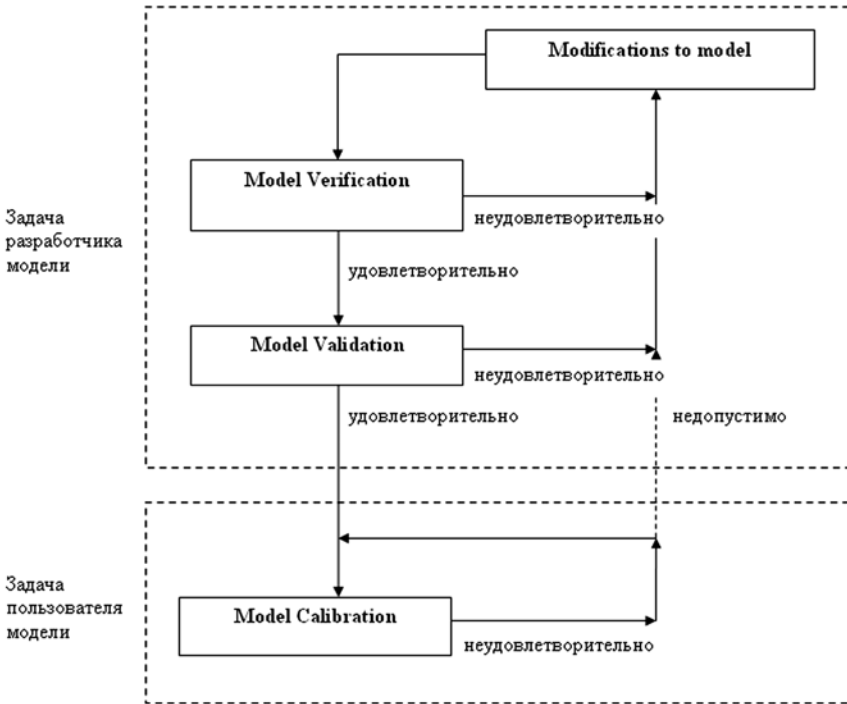
Элементы сети	Количество элементов в модели		
	Пермь	Екатеринбург	Самара
Размер модели (статистика)			
Узлы	5224	3756	14056
Отрезки	11784	8732	32260
Примыкания	4468	2252	12352
транспортные районы	387	339	294
Остановки	464	520	448
зоны остановки	907	1097	1110
пункты остановки	931	1246	1213
маршруты ОТ	109	149	175
Детализация модели транспортного спроса			
Количество режимов	2	2	2
Количество систем транспорта	7	8	7
Количество слоев спроса	15	15	17
Количество используемых функций предпочтения	15	15	15

максимальной близости результатов, полученных на основе моделирования, и данных, собранных при проведении обследований интенсивности транспортных потоков.

Термин «калибровка» заимствован из иностранного языка, как и часто употребляемые термины «верификация» и «валидация». С их помощью можно представить последовательность операций по повышению общего качества транспортных моделей. На рис. 3.7 представлен алгоритм последовательных шагов, проводимых разработчиками и пользователями транспортных моделей с целью их актуализации.

В первом приближении можно заключить, что процесс верификации относится к исходным данным, участвующим в модели, в то время как термин «валидация» – к проверке работоспособности непосредственно алгоритма расчета, то есть к качеству построенных определяющих соотношений. Заключительный этап создания транспортной





**Рис. 3.7.** Последовательность шагов повышения качества транспортных моделей

модели именуется термином «калибровка», который обозначает процесс, также затрагивающий набор определяющих соотношений транспортной модели, и представляет собой уточнение набора параметрических функций, заложенных в определяющие соотношения модели на основе собираемых натуральных данных и предварительно верифицированных входных данных модели.

Подходы к процессу повышения качества транспортных моделей можно отнести к двум составляющим: транспортному спросу и транспортному предложению. В каждой группе верифицируются и калибруются последовательно глобальные и локальные параметры, то есть характерные для всего объекта моделирования и распределенные в пространстве.

Целями мероприятий каждого этапа повышения качества транспортной модели являются:

*верификация*, цель которой заключается в проверке логики модели. На данном этапе выполняется проверка соответствия полученных результатов расчета модели набору входных параметров и определяется, насколько ожидаемы полученные результаты;

*валидация*, имеющая своей целью оценку способности модели соответствовать выбранным начальным значениям (аналитическое решение или натурные данные) для конкретной области применения;

*калибровка* с целью добиться идентичности расчетных и натуральных характеристик функционирования транспортной системы города, или процесс отбора лучшего набора параметров модели. Калибровка проводится на каждом шаге четырехшаговой транспортной модели.

### 3.1.5. Оценка качества транспортной модели

Для оценки адекватности и качества транспортных моделей используют общепринятые статистические критерии, которые позволяют быстро оценивать основные качественные параметры созданных моделей. Следует заметить, что в среде транспортных инженеров, занимающихся вопросами транспортного моделирования, сложились определенные доверительные границы, при которых на основании существующего набора статистических критериев созданная транспортная модель имеет право быть использованной в практических транспортных расчетах.

Оценку проводят по следующим параметрам:

*Средняя абсолютная ошибка:*

среднее отклонение абсолютных значений (разница между наблюдаемым и рассчитанным значением):

$$(\delta_a) = \frac{1}{N} \cdot \sum abs(Z_i - U_i), \quad (3.1)$$

где  $Z$  – наблюдаемое значение;  $U$  – значение, полученное из модели;  $N$  – количество точек наблюдения. Обозначения одинаковы для формул (3.2)–(3.6).

*Средняя относительная ошибка:*

среднее отклонение абсолютных значений, %:

$$(\delta_p) = \frac{\sum abs(Z_i - U_i)}{\sum Z_i} \cdot 100\%. \quad (3.2)$$

*Абсолютное значение RMSE (root of mean squared error):*

среднеквадратическое отклонение:

$$(\vartheta_a) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - U_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.3)$$

Относительное значение  $RMSE$  (root of mean squared error):  
относительное среднеквадратическое отклонение:

$$(\vartheta_s) = \frac{\vartheta_a}{\sum Z_i/N} = \frac{\sqrt{\sum (Z_i - U_i)^2 / (N-1)}}{\sum Z_i/N} \quad (3.4)$$

Коэффициент корреляции:

$$r = \frac{\sum (Z_i - \bar{Z}) \cdot (U_i - \bar{U})}{\sqrt{\sum (Z_i - \bar{Z})^2 \cdot \sum (U_i - \bar{U})^2}} \quad (3.5)$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \cdot \sum Z_i, \quad \bar{U} = \frac{1}{N} \cdot \sum U_i \quad (3.6)$$

Как пример приведем указанные параметры качества прогнозной транспортной модели города Перми. Калибровку и последующую оценку качества прогнозной транспортной модели проводили при следующих основных характеристиках модели и натуральных данных, используемых для калибровки. (табл. 3.2).

Таблица 3.2

**Основные характеристики транспортной модели города Перми  
и натуральных данных, используемых для калибровки**

Элементы сети	Количество элементов в модели
Количество точек натуральных обследований	400
Среднее наблюдаемое значение $\bar{Z}$	12739 (авт./сутки)
Среднее расчетное значение $\bar{U}$	11001 (авт./сутки)

В результате проведенной процедуры калибровки были получены следующие показатели качества прогнозной транспортной модели города Перми (табл. 3.3).

Достаточно большое значение среднеквадратического отклонения связано с тем, что значения параметров качества расчета транспортной модели были получены с учетом всех имеющихся натуральных данных об интенсивностях. Отбросим как явно ошибочные те натурные значения, для которых  $abs(Z_i - U_i) > 3\vartheta_a$ . В используемом наборе натуральных данных оказалось всего 15 значений, для которых выполня-

Таблица 3.3

**Значения параметров качества расчета транспортной модели Перми**

Параметр качества расчета модели	Значение параметра качества расчета
Средняя абсолютная ошибка	3489,9
Средняя относительная ошибка	27,4
Абсолютное значение RMSE	4615,2
Относительное значение RMSE	0,363
Коэффициент корреляции	0,86

Таблица 3.4

**Итоговое (скорректированное) значение параметров качества расчета транспортной модели города Перми**

Параметр качества расчета модели	Значение параметра качества расчета
Количество точек наблюдения	385
Средняя абсолютная ошибка	2 896,9
Средняя относительная ошибка	22,7 %
Абсолютное значение RMSE	3 605,6
Относительное значение RMSE	0,283
Коэффициент корреляции	0,916

лось это условие и которые были исключены из расчета параметров качества модели, то есть расчет параметров качества проводился по 385 точкам (значениям). В итоге получены следующие значения параметров качества расчета транспортной модели (табл. 3.4).

Рассмотрим подробнее полученные значения параметров качества расчета модели. Значение коэффициента корреляции 0,916 говорит о том, что натурные и расчетные интенсивности имеют довольно сильную связь друг с другом. При этом значения средней относительной ошибки и относительного RMSE достаточно велики. Это можно объяснить использованием достаточно большого набора натуральных данных

(385 точек наблюдения) и спецификой их сбора, так как их собирали не одновременно, а в разные дни недели для разных точек наблюдения.

В связи с этим используемый при калибровке набор натуральных данных имеет ряд несогласованностей, связанных с локальными условиями дорожного движения в той или иной точке наблюдения (во время их сбора на разных участках УДС происходили ДТП, ремонтные работы, были и другие факторы, влияющие на условия движения).

В результате при недостатке информации водители транспортных средств, участвующие в дорожном движении, принимают решения об изменении привычного маршрута, которые не соответствуют используемому в расчетах алгоритму перераспределения.

В итоге расчетные объемы транспортного движения в той или иной области могут не совпадать с натурными данными. Основываясь на этом практическом наблюдении, для улучшения качества натуральных данных предлагаем проводить обследования транспортных потоков в максимально сжатые по времени сроки, в том числе с использованием автоматизированных средств сбора данных (датчиков и видеорегистраторов). Представляется целесообразным применять для оценки качества транспортной модели критерий Фишера, хотя при его расчете возникает проблема, связанная со сложностью формализации числа степеней свободы.

### 3.1.6. Возможности анализа результатов моделирования

Интерес исследователя, занимающегося прогнозированием параметров функционирования транспортной системы крупного города, обычно вызывают следующие элементы системы и показатели ее работы.

*Отрезки:* нагрузка индивидуального транспорта, пассажиропоток на общественном транспорте, время движения в пустой и нагруженной сети, коэффициент загрузки.

*Маршруты ОТ:* пассажиропоток, время движения между остановками.

*Остановки:* количество входящих пассажиров, выходящих, транзитных с остановкой (без остановки) по маршрутам (системам) транспорта (всего).

*Перекрестки:* распределение движения на перекрестке по направлениям.

На рис. 3.8 приведено окно редактора параметров отрезков транспортной модели Екатеринбурга, где представлены основные параметры: длина, разрешенная скорость, количество полос, пропускная способность, натурная интенсивность индивидуального транспорта. Подобный набор атрибутивной информации содержит каждый от-

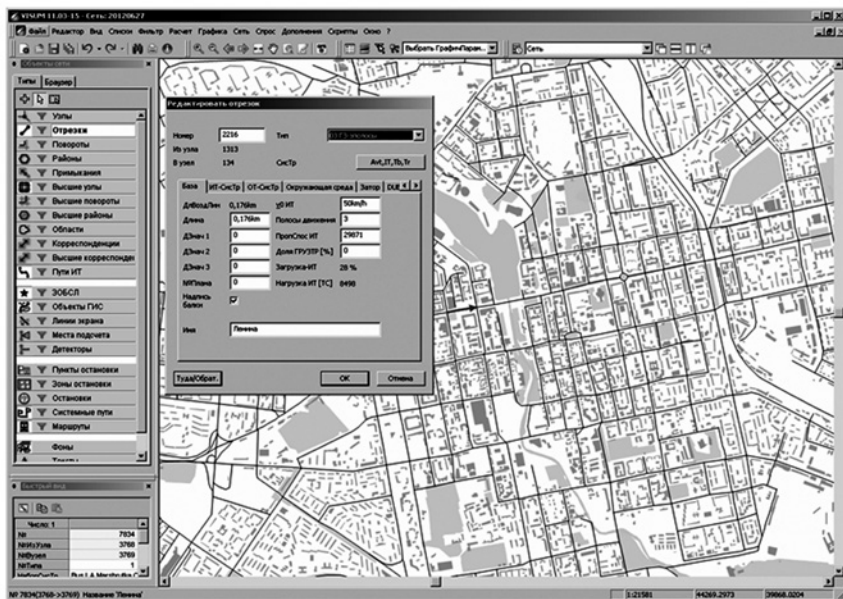


Рис. 3.8. Параметры отрезка: длина, разрешенная скорость, количество полос, пропускная способность, интенсивность ИТ.

Транспортная модель Екатеринбурга

резок улично-дорожной сети в каждом из направлений движения. Данные параметры используются в работе алгоритма транспортной модели.

На рис. 3.9 представлено распределение интенсивности транспортных потоков по направлениям на перекрестке. Каждое число соответствует интенсивности транспортных потоков на определенном маневре через перекресток, а число ниже черты – интенсивности суммарного потока на въезде на перекресток.

Подобное отображение информации расчета транспортной модели используют преимущественно для последующего расчета и назначения параметров регулирования на данном перекрестке: общего цикла светофора, плана сигналов. Обычно такие расчеты проводят с помощью имитационного моделирования на микроуровне.

На рис. 3.10 приведен так называемый паук корреспонденций для конкретного участка УДС города Перми, который выделен светло-серой балкой. В данном случае это Коммунальный мост через р. Каму. Более темные балки отображают интенсивность транспортных потоков, которые движутся через исследуемый участок (по мосту).

Интерес исследователя представляет анализ использования участка УДС с точки зрения совокупности пользователей транспортной системы.

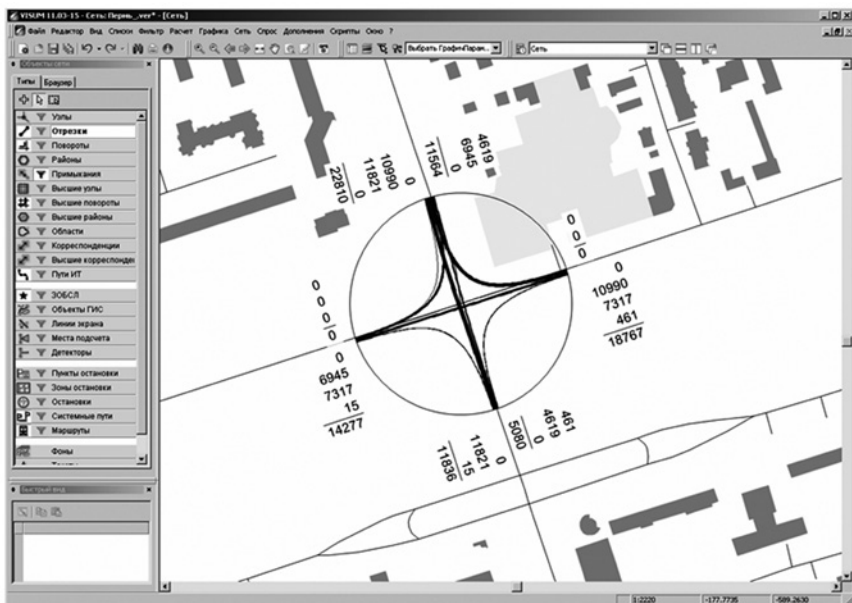


Рис. 3.9. Распределение интенсивности транспортных потоков по направлениям на перекрестке. Транспортная модель Перми

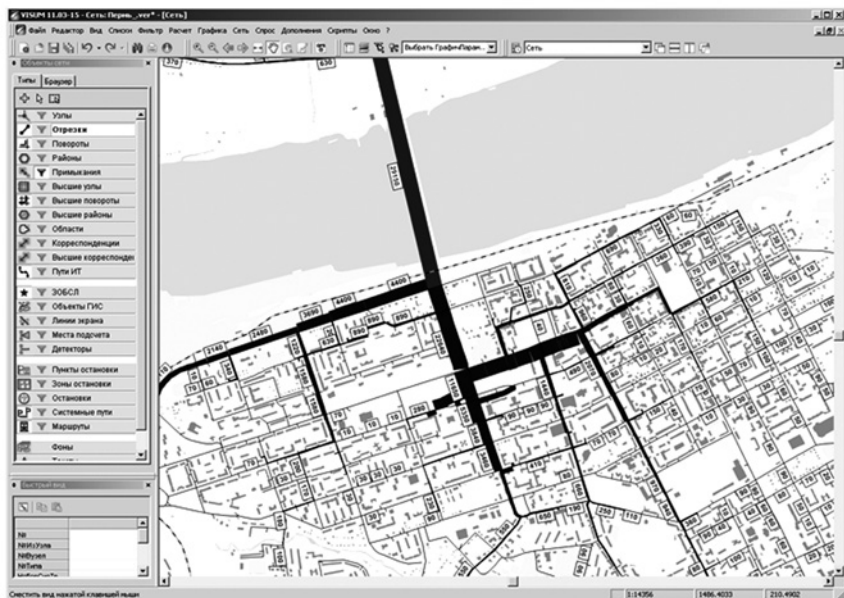


Рис. 3.10. Паук корреспонденций для участка УДС. Транспортная модель Перми

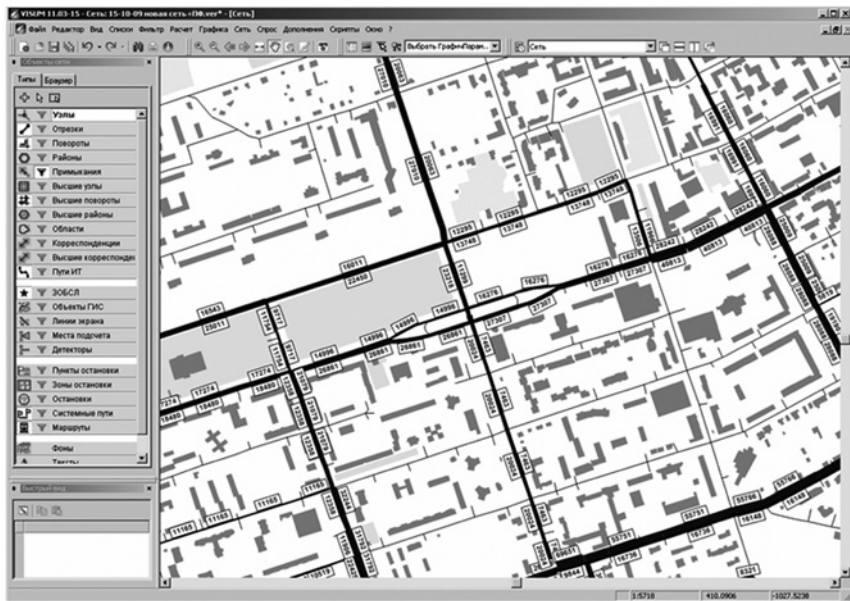


Рис. 3.11. Интенсивности пассажиропотоков. Транспортная модель Перми

По рисунку (рис. 3.10) можно проследить, какие маршруты движения преобладают на коммунальном мосту, кто и с какими целями использует данный участок инфраструктуры.

На рис. 3.11 приведены балки интенсивности пассажирских потоков для транспортной модели Перми. Данный результат расчета является основным критерием оценки качества функционирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования.

Цифры на отрезках показывают количество пассажиров, перевезенных по участку всеми видами и маршрутами транспорта, проходящими через него в течение дня. Кроме того, можно отобразить на балках пассажиропоток на отдельном маршруте или системе городского пассажирского транспорта общего пользования, а также в отдельный промежуток времени в случае, если произведен соответствующий расчет.

На рис. 3.12 приведено окно редактирования времени движения маршрута ОТ между остановочными пунктами. Данную процедуру обычно используют при анализе и прогнозировании увеличения либо уменьшения количества графиков движения на одном из маршрутов, а также при изменении скорости движения на маршруте, например после ремонта трамвайных путей. Результат расчета модели покажет, каким будет пассажиропоток после таких изменений объемов транспортной работы на маршруте.



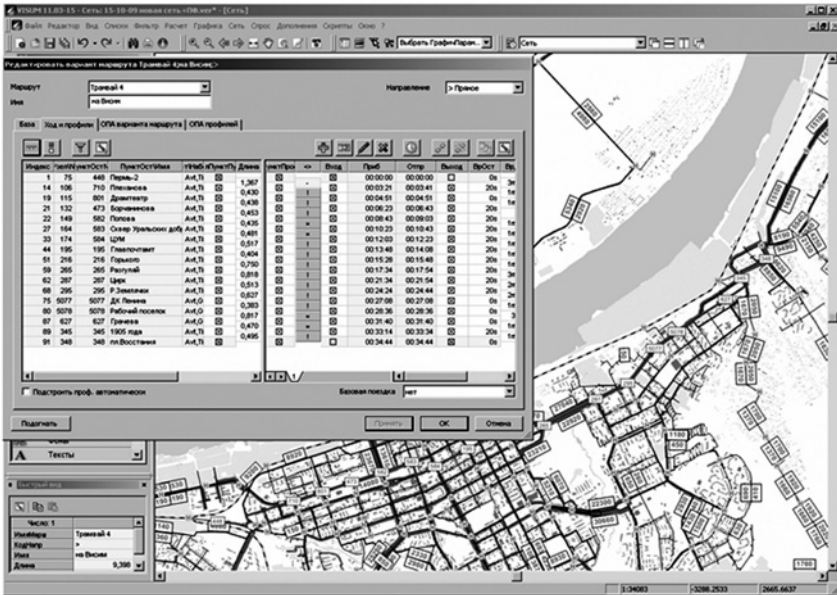


Рис. 3.12. Время движения между остановками на маршруте ОТ.  
Транспортная модель Перми

На рис. 3.13 цифрами показано общее количество входящих и выходящих пассажиров на остановочном пункте со всех единиц подвижного состава общественного транспорта, которые здесь останавливаются (городской округ (г.о.) Самара). Чаще всего данный расчетный параметр служит основой калибровки модели в части транспортного спроса на услуги городского пассажирского транспорта общего пользования.

При калибровке модели транспортного спроса этот расчетный показатель сравнивается с натурными данными, полученными при подсчете людей на остановке. Кроме информации о входящих и выходящих пассажирах, можно отображать информацию о количестве пересеживающихся и следующих транзитом пассажиров.

На рис. 3.14 приведен пример матрицы времени пешеходного перехода между зонами остановки. Формирование матрицы затрат на пересадку является основной процедурой при проектировании мультимодальных остановочных комплексов. Цифрами в таблице указано время пешего перехода от одной посадочной площадки до другой. Данное время в дальнейшем входит в матрицу затрат при реализации каждой корреспонденции, имеющей пересадку.

Транспортная модель, оперируя пространственно распределенными данными, несет в себе функции полноценной географической информационной системы (ГИС) и позволяет отображать и делать

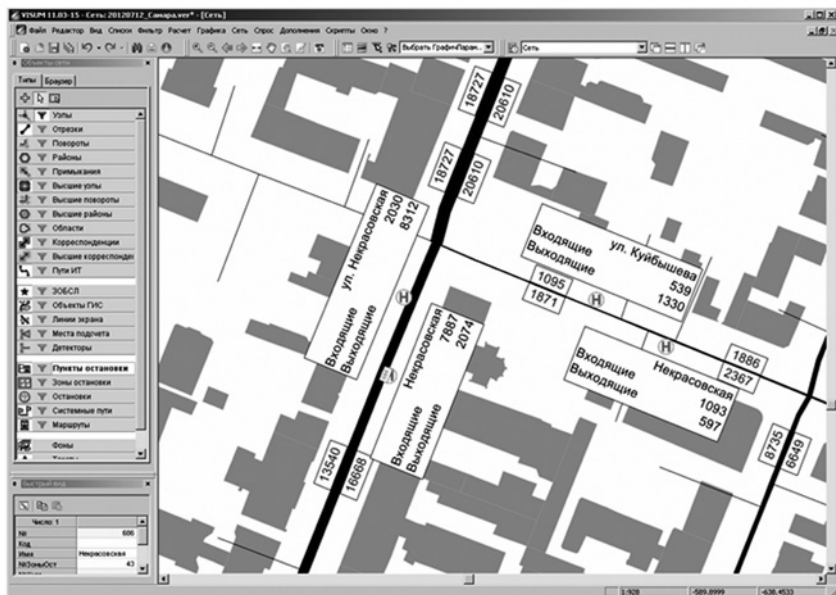


Рис. 3.13. Общее количество входящих и выходящих пассажиров на остановочных пунктах за сутки. Транспортная модель г.о. Самара

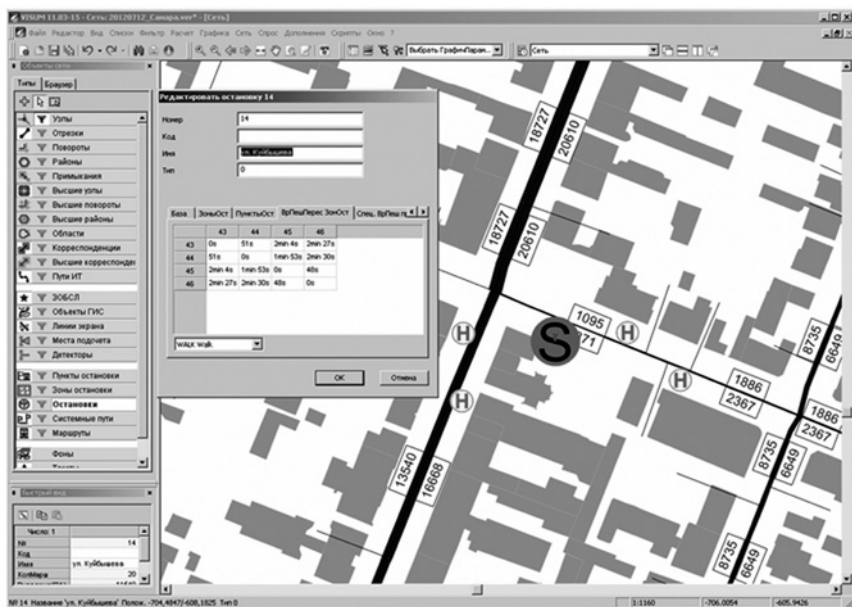


Рис. 3.14. Матрица времени пешеходного перехода между зонами остановки. Транспортная модель г.о. Самара

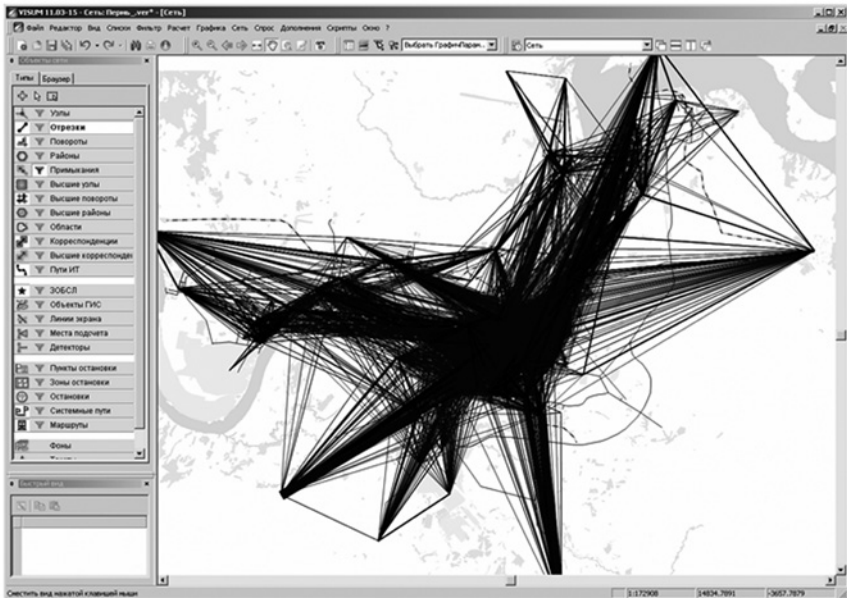


Рис. 3.15. Паук транспортных корреспонденций на индивидуальном транспорте. Транспортная модель Перми

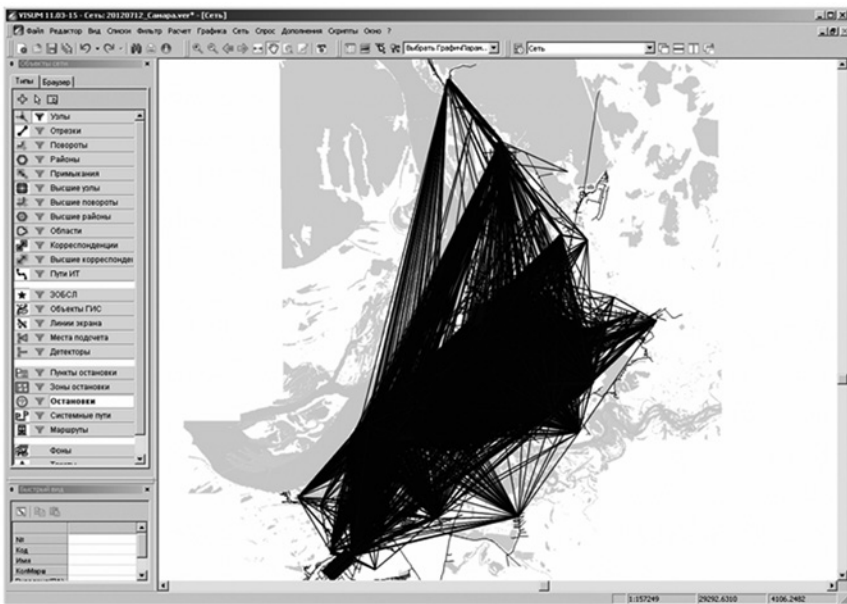


Рис. 3.16. Паук трудовых корреспонденций на общественном транспорте. Транспортная модель г.о. Самара

картографический анализ большого количества входных и выходных данных модели.

Общее представление о характере транспортного спроса в системе дает анализ паука корреспонденций, построенных по воздушным линиям, соединяющим транспортные районы города. Аналогичным образом можно представить паука корреспонденций для отдельных элементов сети – узлов, отрезков, остановок, районов, построенных как для общественного, так и для индивидуального транспорта.

Различные способы отображения результатов прогнозов, выполненных на транспортной модели, изложены в специальной литературе [130, 4].

На рис. 3.15 приведен паук транспортных корреспонденций для города Перми, на рис. 3.16 – паук трудовых корреспонденций на общественном транспорте для г.о. Самара. Они помогают оценить величину транспортной обеспеченности той или иной территории города.

Кроме анализа территориально распределенных величин, модель позволяет рассчитывать ряд таких глобальных характеристик для всей сети, как:

ТС · км, суммарный пробег всех автомобилей в сети;

ТС · часы, суммарное время реализации транспортных корреспонденций в сети;

средняя скорость в сети;

среднее время реализации транспортных корреспонденций.

Все характеристики элементов сети можно отображать разными способами: в виде списков, картограмм с отображением балок, картограмм с привязкой таблиц.

### **3.2. Методы оценки качества функционирования действующих транспортных систем городов**

В настоящее время на подавляющей территории земли природно-технические системы обеспечивают качество жизни (качественное материальное и нематериальное потребление). Нематериальное потребление в целом можно оценить через движение информационных потоков. Потребность в общении с целью обеспечения качества информационного обмена стимулирует подвижность людей. Качество транспортных систем в нашем понимании – это аналог способности информационных систем быстро и качественно удовлетворять информационный спрос.

В системе затрат (времени и денег) качество и назначение транспортных систем целесообразно рассматривать с двух сторон: обеспечения транспортной доступности и снижения транспортных издержек.

Первый критерий оценивается через восприятие человеком самой возможности осуществления необходимой ему транспортной корре-

спонденции. Второй критерий легко формализуем через количество времени или денег, затрачиваемых человеком на осуществление транспортных потребностей.

Оценивая качество городских транспортных систем, действующих на урбанизированных территориях, нет смысла рассматривать их обеспеченность транспортной доступностью. Само понятие «город» как раз и определяет ту территорию, где эта транспортная доступность уже реализована, а размер города зависит от качества его транспортной системы. *Городом* в этом случае стоит называть территорию, на которой обеспечена транспортная доступность в суточном цикле потребностей населения.

Можно поставить задачу оценки транспортного спроса, сформированного на городской территории, при этом объем и характер спроса будут зависеть от характера использования территории города. Определив в предыдущих главах назначение транспортных систем и их роль в показателе качества жизни, установив составляющие транспортного спроса и оценив возможности территории этот спрос удовлетворять, в данной главе дадим определение качеству функционирования городской транспортной системы. При фиксированных параметрах транспортного спроса в городе качество транспортной системы определяется качеством транспортного предложения.

Транспортное предложение состоит из элементов, с помощью которых транспортная система города удовлетворяет существующий транспортный спрос, и оно в конечном итоге будет определять, какой объем спроса и насколько качественно может удовлетворить транспортная система.

### **3.2.1. Общие показатели качества функционирования транспортных систем городов**

Показатель качества функционирования транспортной системы города – это время. Потребляемые ресурсы – это энергия и территория города. Они являются ограничениями в достижении цели. Энергия, в свою очередь, из-за несовершенства технологий ее преобразования в полезную транспортную работу, а также вследствие влияния человеческого фактора порождает дополнительные ограничения, накладываемые на выбросы загрязняющих веществ, шум, риски возникновения дорожно-транспортных происшествий. Следовательно, задача эффективной транспортной системы города – доставлять максимум целевой функции (минимизация времени реализации транспортных корреспонденций всех жителей всеми видами транспорта) при удовлетворении заданных территориальных ограничений.

В качестве целевого показателя функционирования транспортной системы крупного города целесообразно рассматривать среднее время

реализации транспортных корреспонденций, то есть среднее время, затрачиваемое одним человеком на совершение одной транспортной корреспонденции.

Имея в своем распоряжении только наблюдаемые (натурные) показатели функционирования транспортной системы города (интенсивность и скорость движения транспортных потоков) невозможно оценить качество действующей транспортной системы. Для такой оценки надо иметь представление об имеющемся на территории транспортном спросе, а также формализованное описание существующего транспортного предложения. Формализованное описание транспортного спроса и транспортного предложения вместе представляют собой транспортную модель.

При работе с транспортной моделью исследователю доступны несколько способов расчета среднего времени реализации транспортных корреспонденций.

1. Через матрицы затрат и матрицы корреспонденций. Данный способ наиболее универсальный, ибо не привязан к возможностям конкретного программного комплекса, в котором реализована транспортная модель, так как использование матриц затрат и матриц корреспонденций для представления данных общепринято. В этом случае выражение для расчета среднего времени реализации транспортных корреспонденций будет иметь вид:

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i,j} (t_{ij} \cdot x_{ij})}{\sum_{i,j} x_{ij}}, \quad (3.7)$$

где

$$t_{ij} = \frac{\sum_k (t_{kij} \cdot x_{kij})}{\sum_k x_{kij}},$$

$$x_{ij} = \sum_k x_{kij},$$

$x_{ij}$  – элементы матрицы корреспонденций;  $t_{ij}$  – элементы матрицы затрат, рассчитывается как средневзвешенное от нагрузок путей;  $x_{kij}$  – нагрузка пути номер  $k$  из района  $i$  в район  $j$ ;  $t_{kij}$  – время пути номер  $k$  из района  $i$  в район  $j$  в нагруженной сети.

2. Еще один способ расчета среднего времени реализации транспортных корреспонденций был предложен специалистами немецкой

компании «РОУРЫ». Данный способ, в отличие от первого, использует специфические параметры, полученные в результате перераспределения транспортных потоков.

Выражение для расчета среднего времени реализации транспортных корреспонденций с его помощью имеет вид:

$$t_{cp} = \frac{\sum_k (t_k \cdot q_k)}{\sum_{i,j} x_{ij}}, \quad (3.8)$$

где  $t_k$  – актуальное время для элемента  $k$  (может быть узел, поворот, отрезок);  $q_k$  – интенсивность транспортных потоков на элементе УДС  $k$ ;  $x_{ij}$  – матрица корреспонденций.

Специфичными параметрами этого способа являются нагрузка элемента сети и актуальное время движения по нему транспортного потока. Эти параметры рассчитывают при перераспределении транспортных потоков.

Таким образом, особенностью предложенного способа можно назвать то, что среднее время рассчитывается как средневзвешенное по нагрузкам на каждый из элементов сети. Усреднение времени происходит более точно, ибо учитывается каждый элемент сети и его нагрузка.

Данные способы расчета среднего времени применяют для индивидуального транспорта. Для общественного транспорта среднее время реализации транспортных корреспонденций рассчитывают на основании результатов перераспределения с учетом расписания движения, при этом отдельно рассчитывают среднее время начального и конечного пешеходного подходов, среднее время поездки и пересадки. Итоговое среднее время определяют как сумму данных средних значений параметров.

Для города Перми рассчитанное по первому способу значение среднего времени реализации транспортных корреспонденций для индивидуального транспорта составляет 34,42 минуты, по второму способу – 42,66. Для общественного транспорта среднее время реализации транспортных корреспонденций, полученное из результатов перераспределения с учетом расписания, – 45,4 минуты.

При изменении каких-либо входных параметров в транспортной модели (расселение жителей, изменение дислокации рабочих мест, транспортного предложения и т.п.) становится другим среднее время реализации транспортных корреспонденций. Это может положительно или отрицательно влиять на жителей города. Чтобы оценить эффект изменения времени, переведем расчеты в экономическую плоскость.

Рассмотрим в качестве примера жителя города (например, Перми), работающего по стандартному графику и добирающегося до места работы на каком-либо виде транспорта. Допустим, в нормальных условиях он тратил бы на проезд 20–30 мин и относился бы к этим затратам времени как к неизбежным. Но когда эти временные рамки возрастают в несколько раз, причем не по субъективным причинам, этот человек будет относить личное время, потраченное на проезд до работы, к категории рабочего.

Средняя заработная плата среднестатистического работника в Перми составляет 18 100 р., или  $Z/P \text{ ср. (мес.)} = 18\,100 \text{ р.}$

(1 месяц = 8 ч · 5 дней · 4 нед. = 160 рабочих часов).

$Z/P \text{ ср. (ч)} = 18\,100:160 \text{ ч} = 113,12 \text{ р.}$  – номинальное значение;

$Z/P \text{ ср. (мин)} = 1,9 \text{ р.}$

Следовательно, дополнительные затраты на совершение транспортных корреспонденций ведут к экономическим потерям, выраженным в недоработанных часах.

Таким образом, разность среднего времени реализации транспортных корреспонденций, умноженная на количество корреспонденций и на среднюю заработную плату, сложившуюся в городе, даст экономический эквивалент потерянного в пути времени.

Такой подход дает возможность оценить целесообразность проведения мероприятий по изменению каких-либо параметров транспортной системы города, в частности затратных, связанных с дорожным строительством и реконструкцией действующей УДС. Выбор того или иного способа расчета и оценки транспортных издержек при реализации транспортных корреспонденций определяется конкретной постановкой задачи.

Оценка времени реализации транспортных корреспонденций используется преимущественно при анализе качества проектных решений в области совершенствования организации дорожного движения. Экономическая оценка изменения затрат на реализацию транспортных перемещений производится чаще при оценке сроков окупаемости проектов и управленческих решений в области транспортного планирования, строительства и реконструкции элементов улично-дорожной сети городов.

### 3.2.2. Методика формализации и оценки транспортного спроса.

#### Транспортная зависимость территории

Общий объем транспортного спроса, приходящийся на каждую отдельную часть городской территории, является для нее внешним и определяется из общего пространственного анализа дислокации мест генерации и потребления транспортных потоков на всей исследуемой области. Технологии подобного анализа, основанные на различных



методах обработки эмпирических данных, опросов жителей подробно изложены в литературе [131].

Анализ распределения найденного транспортного спроса по исследуемой территории предлагается проводить без учета имеющегося транспортного предложения, оценивая абсолютную (максимально возможную) транспортную нагрузку на единицу ее площади. Для этих целей предлагается ввести новый показатель – «транспортная зависимость территории», однозначно и точно определяемый расчетным путем, связывающий пространственные характеристики отдельных городских территорий с общим объемом транспортного спроса в городе и имеющий размерность чел · км в сутки.

*Транспортная зависимость территории* – это объем перемещения по ней пассажиров или грузов (чел · км) в течение дня при идеальном удовлетворении существующего транспортного спроса. Величина транспортной зависимости для каждого конкретного участка территории города будет определять ограничения при построении оптимизационной задачи функционирования транспортных систем. Это некая характеристика, описывающая предельное состояние транспортной сети на отдельной городской территории.

Для понимания смысла параметра удобна его геометрическая интерпретация. На рис. 3.17 представлено деление территории города на транспортные районы, которые в модели транспортного спроса являются генераторами и потребителями транспортных потоков (источниками и стоками транспортного движения). Точность итоговой модели транспортного спроса в большой степени определяется детализацией области (территории города).

Модель транспортного спроса города Перми использует 380 транспортных районов.

Границы транспортных районов установлены исходя из следующих принципов:

- использование линий естественных и искусственных преград (реки, линии железных дорог и т.д.);
- соблюдение административного районирования территории;
- учет функционального зонирования территории города;
- сохранение сложившихся кварталов застройки;
- недопущение районов вытянутой конфигурации.

Объем спроса на передвижение между транспортными районами города определяют на основе методики, изложенной выше. Перемещение из района в район будем называть корреспонденцией, которая измеряется в количестве людей, перемещающихся их одного района в другой в течение суток. Весь существующий на территории транспортный спрос можно выразить в виде матрицы корреспонденций. Корреспонденции могут осуществляться с разными целями (поездки домой, на работу, учебу, к местам приложения труда в сфере услуг). Различа-

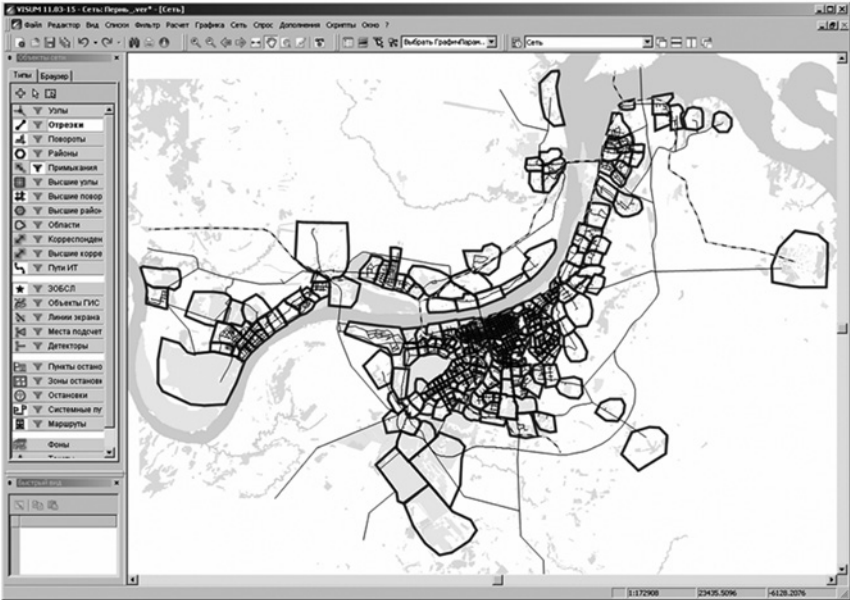


Рис. 3.17. Картограмма деления территории города Перми на транспортные районы

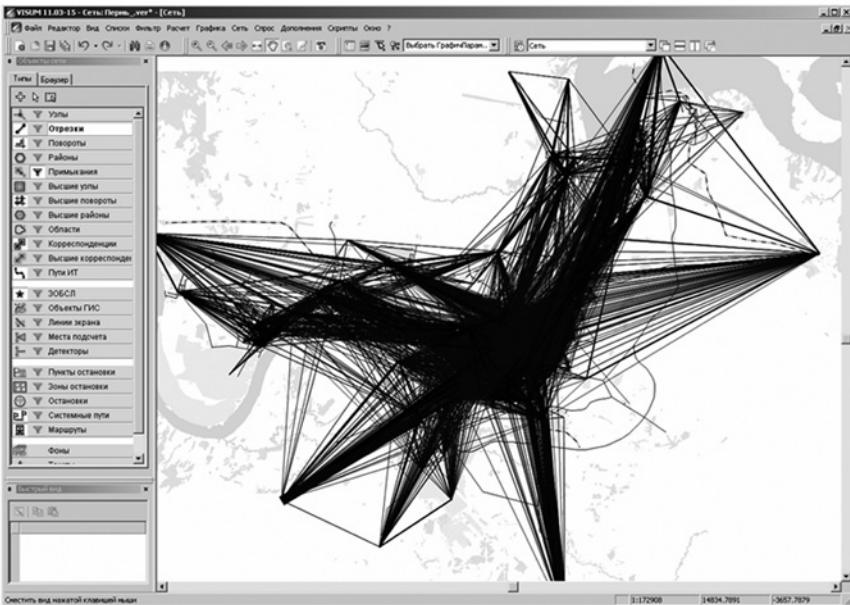
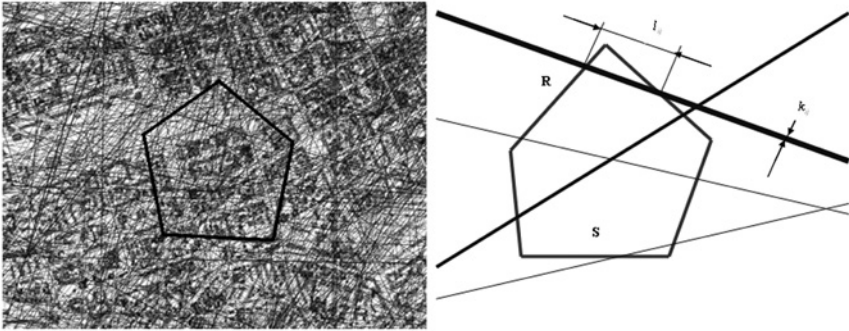


Рис. 3.18. Паук транспортных корреспонденций города Перми



**Рис. 3.19.** Область исследования в виде выпуклого пятиугольника:

$k_{ij}$  – объем корреспонденций из  $i$ -го района в  $j$ -й;  $l_{jr}$  – доля транспортных корреспонденций  $i$ -го района в  $j$ -й, проходящих через область исследования  $r$

ют корреспонденции на общественном и индивидуальном транспорте. Для каждого вида и целей корреспонденций строят отдельные матрицы, которые также называют матрицами корреспонденций.

На рис. 3.18 в виде паука корреспонденций графически представлен весь рассчитанный объем транспортного спроса в Перми. Напомним, что паук корреспонденций – это набор парных связей источник-цель всех транспортных корреспонденций, реализуемых в городе в течение суток.

Задача расчета параметров транспортной зависимости территорий для произвольных областей может решаться как численно, так и аналитически – методом геометрического погружения.

Выделив произвольный фрагмент территории города  $r$  (рис. 3.19), можно аналитически получить суммарный средневзвешенный объем долей транспортных корреспонденций, проходящих через выделенную территорию. На рис. 3.19 эта территория представлена в виде выпуклого пятиугольника. В дальнейшем такой фрагмент территории будем называть областью исследования.

Город разделен на  $n$  транспортных районов. Пусть  $T$  – множество точек координат центров тяжести (центров притяжения) транспортных районов города,  $T = t_1, t_2, \dots, t_n$ .

Координаты центров районов:

$$\bar{X}_t = \begin{Bmatrix} x_{t1} \\ x_{t2} \\ \vdots \\ x_{tm} \end{Bmatrix} \quad \bar{Y}_t = \begin{Bmatrix} y_{t1} \\ y_{t2} \\ \vdots \\ y_{tm} \end{Bmatrix}$$

Известна матрица корреспонденций между районами города:

$$K = \begin{Bmatrix} 0 & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & 0 & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & 0 \end{Bmatrix}$$

где  $k_{ij}$  – объем корреспонденций из  $i$ -го района в  $j$ -й за сутки.

Требуется отыскать предельную, теоретически возможную загрузку произвольно заданных выпуклых областей на территории города движением моторизованного транспорта. Количество областей исследования обозначим  $E$ .

Пусть область задана выпуклым многоугольником  $r$ , образованным  $m$  вершинами. Известны координаты вершин многоугольника:

$$\bar{X}_r = \begin{Bmatrix} x_{r1} \\ x_{r2} \\ \vdots \\ x_{rm} \end{Bmatrix} \quad \bar{Y}_r = \begin{Bmatrix} y_{r1} \\ y_{r2} \\ \vdots \\ y_{rm} \end{Bmatrix}$$

Задача сводится к отысканию суммы долей всех корреспонденций, проходящих через заданную (исследуемую) область при наличии идеального (полного) транспортного предложения.

Аналитическое решение задачи потребует функционального описания модели транспортного спроса. Для этого построим уравнения прямых, которые соединяют центры районов, и запишем их с помощью трех матриц следующим образом:

$$At \cdot x + Bt \cdot y + Ct = 0, \quad (3.9)$$

где

$$At = \begin{Bmatrix} 0 & a_{t12} & \dots & a_{t1n} \\ a_{t21} & 0 & \dots & a_{t2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & 0 \end{Bmatrix} \quad Bt = \begin{Bmatrix} 0 & b_{t12} & \dots & b_{t1n} \\ b_{t21} & 0 & \dots & b_{t2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & 0 \end{Bmatrix}$$

$$Ct = \begin{Bmatrix} 0 & c_{t12} & \dots & c_{t1n} \\ c_{t21} & 0 & \dots & c_{t2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & 0 \end{Bmatrix}$$

где

$$\begin{aligned} a_{ij} &= y_{ij} - y_{ii}, \\ b_{ij} &= x_{ii} - x_{ij}, \\ c_{ij} &= y_{ii} \cdot x_{ij} - x_{ii} \cdot y_{ij}. \end{aligned}$$

Аналогично в матричном виде представим исследуемую выпуклую область, для чего построим уравнения прямых, задающих выпуклый многоугольник:

$$Ar \cdot x + Br \cdot y + Cr = 0, \quad (3.10)$$

где

$$Ar = \begin{Bmatrix} a_{r1} \\ a_{r2} \\ \vdots \\ a_{rm} \end{Bmatrix} \quad Br = \begin{Bmatrix} b_{r1} \\ b_{r2} \\ \vdots \\ b_{rm} \end{Bmatrix} \quad Cr = \begin{Bmatrix} c_{r1} \\ c_{r2} \\ \vdots \\ c_{rm} \end{Bmatrix}$$

где

$$\begin{aligned} a_{ri} &= y_{ri+1} - y_{ri}, \\ b_{ri} &= x_{ri} - x_{ri+1}, \\ c_{ri} &= y_{ri} \cdot x_{ri+1} - x_{ri} \cdot y_{ri+1}. \end{aligned}$$

Для  $x_{rm+1}$  и  $y_{rm+1}$  взять значения  $x_{r1}$  и  $y_{r1}$  соответственно.

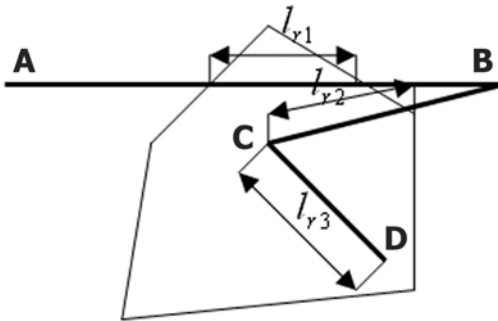
Затем сформируем матрицу длин отрезков прямых, соединяющих центры районов, находящихся в заданном выпуклом многоугольнике  $r$ :

$$L_r = \begin{Bmatrix} 0 & l_{12r} & \dots & l_{1nr} \\ l_{21r} & 0 & \dots & l_{2nr} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{n1r} & l_{n2r} & \dots & 0 \end{Bmatrix}$$

Элементы матрицы  $L_r$  представляют собой долю всех корреспонденций, проходящих через область исследования, таким образом:

$l_{ijr}$  – доля корреспонденции между  $i$ -м и  $j$ -м транспортными районами, проходящая в исследуемой области  $r$ .

Кроме того, при формировании матрицы важно учесть то, как проходит каждая корреспонденция через исследуемую область: транзит; въезд/выезд; корреспонденции внутри области. Способ прохождения области будет определять, каким образом рассчитывается длина от-



**Рис. 3.20.** Исследуемая область  $r$ . Типы прохождения корреспонденций (маршруты корреспонденций)

резка, находящегося в области (рис. 3.20).

Через область проходят маршруты, соединяющие центры транспортных районов: А, В, С, D. Возможны три типа прохождения маршрута через исследуемую область  $r$ :

1-й тип (А – В) транзит – маршрут пересекает границы исследуемой области в двух точках;

2-й тип (В – С) въезд/выезд – маршрут пересекает

границы исследуемой области в одной точке;

3-й тип (С – D) внутри области – маршрут не пересекает границы исследуемой области, а центры находятся внутри области.

Для каждого типа прохождения маршрута в области обозначим сумму долей корреспонденций и транспортную зависимость как:

$l_{rs}$  – сумма длин отрезков, находящихся в области  $r$ , типа  $s$  (км);

$G_{rs}$  – транспортная зависимость в области  $r$ , для корреспонденций типа  $s$  (чел · км в сутки);

$$r = 1, 2, \dots, E; s = 1, 2, 3.$$

Подробно рассмотрим методику определения суммы долей всех корреспонденций, проходящих через область исследования ( $l_{rs}$ ), и установления транспортной зависимости области ( $G_{rs}$ ) с учетом типа прохождения маршрута, где  $r$  – номер области исследования,  $s$  – тип прохождения маршрута.

Для этого найдем точки пересечения поочередно для прямых, соединяющих центры районов  $At \cdot x + Bt \cdot y + Ct = 0$  с каждой прямой, проходящей через стороны выпуклого многоугольника  $Ar \cdot x + Br \cdot y + Cr = 0$ . Проверим, принадлежат ли полученные точки пересечения прямым отрезкам, которые являются сторонами выпуклого многоугольника ( $r$ ), и, отрезкам, соединяющим центры транспортных районов. В случае, если точка принадлежит обоим отрезкам, она фиксируется.

При анализе общего количества полученных фиксированных точек можно обнаружить три случая:

- а) нет ни одной фиксированной точки;
- б) есть только одна фиксированная точка;
- в) есть две фиксированные точки.

Рассмотрим эти случаи более подробно:

В случае, когда *нет ни одной фиксированной точки*, осуществляется проверка с целью установления того, принадлежат ли одновременно центры  $i$ -го и  $j$ -го районов области выпуклого многоугольника. Это означает, что центры транспортных районов находятся внутри области, или 3-й тип прохождения маршрута через область  $r$ .

Тогда  $l_{ijr}$  (доля корреспонденций) находится как расстояние между центрами  $i$ -го и  $j$ -го районов и суммируется в  $l_{r3}$ ; а значение  $k_{ij} \cdot l_{ijr}$  (транспортная зависимость) суммируется в  $G_{r3}$ .

Если есть *только одна*  $(x_{pk}, y_{pk})$  *фиксированная точка*, то требуется проверка принадлежности центров  $i$ -го или  $j$ -го районов области выпуклого многоугольника. Если один из центров районов принадлежит области выпуклого многоугольника, то это второй тип прохождения маршрута через область (въезд/выезд). Тогда  $l_{ijr}$  (доля корреспонденций) находится как расстояние между центром района (входящего в выпуклый многоугольник) и фиксированной точкой  $(x_{pk}, y_{pk})$ . Тогда  $l_{ijr}$  суммируется в  $l_{r2}$ ;  $k_{ij} \cdot l_{ijr}$  (транспортная зависимость) суммируется в  $G_{r2}$ .

Наличие двух фиксированных точек  $(x_{p1}, y_{p1})$  и  $(x_{p2}, y_{p2})$  – это первый тип прохождения маршрута через область (транзит). Тогда  $l_{ijr}$  находится как расстояние между фиксированными точками и суммируется в  $l_{r1}$ ;  $k_{ij} \cdot l_{ijr}$  суммируется в  $G_{r1}$ .

Таким образом исследуются все маршруты, проходящие через выделенную для исследования область  $r$ .

Итоговый расчет транспортной зависимости области находится как:

$$G_r = G_{r1} + G_{r2} + G_{r3}, \quad (3.11)$$

где  $G_r$  – транспортная зависимость области  $r$  (чел · км в сутки);

$$G_r = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \cdot l_{ijr}, \quad (3.12)$$

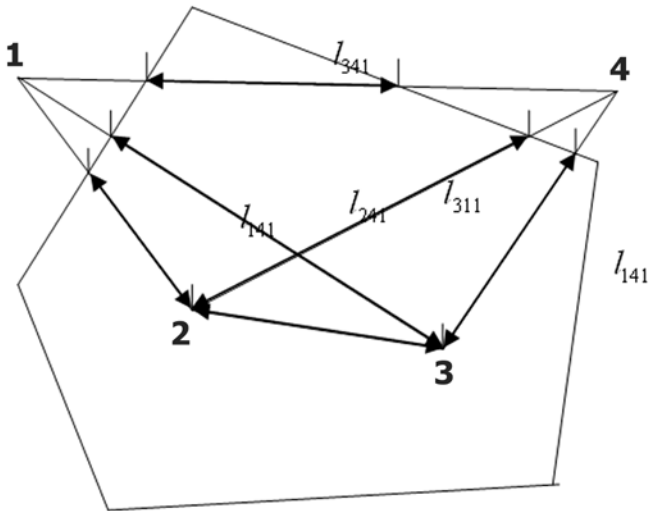


Рис. 3.21. Транспортная зависимость исследуемой области

где  $i \neq j$ ;  $k_{ij}$  – значение элемента матрицы (объем) корреспонденций между  $i$ -м и  $j$ -м транспортными районами;  $l_{ijr}$  – доля корреспонденции между  $i$ -м и  $j$ -м транспортными районами, попадающая в исследуемую область  $r$ .

Приведем пример расчета транспортной зависимости исследуемой области. На рис. 3.21 введены следующие обозначения:  $r = 1$  – область исследования; 1, 2, 3, 4 – центры транспортных районов.

Необходимо найти транспортную зависимость области 1 –  $G_1$ . Для этого следует рассмотреть все корреспонденции, проходящие через указанную область, в нашем случае это 4 транспортных района.

Матрица длин отрезков прямых, соединяющих центры районов, находящихся в заданном выпуклом многоугольнике 1, будет иметь вид:

$$L_1 = \begin{Bmatrix} 0 & l_{121} & l_{131} & l_{141} \\ l_{211} & 0 & l_{231} & l_{241} \\ l_{311} & l_{321} & 0 & l_{341} \\ l_{411} & l_{421} & l_{431} & 0 \end{Bmatrix}$$



Матрица корреспонденций между рассматриваемыми районами:

$$K = \begin{Bmatrix} 0 & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & 0 & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & 0 & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & 0 \end{Bmatrix}$$

Следует произвести расчет значений  $l_{ij}$  в зависимости от типа прохождения рассматриваемой области 1. Для этого будем рассматривать каждую корреспонденцию по отдельности. Кроме этого, введем понятие транспортной зависимости для корреспонденций определенного типа, то есть  $G_{1s}$  – транспортная зависимость в области 1, для корреспонденций типа  $s$  (чел · км в сутки).

Тогда корреспонденция из района 1 в 2 будет внутренней, поэтому  $l_{12}$  и  $l_{21}$  будут рассчитываться как расстояние между центрами районов и транспортные зависимости будут суммироваться к  $G_{13}$  таким образом:

$$k_{12} \cdot l_{12} + k_{21} \cdot l_{21} = G_{13}. \quad (3.13)$$

Корреспонденции между 1–3, 2–3, 1–4, 2–4 районами относятся к корреспонденциям въезд-выезд и имеют одну фиксированную точку при пересечении со сторонами исследуемой области, тогда доли транспортных корреспонденций будут рассчитываться как расстояние между фиксированной точкой и центром транспортного района, лежащего внутри области исследования, а транспортная зависимость  $G_{R2}$  будет равна:

$$G_{12} = k_{13} \cdot l_{131} + k_{14} \cdot l_{141} + k_{23} \cdot l_{231} + k_{24} \cdot l_{241} + \\ + k_{31} \cdot l_{311} + k_{32} \cdot l_{321} + k_{41} \cdot l_{411} + k_{42} \cdot l_{421}. \quad (3.14)$$

Корреспонденции между 3–4 районами относятся к корреспонденциям транзитного типа и имеют две фиксированных точки при пересечении со сторонами исследуемой области, тогда доли транспортных корреспонденций будут рассчитываться как расстояние между фиксированными точками, а транспортная зависимость  $G_{11}$  будет равна:

$$G_{11} = k_{34} \cdot l_{341} + k_{43} \cdot l_{431}. \quad (3.15)$$

Таким образом, транспортная зависимость для области 1 равна:

$$G_1 = G_{11} + G_{12} + G_{13} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 k_{ij} \cdot l_{ij1}. \quad (3.16)$$

Практический смысл найденного параметра  $G_r$  заключается в том, что найденная величина для каждого конкретного участка территории города будет определять целесообразность и виды возможных административных (управленческих) ограничений на доступ к участкам УДС внутри данной территории. Чем больше величина  $G_r$ , тем сильнее транспортная нагрузка в рассматриваемой области, и наоборот. Анализ этого параметра позволит в качестве локальной задачи, например, дать теоретическое обоснование закрытия (ограничения) доступа к участкам УДС центральных районов городов и вообще любых городских территорий произвольных размеров и конфигурации [4, 132].

### 3.2.3. Дифференцированные показатели качества функционирования транспортных систем городов

Общий показатель качества функционирования транспортной системы выражается через величину транспортных издержек – среднее время реализации транспортных корреспонденций, которое рассчитывается для города в целом, усреднение происходит для всех корреспонденций. Расчет среднего времени реализации транспортных корреспонденций проводится по представленным выше соотношениям (3.7) и (3.8).

Рассматривая более подробно показатель транспортных издержек как критерий качества функционирования транспортной системы города можно перейти к оценкам качества системы на отдельных типовых городских территориях. Используем предложенное в главе 2 деление территории города на транспортные зоны.

Проведенный в главе 2 транспортный анализ городской территории показывает существенную неравномерность ее использования под объектами различного назначения. С увеличением расстояния от центра города уменьшается не только плотность освоенных территорий и территорий, используемых под объектами недвижимости, но и общий баланс площадей, занятых под частные владения, и территории общего пользования, используемые под объекты улично-дорожной сети. Аналогичная ситуация наблюдается с развитием инфраструктуры городского пассажирского транспорта общего пользования.

Нужно учесть, что центральные территории города имеют большую транспортную зависимость, в отличие от территорий, удаленных от центра города, и, следовательно, сложившийся в городе баланс использования территории, в частности под транспортной инфраструктурой

турой, экономически оправдан. Однако это приводит к различию в оценках качества функционирования транспортной системы людьми, проживающими на разных городских территориях.

По аналогии с другими инженерными сетями и объектами обслуживания жители оценивают свою транспортную обеспеченность с учетом проживания на конкретных городских территориях. С одной стороны, различия в этих оценках порождают социальные конфликты, с другой – выравнивание транспортной обеспеченности для всех жителей города на всех территориях экономически неоправданно. Становится очевидным, что повышение качества транспортной системы города является задачей, для решения которой надо не только формировать качественное транспортное предложение, но и создать условия для изменения транспортного спроса.

Дифференцированная оценка качества транспортной системы подразумевает деление территории города на транспортные зоны четырех типов:

1) городской центр (зона А-1) (1 зона), характерна максимальная деловая активность;

2) центральные районы, прилегающие к городскому центру (зона В-2) (4 зоны), характерны преобладающая высотная застройка и многофункциональное использование территории;

3) удаленные районы (зона С-3) (3 зоны), имеют собственные центры деловой и социальной активности. Перспектива – преобразование данных участков в самостоятельные поселения и их автономизация;

4) обширные участки с низкой плотностью населения (малоэтажные строения) (зона D-4) (2 зоны).

Зонирование территории города Перми показано на рис. 3.22 (см. цветную вклейку), где для некоторой исследуемой области  $r$  приведены типы прохождения корреспонденций: АВ – транзитное движение; ВС – пограничное движение; CD – движение внутри области исследования. Для каждого типа территорий рассчитали количество корреспонденций с разбивкой по типам, а также время, затрачиваемое на них.

Предлагается для оценки качества функционирования транспортной системы города ввести понятие «транспортная обеспеченность территории» (ТОТ). Город должен представлять собой территории (зоны) равной транспортной обеспеченности. Следовательно, цель транспортной политики города – добиваться выравнивания транспортной обеспеченности его территорий.

С целью формализации понятия транспортной обеспеченности предлагается для отдельных городских территорий оценивать объемы транспортных корреспонденций и соответственно время их реализации по трем типам перемещений:

– внутреннее движение в зоне;

- пограничное движение в зоне;
- транзитное движение.

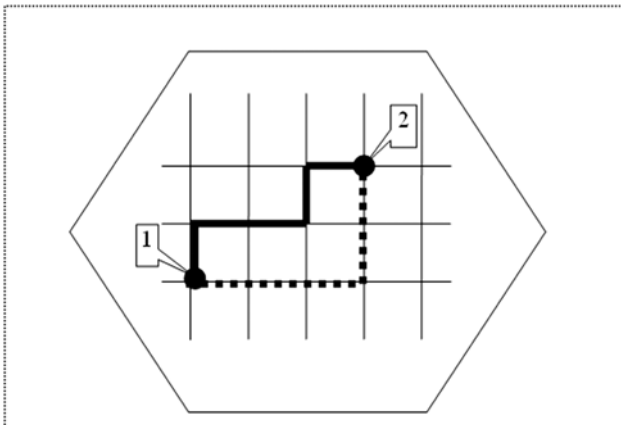
Преследуя цель выравнивания транспортной обеспеченности территорий города, необходимо дифференцированно оценивать вклад времени реализации корреспонденций каждого типа в общий показатель целевой функции транспортной системы города – среднее время реализации транспортных корреспонденций. В значении целевой функции для транспортной системы города среднее время реализации транспортных корреспонденций различных типов будет входить дифференцированно, с различными весовыми коэффициентами.

В качестве теоретического обоснования целесообразности такого подхода можно отметить несколько моментов, иллюстрирующих сложившийся в транспортных системах многих городов дисбаланс между потребностями в транспортном движении и характером использования существующей в городах транспортной инфраструктуры.

1. Можно отметить, что наращивание транспортной инфраструктуры в центральных частях городов никак не отражается на ее загрузке, при этом растет только интенсивность движения, а также меняется баланс типов транспортных корреспонденций между внутренними, пограничными и транзитными. С ростом транспортного предложения баланс изменяется в сторону увеличения доли реализации транзитных транспортных корреспонденций.

2. Наращивание транспортной инфраструктуры в периферийных районах, наоборот, ведет к росту внутренних транспортных корреспонденций.

Итак, транспортная обеспеченность территории будет определяться как среднее время реализации внутренних корреспонденций исследуемой зоны. Согласно схеме, изображенной на рис. 3.23, это корре-



**Рис. 3.23.** Схема, иллюстрирующая принцип расчета параметра TOT

спонденции типа CD. Она иллюстрирует выбор корреспонденций, а также принцип расчета параметра ТОТ.

Шестиугольник – это граница исследуемой области (территории города). Сетка внутри границы области представляет собой фрагмент графа УДС города, находящийся в исследуемой зоне. Как отмечалось выше, рассматриваемые корреспонденции типа CD имеют источник и цель (исток и сток) внутри исследуемой зоны. На приведенной схеме это точки 1 и 2. Для реализации корреспонденций из точки 1 в точку 2 может существовать множество путей. На рис. 3.23 примеры таких путей отмечены жирной и пунктирной линиями. Каждому из возможных путей реализации корреспонденций можно присвоить свой номер. Таким образом, при расчете ТОТ рассматривается все множество путей для корреспонденций внутри исследуемой зоны.

На рис. 3.24 (см. цветную вклейку) представлен фрагмент расчетной модели для определения параметров качества транспортной модели города Перми. В частности, стрелками выделены внутризоновые пути в границах первой зоны – городского центра (зона А).

Возможны два способа определения транспортной обеспеченности территории.

Первый способ представляет собой средневзвешенное по количеству отдельных корреспонденций и их длине значение времени реализации внутренних корреспонденций в исследуемой зоне. В этом случае значение транспортной обеспеченности территории будет найдено как:

$$\text{ТОТ}_1 = \frac{\sum_k x_{kCD} \cdot l_{kCD} \cdot t_{kCD}}{\sum_k x_{kCD} \cdot l_{kCD}}, \quad (3.17)$$

где  $\text{ТОТ}_1$  – транспортная обеспеченность территории, с;  $k$  – порядковый номер пути типа CD в исследуемой зоне;  $x_{kCD}$  – количество корреспонденций на  $k$ -м пути типа CD за сутки;  $t_{kCD}$  – время совершения корреспонденций на  $k$ -м пути типа CD, с;  $l_{kCD}$  – длина  $k$ -го пути типа CD, м.

Второй способ расчета представляет собой средневзвешенное по количеству корреспонденций отношение их длин ко времени их реализации. В этом случае значение транспортной обеспеченности территории будет найдено как:

$$\text{ТОТ}_2 = \frac{\sum_k x_{kCD} \cdot l_{kCD}}{\sum_k x_{kCD} \cdot t_{kCD}}, \quad (3.18)$$

где  $\text{ТОТ}_2$  – транспортная обеспеченность территории, м/с.

Таким образом,  $\text{ТОТ}_1$ , рассчитанная по первому способу, представляет собой время и измеряется в секундах, а  $\text{ТОТ}_2$ , рассчитанная по второму способу, – скорость и измеряется в метрах в секунду. Оба этих показателя характеризуют качество транспортной системы города на отдельно взятой территории относительно ее жителей.

Оценки будут показывать либо среднее время, которое затрачивает житель этой территории (зоны) для совершения внутризональных корреспонденций, либо скорость, с которой транспортная система позволит ему эти корреспонденции совершить. Эти две оценки, с одной стороны, будут оценивать существующее в исследуемой зоне транспортное предложение с точки зрения проживающего на этой территории жителя, а с другой стороны – потенциал для изменения структуры транспортного спроса на территории.

Понятно, что увеличение параметра ее транспортной обеспеченности (увеличение скорости либо снижение времени реализации транспортных корреспонденций) будет стимулировать и изменение структуры транспортного спроса в сторону увеличения доли внутренних корреспонденций.

Транспортная обеспеченность территории имеет единицы измерения – время или скорость, поэтому территориями равной транспортной обеспеченности будут являться те из них, для которых значения  $\text{ТОТ}$  будут равны.

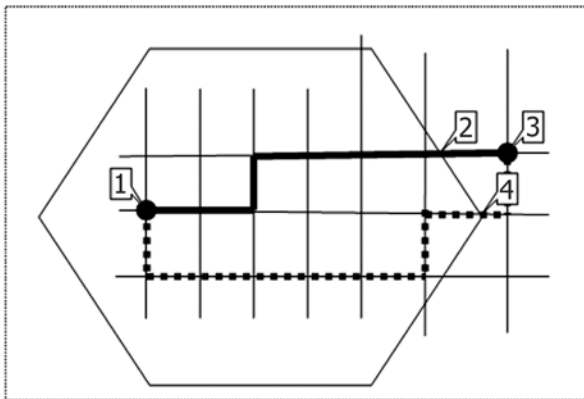


Рис. 3.25. Схема, иллюстрирующая принцип расчета параметра TOD

По аналогии с транспортной обеспеченностью территории можно ввести понятия транспортной обеспеченности доступа к территории и транспортной обеспеченности транзита через территорию.

*Транспортная обеспеченность доступа к территории (TOD)* будет определяться как среднее время реализации пограничных корреспонденций внутри исследуемой зоны. Согласно схеме, изображенной на рис. 3.25 (принцип выбора корреспонденций для расчета TOD), это корреспонденции типа ВС.

Как отмечалось выше, шестиугольник – это граница исследуемой области (территории города), а сетка внутри нее – фрагмент графа УДС города. Рассматриваемые корреспонденции типа ВС имеют исток внутри исследуемой зоны, на приведенной схеме это точка 1. Сток корреспонденции находится за пределами зоны (точка 2). Примеры путей из точки 1 в точку 2 отмечены жирной и пунктирной линиями. При расчете TOD будут учитываться только части путей, проходящие внутри зоны, в примере это пути от точки 1 и до точек выхода за границы исследуемой зоны (точки 3 и 4). Каждому из возможных путей реализации корреспонденций надо присвоить свой номер. При этом рассматриваются все возможные пути для корреспонденций с истоком внутри исследуемой зоны и стоком за ее пределами.

На рис. 3.26 (см. цветную вклейку) представлен фрагмент расчетной модели для определения параметров транспортной обеспеченности доступа к территории для зоны А города Перми. Стрелками выделены пограничные пути в границах первой зоны – городского центра (зона А).

Для определения транспортной обеспеченности доступа к территории так же, как и для определения транспортной обеспеченности территории, возможны два способа:

$$1. \text{TOD}_1 = \frac{\sum_k x_{kBC} \cdot l_{kBC} \cdot t_{kBC}}{\sum_k x_{kBC} \cdot l_{kBC}}, \quad (3.19)$$

где  $\text{TOD}_1$  – транспортная обеспеченность доступа к территории, с;  $k$  – порядковый номер пути типа ВС в исследуемой зоне;  $x_{kBC}$  – количество корреспонденций на  $k$ -м пути типа ВС за сутки;  $t_{kBC}$  – время совершения корреспонденций на  $k$ -м пути типа ВС внутри территории, с;  $l_{kBC}$  – длина  $k$ -го пути типа ВС внутри территории.

$$2. \text{TOD}_2 = \frac{\sum_k x_{kBC} \cdot l_{kBC}}{\sum_k x_{kBC} \cdot t_{kBC}}, \quad (3.20)$$

где  $\text{TOD}_2$  – транспортная обеспеченность доступа к территории, м/с.

Аналогично TOT, первый способ – это средневзвешенное по количеству отдельных корреспонденций и их длине значение времени реализации внутренних корреспонденций в исследуемой зоне, измеряется в секундах, а второй способ расчета – средневзвешенное по количеству корреспонденций отношение длин корреспонденций ко времени их реализации, представляет собой скорость и измеряется в метрах в секунду.

*Транспортная обеспеченность транзита через территорию* (TOTR) будет определяться как среднее время реализации транзитных корреспонденций, проходящих по ее территории. Согласно схеме, изображенной на рис. 3.27 (принцип выбора корреспонденций для расчета TOTR), это корреспонденции типа АВ.

В шестиугольнике заключен фрагмент графа УДС города. Как отмечалось выше, рассматриваемые корреспонденции типа АВ имеют исток и сток за пределами зоны, на приведенной схеме это точки 1 и 2.

На рис. 3.27 даны возможные примеры путей из точки 1 в точку 2, отмеченные линиями – жирной и пунктирной. При расчете TOTR будут учитываться только части путей, проходящие внутри зоны, в нашем примере это отрезки пути между точками выхода из исследуемой зоны 3–4 и 5–6. У каждого из возможных путей реализации коррес-

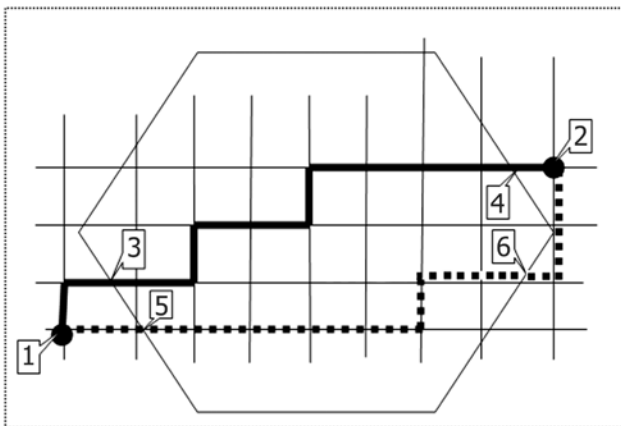


Рис. 3.27. Схема, иллюстрирующая принцип расчета параметра TOTR



понденций должен быть свой номер. При этом рассматривается все множество путей для корреспонденций с истоком и стоком за пределами исследуемой зоны, проходящих через исследуемую зону.

На представленном фрагменте расчетной модели для определения параметров обеспеченности транзита через территорию зоны А города Перми (рис. 3.28) (см. цветную вклейку) стрелками выделены транзитные пути в границах первой зоны – городского центра (зона А).

Для определения транспортной обеспеченности транзита через территорию, аналогично TOT и TOD, возможны два способа:

$$1. \text{TOTR}_1 = \frac{\sum_k x_{kAB} \cdot l_{kAB} \cdot t_{kAB}}{\sum_k x_{kAB} \cdot l_{kAB}}, \quad (3.21)$$

где  $\text{TOTR}_1$  – транспортная обеспеченность доступа к территории, с;  
 $k$  – порядковый номер пути типа АВ в исследуемой зоне;  $x_{kAB}$  – количество корреспонденций на  $k$ -м пути типа АВ за сутки;  $t_{kAB}$  – время совершения корреспонденций на  $k$ -м пути типа АВ, внутри территории, с;  $l_{kAB}$  – длина  $k$ -го пути типа АВ, внутри территории, м.

$$2. \text{TOTR}_2 = \frac{\sum_k x_{kAB} \cdot l_{kAB}}{\sum_k x_{kAB} \cdot t_{kAB}}, \quad (3.22)$$

где  $\text{TOTR}_2$  – транспортная обеспеченность доступа к территории, м/с.

Первый способ – это средневзвешенное по количеству отдельных корреспонденций и их длине значение времени реализации внутренних корреспонденций в исследуемой зоне, измеряемое в секундах, второй способ – средневзвешенное по количеству корреспонденций отношение длин корреспонденций ко времени их реализации, представляет собой скорость и измеряется в метрах в секунду.

С точки зрения внутреннего восприятия человеком своей транспортной обеспеченности различные типы поездок по их значимости стоят в определенной последовательности для каждой из территорий:

- внутреннее движение в зоне – параметр транспортной обеспеченности территории (TOT);
- пограничное движение в зоне – параметр транспортной обеспеченности доступа к территории (TOD);
- транзитное движение – параметр транспортной обеспеченности транзита через территорию (TOTR).

Реализация потребностей во внутреннем движении гораздо важнее для жизни человека, чем движение с пограничными целями или транзитное движение через территорию, где он проживает. Последнее рассматривается жителями территории как определенный негативный фактор.

Разбив город на отдельные транспортные зоны, можно рассматривать каждую из них как самостоятельный город со своей транспортной системой. Очевидно, что оценка качества работы такой локальной транспортной системы будет зависеть от времени реализации именно внутренних корреспонденций, реализуемых жителями этого условного города, а не пограничных и тем более не транзитных, которые будут осуществляться даже не жителями этой территории.

Поэтому при дифференцированной оценке качества функционирования транспортной системы города в первую очередь следует рассматривать качество (время реализации) удовлетворения внутренних транспортных корреспонденций.

В качестве примера дадим дифференцированную оценку транспортной системе населенного пункта Кондратово Пермского района Пермского края. Данный населенный пункт находится внутри границ города Перми. Для его жителей транзитным транспортом можно считать самолеты, глиссадная плоскость следования которых до аэропорта Б. Савино проходит как раз над этим населенным пунктом, после чего самолеты осуществляют посадку в центральном аэропорту города. На жителей Кондратово эти самолеты оказывают очевидное негативное влияние в части шумового воздействия.

Однако ремонт проезжей части в населенном пункте уменьшает время осуществления корреспонденций внутри территории и выездов из нее, сокращая транспортные затраты жителей. Это впоследствии способствует развитию территории: строительству жилых и административных объектов, открытию организаций, оказывающих услуги населению.

На примере Кондратово рассмотрим, в чем смысл найденного значения ГОТ. Данный населенный пункт связан с остальной территорией города Перми двумя транспортными связями. Один из выездов находится в нормативном техническом состоянии, что позволяет жителям быстро осуществлять корреспонденции видов ВС и CD, а второй выезд – в ненормативном состоянии, и это затрудняет транзитный проезд жителям Перми через Кондратово. Тем не менее основная часть жителей общается с городом именно через первый выезд, поэтому время совершения корреспонденций ВС и CD будет меньше, чем АВ.

Таким образом, для жителей Кондратово безразлично время совершения корреспонденций типа АВ через их населенный пункт.

Таблица 3.5

**Параметры транспортной обеспеченности TOT, TOD и TOTR  
для каждой зоны, рассчитанные первым способом**

Номер зоны	TOT, ч	TOD, ч	TOTR, ч
1	0,20	0,32	0,82
2	0,74	0,75	1,06
3	0,23	0,32	0,64
4	0,37	0,28	0,79
5	0,50	0,45	0,70
6	0,32	0,44	0,74
7	0,27	0,96	0,90
9	0,25	0,32	0,69
10	0,18	0,34	0,79

Таблица 3.6

**Параметры транспортной обеспеченности TOT, TOD и TOTR  
для каждой зоны, рассчитанные вторым способом**

Номер зоны	TOT, км/ч	TOD, км/ч	TOTR, км/ч
1	15,98	12,73	11,27
2	10,64	10,90	13,99
3	16,27	13,72	12,44
4	14,53	17,29	12,54
5	14,52	14,28	13,66
6	21,65	17,55	13,63
7	23,17	11,64	13,74
9	15,03	18,42	12,17
10	31,31	18,24	16,39

Приведем значения описанных параметров, рассчитанные для 10 зон города Перми (табл. 3.5, 3.6). Расчет проводился для реальной нагруженной сети.

Оригинальность дифференцированного подхода к оценке качества функционирования транспортных систем городов заключается в том, что производится разделение корреспонденций по типам. Для каждой территории рассчитывается транспортная обеспеченность территории, транспортная обеспеченность доступа к территории и транспортная обеспеченность транзита через территорию. В результате каких-либо изменений в транспортном предложении или в транспортном спросе будет возможность оценить, как повлияли изменения на ту или иную территорию.

Имея дифференцированные показатели качества функционирования транспортной системы, можно сформулировать и интегральный показатель качества транспортной системы на отдельной  $i$ -й территории. Это будет некоторая линейная функция от дифференцированных параметров TOT, TOD и TOTR:

$$\text{ТИ}_{cpi} = f(\text{TOT}, \text{TOD}, \text{TOTR}). \quad (3.23)$$

Ввиду того, что для каждого человека важно именно то, какие по типу корреспонденции совершаются внутри территории его проживания, необходимо ввести коэффициенты, которые будут учитывать предпочтения людей. Такими коэффициентами являются  $\beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{CD}$ . Для каждого человека тип корреспонденции играет одинаковую роль, независимо от зоны, в которой он живет. В связи с этим значения коэффициентов  $\beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{CD}$  для разных территорий будут одинаковыми. Тогда:

$$\text{ТИ}_{cpi} = \beta_{AB} \text{TOTR}_i + \beta_{BC} \text{TOD}_i + \beta_{CD} \text{TOT}_i, \quad (3.24)$$

где  $\text{ТИ}_{cpi}$  – интегральный показатель качества транспортной системы на отдельной  $i$ -ой территории;  $\beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{CD}$  – весовые коэффициенты дифференциальных показателей качества транспортной системы TOTR, TOD и TOT.

При учете весовых коэффициентов со следующими значениями  $\beta_{AB} = 0, \beta_{BC} = 0,3, \beta_{CD} = 0,7$  для каждой зоны получим значения показателей  $\text{ТИ}_{cpi}$ .

Так как среднее время корреспонденции в зоне зависит от протяженности УДС внутри территории, необходимо учесть протяженность УДС при расчете параметра интегральной транспортной обеспеченности для всего города. Для этого введем весовые коэффициенты  $\alpha_1, \dots, \alpha_{10}$  (табл. 3.7). Тогда среднее интегральное время реализации транспортных корреспонденций с учетом коэффициентов для территорий будет рассчитываться как

$$\text{ТИ}_{cp} = \alpha_1 \text{ТИ}_{cpi} + \alpha_2 \text{ТИ}_{cp2} + \dots + \alpha_{10} \text{ТИ}_{cp10}, \quad (3.25)$$

где  $\text{ТИ}_{cp}$  – среднее интегральное время реализации транспортных корреспонденций для города;  $\text{ТИ}_{cpi}$  – среднее интегральное время реализации транспортных корреспонденций для  $i$ -ой зоны;  $\alpha_1, \dots, \alpha_{10}$  – весовые коэффициенты, рассчитываемые следующим образом:

Таблица 3.7

**Среднее интегральное время реализации транспортных корреспонденций  
с учетом весовых коэффициентов**

Номер зоны	Значение весового коэффициента $\alpha_i$	ТИ <sub>срi</sub> , мин.
1	0,151399	0,236
2	0,239446	0,743
3	0,063588	0,257
4	0,134986	0,343
5	0,075356	0,485
6	0,113541	0,356
7	0,114673	0,477
9	0,041136	0,271
10	0,064528	0,228

$$\alpha_i = \frac{S_i}{\sum_{j=1}^{10} S_j}, \quad (3.26)$$

где  $S_i$  – площадь УДС внутри зоны  $i$ .

Для Перми значение параметра интегрального времени реализации транспортных корреспонденций (качества транспортной системы) будет равно:

$$\text{ТИ}_{\text{ср}} = 0,433 \text{ ч} = 25,98 \text{ мин.}$$

Для каждой зоны можно определить дефицит транспортной обеспеченности, сравнивая значения ТИ<sub>срi</sub> для каждой зоны со значением ТИ<sub>ср</sub>. Если разности ТИ<sub>ср</sub> – ТИ<sub>срi</sub> отрицательны, можно говорить о дефиците транспортной обеспеченности для исследуемой зоны, так как затраты на совершение в ней корреспонденций превышают средние по городу. Для Перми дефицит транспортной обеспеченности прослеживается для зон 2, 5 и 7.

### 3.2.4. Показатели качества транспортного планирования и методы их оценки

Оценке показателей качества жизни людей на урбанизированной территории, в первую очередь в крупных и крупнейших городах, по-

священо много исследований. Создание качественной городской среды связано с совершенствованием транспортных и природно-технических систем [13] в части повышения регенерационного и рекреационного потенциала компонент природной и социальной среды на городской территории с высокой плотностью населения. Очевиден тот факт, что технологии регенерации компонентов среды отстают от темпов роста техногенной нагрузки на нее. Наиболее ярко это проявляется в современных тенденциях развития городов.

Кроме того, эволюционное совершенствование технических компонент природно-технических систем городов само по себе ограничено ресурсными рамками, прежде всего площадью территории. В связи с этим представляет интерес рассмотрение проблем качества жизни в городах в контексте ресурсных ограничений, накладываемых на развитие и функционирование городских природно-технических систем.

Одним из важнейших компонентов качества жизни в современном мегаполисе является возможность удовлетворения транспортных потребностей его жителей. Эффективность использования ресурсов с целью удовлетворения спроса на транспортную подвижность в первую очередь связана с эффективностью использования городского пространства и обеспечения пропускных и провозных возможностей действующей улично-дорожной сети.

Методика оценки эффективности реализации транспортного спроса на урбанизированной территории основывается на сопоставлении моделей функционирования на ней различных типов сетей с неизменным транспортным спросом.

Моделирование распределения движения транспорта по территории города проводится последовательно для трех видов состояния транспортной сети:

– *идеальная сеть* – воздушные линии, соединяющие центры транспортных районов;

– *свободная сеть* – реальная действующая УДС города, каждый элемент которой обладает бесконечной пропускной и провозной способностью. При таких допущениях определяющей характеристикой транспортного предложения является только геометрия моделируемой сети;

– *нагруженная сеть* – реальная действующая УДС города, каждый элемент которой обладает конечной пропускной способностью и определяется с эксплуатационными показателями, выведенными в литературных источниках [133, 134].

Проведение последовательного анализа функционирования действующей УДС города позволяет оценить в итоговой целевой функции вклад мероприятий транспортного планирования и организации дорожного движения отдельно.

Рассмотрим подходы к моделированию каждого из описанных выше видов состояния сети на примере Перми. Для каждого транспортного района задано количество корреспонденций, совершаемых из района  $i$  в район  $j$  на индивидуальном транспорте (ИТ)  $k_{ijИТ}$  и на общественном (ОТ)  $k_{ijОТ}$ .

Элемент матрицы  $k_{ijИТ}$  измеряется в корреспонденциях индивидуальных автомобилей (авт./сутки). Значения  $k_{ijИТ}$  получают путем деления соответствующих элементов матрицы корреспонденций ИТ, измеряемых в корреспонденциях людей, на среднюю наполненность автомобиля (для Перми в течение дня 1,45 чел./авт.). Количество корреспонденций на ОТ –  $k_{ijОТ}$  измеряется в корреспонденциях людей (людей/сутки).

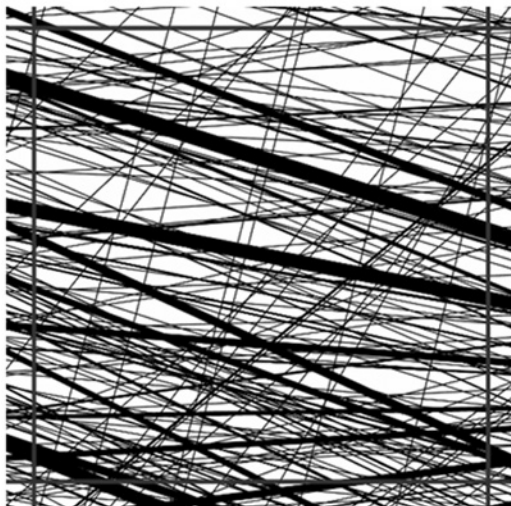
По данным за 2010 г., каждый житель Перми, использующий автомобиль, совершает в среднем 5,03 корреспонденции в сутки, в то время как каждый житель, пользующийся ОТ, – 2,14 корреспонденции в сутки.

Рассмотрим графическое представление транспортного спроса на рис. 3.29 в виде паука корреспонденций. Центры транспортных районов соединены отрезками: толщина отрезка пропорциональна количеству корреспонденций, совершаемых из района в район.

Используя предложенное в главе 2 разбиение территории города с шагом 500 м на исследуемые области (ячейки), можно определить транспортную зави-

симость  $J_{kl}$  для каждой ячейки регулярной сетки. Термин «транспортная зависимость территории» будем использовать только для идеальной сети. Для свободной и нагруженной сети его эквивалентом будет «транспортное движение на территории», так в рассматриваемых сетях учитывается реальная действующая УДС города.

Транспортное движение на территории – это объем перемещения пас-



**Рис. 3.29.** Фрагмент паука корреспонденций на элементарной площадке в сетке разбиения территории города

сажиров (грузов) по данной территории (чел. · км) в течение дня при реализации существующего транспортного спроса в реальной транспортной сети.

Для того чтобы в дальнейшем иметь возможность сравнивать работу идеальной, свободной и загруженной сети, выделим из общего объема транспортного движения на территории две составляющие:

транспортное движение для индивидуального транспорта  $J_{ИТкS}$  и транспортное движение для общественного транспорта  $J_{ОТкS}$ . С учетом средней загруженности индивидуального автомобиля в течение суток в последующем перейдем к значениям транспортного движения по каждой территории. Таким образом,  $J_{ИТкS}$  будет измеряться в авт. · км,  $J_{ОТкS}$  – в чел. · км.

На рис. 3.29 приведен фрагмент паука корреспонденций в регулярной сетке. Корреспонденции индивидуальных автомобилей отображены в виде отрезков различной толщины. Для идеальной сети при нахождении транспортной зависимости территории необходимо найти длину отрезка, попадающего в зону исследования, и умножить ее на количество корреспонденций, совершаемых по этому отрезку.

Для каждой ячейки регулярной сетки были рассчитаны итоговые параметры: транспортная зависимость на территории для индивидуального транспорта  $J_{ИТк}$  и транспортная зависимость территории для общественного транспорта  $J_{ОТк}$  следующим образом.

Для каждого отрезка, соединяющего центры транспортных районов  $I$  и  $J$ , проверяется принадлежность его части исследуемой ячейке.

Если часть отрезка принадлежит ячейке, то рассчитывается длина  $l_{ijk}$ .

Тогда показатели транспортной зависимости для индивидуального и для общественного транспорта в  $k$ -ой ячейке  $J_{ИТк}$  и  $J_{ОТк}$  находятся из соотношений:

$$J_{ИТк} = \sum_i \sum_j l_{ijk} \cdot k_{ijИТ}, \quad (3.27)$$

где  $J_{ИТк}$  – транспортная зависимость индивидуального транспорта в  $k$ -й ячейке идеальной сети;  $l_{ijk}$  – длина части отрезка, соединяющего  $i$ -й и  $j$ -й районы, лежащей в  $k$ -й ячейке идеальной сети;  $k_{ijИТ}$  – количество корреспонденций на индивидуальном транспорте из района  $i$  в район  $j$ .



$$J_{OTk} = \sum_i \sum_j l_{ijk} \cdot k_{ijOT}, \quad (3.28)$$

где  $J_{OTk}$  – транспортная зависимость общественного транспорта в  $k$ -й ячейке идеальной сети;  $l_{ijk}$  – длина части отрезка, соединяющего  $i$ -й и  $j$ -й районы, лежащей в  $k$ -й ячейке идеальной сети;  $k_{ijOT}$  – количество корреспонденций на общественном транспорте из района  $i$  в район  $j$ .

Результат распределения транспортной зависимости для индивидуального транспорта на идеальной сети приведен на рис. 3.30 (см. цветную вклейку).

На рис. 3.30 видно, что наибольшая транспортная зависимость наблюдается в центральной части города, так как именно она является целью значительной доли транспортных корреспонденций. Кроме того, через нее проходит большая доля транзитно-транспортных корреспонденций.

Территорию города можно условно разделить на 4 зоны в зависимости от величины транспортного движения, приходящегося на каждую ячейку регулярной сетки:

- центральная зона (15001–20000 авт. · км/сутки);
- прилегающие к центру зоны (6001–15000 авт. · км/сутки);
- удаленные зоны (автономные территории) (1001–6000 авт. · км/сутки);
- периферийные зоны (автомагистралы, являющиеся продолжением внешних дорог) (0–1000 авт. · км/сутки).

Каждая из зон характеризуется соответствующей плотностью улично-дорожной сети.

Для перехода к анализу существующего транспортного предложения оценим распределение транспортного движения на свободной сети города. Для анализа свободной сети в транспортной модели вместо отрезков паука корреспонденций используется существующая в городе улично-дорожная сеть. Объем транспортных корреспонденций

из района  $i$  в район  $j$  обозначим  $k_{ij}$ . Распределение корреспонденций на свободной сети осуществляется по существующей УДС по кратчайшему расстоянию. Пример участка УДС в выбранной ячейке изображен на рис. 3.31.

Расчет автомобиле-километров в сутки в каждой ячейке регулярной сетки проводят следующим образом. Улично-дорожная сеть задается ломаными линиями с координатами начала, конца и промежуточных точек. Для каждой ячейки рассчитывают длины участков УДС, которые принадлежат (хотя бы частично) рассматриваемой ячейке.



**Рис. 3.31.** Фрагмент участка УДС и сетки разбивки.  
Плотность УДС в ячейке 2,459 км/км<sup>2</sup>

Рассчитанную длину  $i$ -го участка сети в  $k$ -й ячейке обозначим  $l_{ik}$ . Распределение транспортного спроса в свободной сети создает нагрузку на УДС в виде интенсивностей  $q_{ИТСi}$ . Тогда объем транспортного движения для ИТ в свободной сети для  $k$ -й ячейки обозначается  $J_{ИТкS}$  и рассчитывается из соотношения:

$$J_{ИТкS} = \sum_i l_{ik} \cdot q_{ИТСi}, \quad (3.29)$$

где  $J_{ИТкS}$  – объем транспортного движения для ИТ в свободной сети для  $k$ -й ячейки;  $l_{ik}$  – длина  $i$ -го участка сети в  $k$ -й ячейке;  $q_{ИТСi}$  – интенсивность ИТ на  $i$ -м участке УДС свободной сети.

Аналогично транспортное движение рассчитывается для общественного транспорта  $J_{ОТкS}$ . Распределение пассажиропотоков по маршрутной сети выражается в виде интенсивности пассажиропотока на УДС  $q_{ОТСi}$ .

$$J_{ОТкS} = \sum_i l_{ik} \cdot q_{ОТСi}, \quad (3.30)$$

где  $J_{OTks}$  – объем транспортного движения для ОТ в свободной сети для  $k$ -й ячейки;  $L_{ik}$  – длина  $i$ -го участка сети в  $k$ -й ячейке;  $q_{OTSi}$  – интенсивность пассажиропотока на  $i$ -м участке УДС свободной сети.

Результат распределения транспортного движения на индивидуальном транспорте в свободной сети приведен на рис. 3.32 (см. цветную вклейку).

Рисунок 3.32 позволяет сделать вывод о том, что нельзя выделить характерные территориальные зоны в зависимости от величины транспортного движения (в отличие от идеальной сети). Однако при сопоставлении картограмм для идеальной и свободной сети можно произвести графический анализ качественного соответствия конфигурации реальной УДС ее идеальному прототипу. Для Перми, например, такое сопоставление указывает на качественное соответствие распределения потенциального транспортного спроса и конфигурации действующей УДС. Кроме того, на картограмме можно выделить отдельные элементы сети, объем движения на которых предполагает наличие максимального транспортного предложения (площади проезжих частей УДС).

Для оценки качества транспортного планирования необходимо произвести сравнение объемов транспортного движения для идеальной и свободной сети. Для каждой области исследования были получены значения транспортной зависимости для ИТ и ОТ (для идеальной сети) и объемы транспортного движения для ИТ и ОТ (для свободной сети). Для идеальной сети полученные значения транспортной зависимости обозначим для индивидуального транспорта  $J_{ИТki}$  и для общественного транспорта  $J_{ОТki}$ . Для свободной сети полученные значения обозначим для транспортного движения индивидуального транспорта  $J_{ИТks}$  и общественного транспорта  $J_{ОТks}$ .

Оценку качества транспортного планирования на территории предлагается проводить на основе оценки взаимосвязи двух ключевых показателей: транспортной зависимости и транспортного движения. Чем сильнее связь этих двух показателей на исследуемой территории, тем ближе к идеальной по своему функциональному назначению находится реальная улично-дорожная сеть города, следовательно, тем выше качество транспортного планирования в городе. Итоговую оценку его качества будем проводить с помощью коэффициента корреляции, который будет оценивать силу связи между указанными параметрами. При расчете коэффициента корреляции используем данные, полученные различными способами, с учетом каждой исследуемой области.

Коэффициент корреляции полученных данных для индивидуального транспорта будет рассчитываться из соотношения:

$$k_{ИТ} = \frac{\sum_k (J_{ИТк1} - \overline{J_{ИТ1}})(J_{ИТкS} - \overline{J_{ИТS}})}{\sqrt{\sum_k (J_{ИТк1} - \overline{J_{ИТ1}})^2 \sum_k (J_{ИТкS} - \overline{J_{ИТS}})^2}}, \quad (3.31)$$

где  $k_{ИТ}$  – коэффициент корреляции транспортной зависимости и транспортного движения для ИТ;

$\overline{J_{ИТ1}} = \frac{\sum J_{ИТк1}}{N}$  – среднее значение транспортной зависимости в отдельной области для идеальной сети, авт. · км;

$\overline{J_{ИТS}} = \frac{\sum J_{ИТкS}}{N}$  – среднее значение транспортного движения в отдельной области для свободной сети, авт. · км;  $N$  – количество областей исследования.

Коэффициент корреляции полученных данных для общественного транспорта рассчитывают из соотношения:

$$k_{ОТ} = \frac{\sum_k (J_{ОТк1} - \overline{J_{ОТ1}})(J_{ОТкS} - \overline{J_{ОТS}})}{\sqrt{\sum_k (J_{ОТк1} - \overline{J_{ОТ1}})^2 \sum_k (J_{ОТкS} - \overline{J_{ОТS}})^2}}, \quad (3.32)$$

где  $k_{ОТ}$  – коэффициент корреляции транспортной зависимости и транспортного движения для ОТ;

$\overline{J_{ОТ1}} = \frac{\sum J_{ОТк1}}{N}$  – среднее значение транспортной зависимости в отдельной области для идеальной сети, чел. · км;

$\overline{J_{ОТS}} = \frac{\sum J_{ОТкS}}{N}$  – среднее значение транспортного движения в отдельной области для свободной сети, чел. · км;  $N$  – количество областей исследования.

С помощью коэффициента корреляции можно оценить качество транспортного планирования на всей территории города. Чем ближе

значение коэффициента корреляции к единице, тем лучше качество транспортного планирования, так как в этом случае совпадает относительное распределение транспортной зависимости и транспортного движения по территории города.

Для города Перми получено значение коэффициента корреляции транспортного движения для оценки транспортного планирования для ИТ  $k_{ИТ} = 0,558971$ , для ОТ  $k_{ОТ} = 0,616194$ . Можно отметить, что недостаточно сильная связь между рассматриваемыми показателями (при полученных коэффициентах корреляции меньше 0,75) свидетельствует о низком качестве транспортного планирования в Перми.

Прежде всего это объясняется историческими факторами развития городов, когда происходят процессы изменения их границ. Особенно сильными эти процессы в России были в середине XX в. Преследуя политические цели, искусственные процессы формирования новых городов на основе слияния отдельных разрозненных поселений порождали негативные тенденции в развитии и функционировании транспортных систем таких новообразований, результаты которых жители многих российских городов (в том числе Перми) ощущают и поныне.

### 3.2.5. Показатели качества организации дорожного движения в городах и методы их оценки

Транспортное движение в свободной сети дает возможность оценить потребность жителей в перемещениях, но не оценивает при этом возможности существующей УДС. Транспортное движение в нагруженной сети позволяет оценить существующий объем транспортного движения с учетом транспортных задержек и пропускной способности участков существующей УДС. Сравнение объемов транспортного движения для свободной и нагруженной сети позволит дать оценку показателя качества организации дорожного движения.

Необходимо сравнить потребности жителей, представленные в виде транспортного движения в свободной сети, с тем предложением, которое сформировано в настоящий момент, то есть транспортным движением в нагруженной сети. Расчет параметров транспортного движения для индивидуального транспорта  $J_{ИТКС}$  и для общественного транспорта  $J_{ОТКС}$  в свободной сети для каждой области исследования был представлен в п. 3.2.3. Рассмотрим более подробно алгоритм получения параметров транспортного движения для ИТ и ОТ в нагруженной сети.

Для нагруженной сети распределение транспортного движения проводится аналогично распределению свободной сети. Отличие процедуры расчета заключается в том, что при построении распределения транспортного спроса в нагруженной сети учитывают сопротивление

каждого элемента сети. При этом рассчитывают задержки транспортного потока на перекрестках и перегонах в соответствии с функциями сопротивления каждого элемента сети. Алгоритм расчета перераспределения потоков с учетом сопротивления элементов сети подробно изложен в п. 3.1. Таким образом, нагрузки на улично-дорожную сеть рассчитывают с учетом реализации транспортных корреспонденций за минимально возможное время.

Параметры транспортного движения для индивидуального транспорта  $J_{ITkN}$  рассчитывают из соотношения:

$$J_{ITkN} = \sum_i l_{ik} \cdot q_{ITNi}, \quad (3.33)$$

где  $J_{ITkN}$  – объем движения для индивидуального транспорта в  $k$ -й ячейке нагруженной сети;  $q_{ITNi}$  – интенсивности движения индивидуального транспорта, полученные в результате распределения корреспонденций на сети с учетом сопротивлений в узлах и перегонах (наблюдаемые интенсивности движения);  $l_{ki}$  – длина  $i$ -го участка сети в  $k$ -й ячейке (рис. 3.33).

Для общественного транспорта нецелесообразно разделять понятия свободной и нагруженной сети, так как движение осуществляется по единой маршрутной транспортной сети в соответствии



Рис. 3.33. Параметры для расчета объема движения для индивидуального транспорта в  $k$ -й ячейке нагруженной сети

с расписанием. В связи с этим параметры движения общественного транспорта для свободной и нагруженной сети совпадают, и дополнительная оценка данного параметра для общественного транспорта не производится.

Организация движения общественного транспорта является принципиально иной задачей, отличной от организации движения индивидуального транспорта. Она сводится к формированию эффективной маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования и оптимального, с точки зрения транспортных потребностей, расписания движения подвижного состава.

Оценку качества организации дорожного движения будем проводить с помощью коэффициента корреляции данных, полученных различными способами, с учетом каждой исследуемой области для свободной и нагруженной сети.

Коэффициент корреляции полученных данных для транспортного движения будем рассчитывать из соотношения:

$$k_{ИТ} = \frac{\sum_k (J_{ИТкN} - \overline{J_{ИТN}})(J_{ИТкS} - \overline{J_{ИТS}})}{\sqrt{\sum_k (J_{ИТкN} - \overline{J_{ИТN}})^2 \sum_k (J_{ИТкS} - \overline{J_{ИТS}})^2}}, \quad (3.34)$$

где  $k_{ИТ}$  – коэффициент корреляции транспортного движения для ИТ;

$$\overline{J_{ИТN}} = \frac{\sum_k J_{ИТкN}}{N} - \text{среднее значение транспортного движения в отдельной области для нагруженной сети;}$$

$$\overline{J_{ИТS}} = \frac{\sum_k J_{ИТкS}}{N} - \text{среднее значение транспортного движения в отдельной области для свободной сети; } N - \text{ количество областей исследования; } k_{ИТ} - \text{ обобщенная оценка организации дорожного движения индивидуального транспорта на всей территории города.}$$

Для города Перми получено значение коэффициента корреляции транспортного движения для оценки организации движения для ИТ  $k_{ИТ} = 0,971461$ .

Полученная оценка корреляционной зависимости говорит о хорошей связи объемов транспортного движения на исследуемой территории в свободной и нагруженной сетях. Это, в свою очередь, свиде-

тельствует о высоком качестве организации дорожного движения на действующей улично-дорожной сети города.

Для оценки качества организации дорожного движения на отдельных локальных участках сети необходимо построить картограмму разности интенсивностей движения индивидуального транспорта для свободной и нагруженной сети.

Результат распределения транспортного движения в нагруженной сети приведен на рис. 3.34 (см. цветную вклейку), где дана картограмма разности прогнозных суточных интенсивностей движения транспорта в свободной и нагруженной УДС, то есть отображены участки УДС, которые в свободной сети являются перегруженными. По представленной картограмме можно проследить, как перераспределяется нагрузка с наиболее нагруженных участков УДС на участки – дублиеры основных направлений.

Картограмма дает представление о качестве организации дорожного движения на действующей УДС города, хотя по ней нельзя судить о ее основных преимуществах и недостатках. Географически не представляется возможным как-либо классифицировать элементы действующей сети с точки зрения изменения нагрузки на них при переходе от свободной к загруженной сети. Смысл данной картограммы заключается в рассмотрении каждого отдельного (а не группы) элемента УДС с точки зрения определения его возможных резервов в процессе перераспределения транспортных потоков по всей городской УДС.

Дальнейшая оценка эффективности реализации транспортного спроса на городской территории сводится к различным формам сопоставления полученных модельных перераспределений транспортных потоков для трех видов состояния сети. Парное сопоставление параметров использования городских территорий в целях удовлетворения транспортных потребностей населения позволяет оценить качество решения или планировочных задач, или вопросов организации дорожного движения на действующей сети. Еще одним инструментом оценки, имеющим самостоятельное прикладное значение, являются процедуры контроля доступа транспорта к отдельным городским территориям.

На примере центрально-планировочного района (ЦПР) города Перми можно провести анализ транспортной зависимости территории, дать количественную оценку распределению по типам движения, а также проанализировать различные мероприятия и управленческие решения, касающиеся оценки времени реализации транспортных корреспонденций.

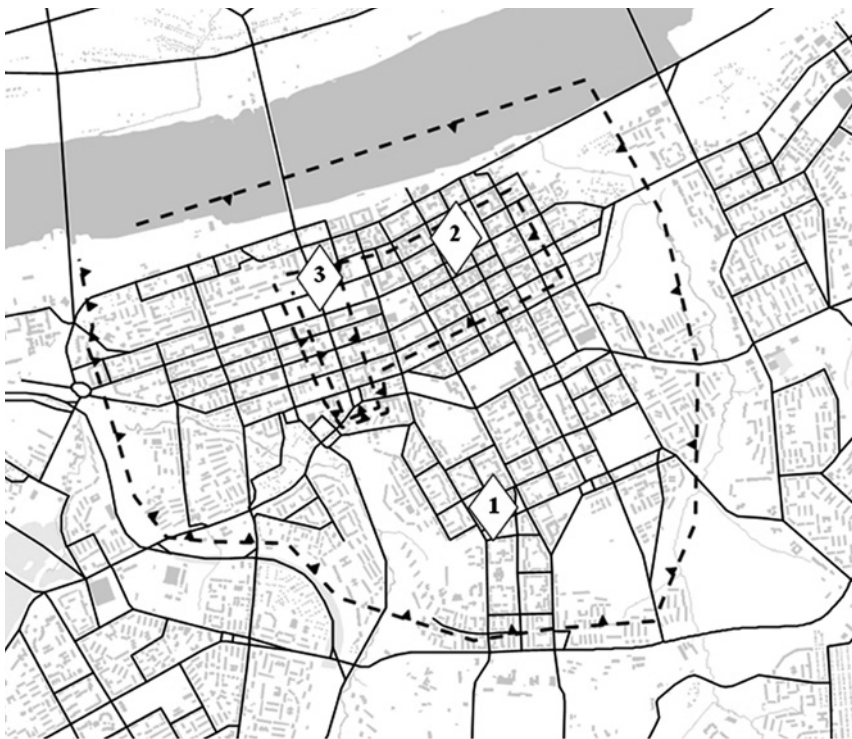
Одним из широко используемых в практике современного градостроительного проектирования критериев оценки качества жизни в городах является контроль доступа к территориям, в частности нахо-



дящимся в центральной части города. Определяющее значение в оценке этого доступа имеет объем транзита через интересующую территорию. Для оценки этого параметра определим количество въезжающих в ЦПР города и выезжающих из него автомобилей и пассажиров ОТ.

Въезжающие и выезжающие потоки были подсчитаны для трех областей. Первая, вторая и третья линии подсчета показаны на рис. 3.35. Пунктирные линии замыкают территории, имеющие особое транспортное значение. Линия 1 ограничивает территорию ЦПР г. Перми. Линия 2 описывает так называемое центральное городское ядро, место сосредоточения культурного и исторического архитектурного наследия, элементы которого не позволяют увеличивать площади территорий общего пользования, задействованных в удовлетворении транспортного движения. Линия 3 определяет зону влияния моста через р. Каму и интересна прежде всего с точки зрения анализа моста как отдельной транспортной связи.

Из зарубежной практики транспортного планирования городов известно, что одним из важных путей развития УДС города является вывод транспортных потоков из центра. Особую роль в этом решении



**Рис. 3.35.** Линии подсчета въезжающих и выезжающих транспортных потоков в центральные районы города

Таблица 3.8

**Интенсивность движения на отдельных городских территориях**

Вид корреспонденций ИТ	Интенсивность, авт./сутки	Доля из общего количества корреспонденций на ИТ, %
Въезжающие в ЦПР	212 000	21
из них: выезжающие (транзит)	18 900	9 <sup>1</sup>
Выезжающие из ЦПР	212 000	21
Не заезжающие в ЦПР	592 000	58
<b>Всего корреспонденций ИТ</b>	<b>1 015 000</b>	<b>100</b>

<sup>1</sup> Доля в общем количестве въезжающих в ЦПР.

играет транзитный транспорт. Был проведен расчет величины транспортного транзита через ЦПР г. Перми, результаты которого представлены в табл. 3.8.

Таким образом, доля транзитного транспорта в общем объеме транспортного движения в зоне ЦПР составляет 9% от общего количества автомобилей, въезжающих в данную область.

Поэтому строительство дорогостоящих дорожных объектов, проходящих в объезд центра города, не является кардинальным способом разгрузки центра от транзитного движения, так как вывод транзита за пределы ЦПР позволит уменьшить интенсивность движения в центре города не более чем на 9%. Однако при анализе изменения среднего времени реализации транспортных корреспонденций становится очевидным позитивное влияние строительства объездных скоростных магистралей на обобщенные показатели качества функционирования сети.

Предложенные выше алгоритмы оценки функционирования транспортной системы города находятся в плоскости, описываемой координатами: транспортный спрос и транспортное предложение. Исследование действующих транспортных систем в такой системе отсчета является первоначальным этапом исследования транспортных систем и предшествует этапам моделирования распределения транспортных потоков и их движения на отдельных участках.

Предложенный подход позволяет на макроскопическом уровне дать численные оценки качества транспортной системы города и определить потенциал развития такой системы на перспективу.

### 3.2.6. Динамический анализ качества транспортных систем

Методики оценки качества транспортных систем, изложенные в пп. 3.2.4 и 3.2.5, основывались на анализе их функционирования в суточном цикле. Используемые при таком анализе показатели транспортной зависимости территории и транспортного движения на территории имели размерность, отнесенную к суткам. Это относилось как к транспортному спросу, так и к транспортному предложению. Особый интерес вызывает задача оценки качества функционирования транспортной системы в течение суток, в часы пик. В течение суток как интенсивность на УДС, так и транспортный спрос изменяет свою величину и направление относительно городской территории и каждого отдельного элемента сети.

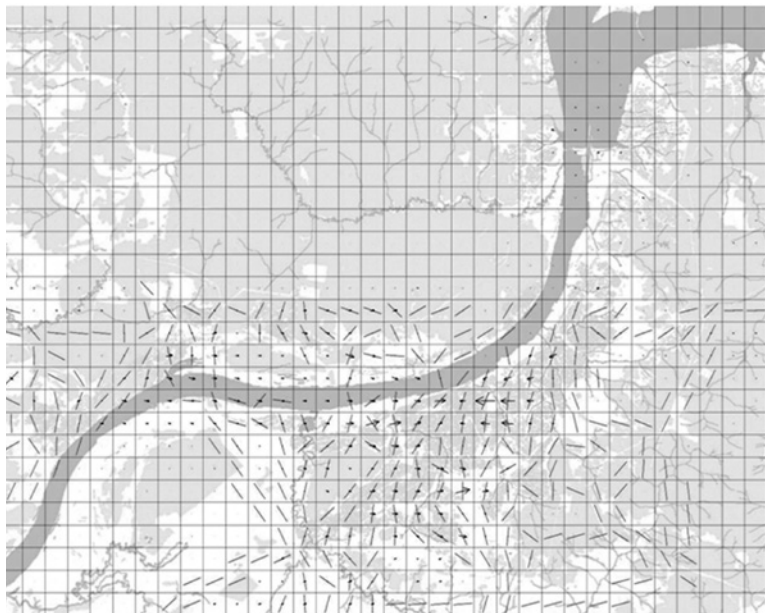
При наличии в распоряжении динамической модели транспортного спроса с детализацией в матрицах затрат и корреспонденций суточных, недельных и сезонных его неравномерностей появляется возможность проведения динамического анализа качества транспортных систем.

На регулярной сетке, кроме скалярных величин потенциалов удельной транспортной зависимости территорий, оценок функционирования идеальной и свободной сети, представляет интерес временной (в течение суток) анализ векторных величин транспортного спроса. Имея в качестве основы параметры транспортного спроса, выраженные не только скалярно, но и векторно, можно (в том числе на последующих этапах) переходить к анализу конфигурации сети на предмет ее пространственной связности, а следовательно, устойчивости.

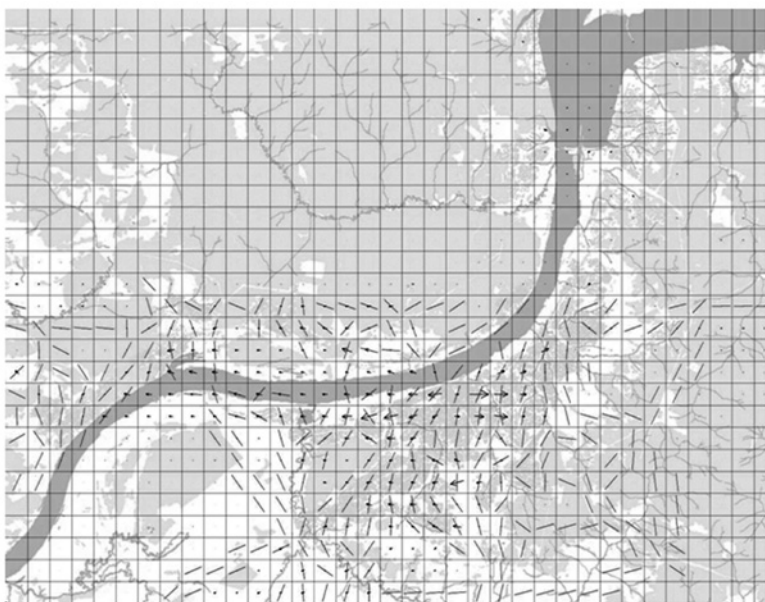
Векторы в ячейках регулярной сетки будут указывать не только объем суммарного движения моторизованного транспорта через территорию, ограниченную данной ячейкой, но и направление его движения. При этом для создания реальной картины направлений потоков необходимо будет решать задачу на часовых (а не на суточных) матрицах корреспонденций.

На рис. 3.36 и 3.37 для примера решена задача построения векторных полей пиковых утренних и вечерних нагрузок на городскую территорию, разделенную регулярной сеткой. Длина вектора будет указывать объем потока моторизованного транспорта в утренний или вечерний час пик. По такому же принципу строятся поля для межпиковых интервалов загрузки улично-дорожной сети города. Для Перми удалось получить два векторных поля, реализующих утренний и вечерний пики. На рис. 3.36 и 3.37 линиями отмечены также главные направления действующей УДС города.

Главные направления действующей УДС построены по тому же принципу, что векторы пиковых нагрузок. При их построении на тер-



**Рис. 3.36.** Векторное поле транспортного спроса в утренний час пик, Пермь



**Рис. 3.37.** Векторное поле транспортного спроса в вечерний час пик, Пермь

ритории, ограниченной линиями регулярной сетки, были учтены все отрезки действующей нагруженной сети с учетом их длин и количества полос движения.

Представленные векторные поля иллюстрируют существенную неравномерность распределения транспортной нагрузки на элементы городской территории не только в объемах, но и по направлению. В течение суток векторы направления транспортного спроса на территорию изменяются существенным образом, при этом следует понимать, что конфигурация УДС города не обладает способностью к аналогичному изменению.

Инструментом частичного варьирования положения главного направления сети на отдельных территориях может быть введение реверсивного движения на отдельных полосах и отдельных элементах УДС города. Целесообразность введения полос реверсивного движения может быть обоснована изложенным выше анализом при сопоставлении конфигурации сети, ее пропускной способности и вектора транспортной потребности.

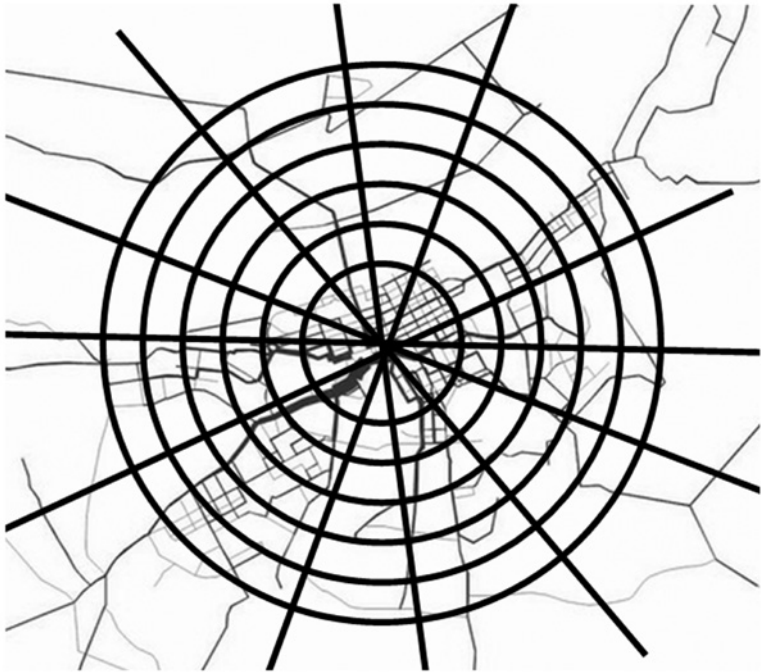
Для дальнейшего совместного анализа транспортного спроса и транспортного предложения необходимо последовательно решать задачи векторного анализа разности полей транспортного спроса и их реализации на существующем транспортном предложении последовательно на идеальной, свободной и загруженной сети. Из этого совместного анализа можно получать характеристики, по смыслу являющиеся некими коэффициентами полезного действия всей транспортной системы крупного города.

### **3.2.7. Пространственный анализ функционирования транспортных систем с учетом энергетических ограничений**

Предлагаем рассмотреть всю исследуемую область (территорию города) в виде упорядоченного набора элементов, основным атрибутом которых будет показатель удаленности от центра города. При таком подходе появляется возможность графической интерпретации возможности транспортной системы удовлетворять имеющийся на территории города транспортный спрос. Проведем анализ возможных способов удовлетворения транспортного спроса на основе транспортной зависимости территорий с учетом имеющихся территориальных ограничений.

Для простоты будем рассматривать три способа перемещения по исследуемой области:

- 1-й способ – пешком;
- 2-й способ – на общественном транспорте;
- 3-й способ – на индивидуальном транспорте.



**Рис. 3.38.** Регулярное деление территории города сеткой в полярных координатах

Рассмотрим регулярное деление территории города сеткой в полярных координатах, центр которого находится в точке пересечения осей эллипса, построенного в главе 2 (рис. 3.38).

Очевидно, что для большинства городов территории, отстоящие на малое расстояние от геометрического (или средневзвешенного по плотности какой-либо городской структуры) центра, будут иметь большие показатели удельной транспортной зависимости. И чем дальше от этого центра по радиусу, тем меньше значения удельной транспортной зависимости.

По своему виду кривая, ограничивающая удельную транспортную зависимость, при разных значениях радиуса от центра имеет гиперболический вид, представленный на диаграмме (рис. 3.39). Для простоты представим ее как огибающую показателей транспортной зависимости территорий по зонам, расположенным вдоль радиуса от центра к периферии города. Понятно, что реализовать весь транспортный спрос на транспортно-зависимых территориях не удастся в силу территориальных, временных и экологических ограничений.

Важнейшим ограничивающим условием транспортного движения в городе является экологическая составляющая. Чем больше перемещений совершается в исследуемой области, тем менее энергозатрат-

ный вид транспорта необходимо выбирать при совершении корреспонденций. Для каждой области исследования вводится параметр предельного количества энергии, затрачиваемого всеми транспортными средствами за сутки в области исследования  $r$  (Дж).

Для простоты в качестве меры техногенного воздействия на исследуемую территорию будем рассматривать суммарный объем энергии, затрачиваемый транспортным потоком на реализацию транспортных корреспонденций людей. В силу несовершенства преобразований энергии в любом двигателе любого транспортного средства объем негативного воздействия на окружающую среду будет пропорционален объему затрачиваемой энергии на реализацию транспортных корреспонденций внутри исследуемой зоны.

Очевидно также, что возможности различных территорий эффективно утилизировать негативные последствия преобразования энергии, используемой транспортной системой, также различны. Кроме собственного восстановительного потенциала отдельной территории (площади озеленения, водных поверхностей и т.п.), немаловажное значение в этом показателе имеют аналогичные показатели соседних с этой территорией областей. Территории, находящиеся на границе города и имеющие общую границу, например, с загородными лесными массивами, имеют восстановительный потенциал, значительно больший, чем территории центральных районов города, также окруженные территориями с плотной застройкой и развитой транспортной инфраструктурой.

Исходя из этого построим некую кривую, иллюстрирующую предельный объем энергии, допустимой к преобразованию, на территориях по условиям экологической безопасности. Кривая будет показывать функциональную зависимость этого предельного объема в зависимости от радиуса (удаленности от центра города).

Вид такой функции представлен на диаграмме (рис. 3.39) в четвертом координатном угле. Возрастание этой функции от центра к периферии обусловлено возрастающим потенциалом восстановительных функций городской среды от центра города к его окраине.

Из дальнейшего построения, представленного на рис. 3.39, нетрудно заметить, что для разных городских зон, в зависимости от удаления от городского центра, будут иметь место различные усредненные предельные затраты энергии на перемещения одного человека по данной территории, определяемые углом наклона радиуса вектора к точке пересечения значений транспортной зависимости территории, и значения предельного объема затраченной энергии, которые эта территория способна восстанавливать.

Графическое представление построения таких углов дано в третьем координатном угле диаграммы на рис. 3.39.

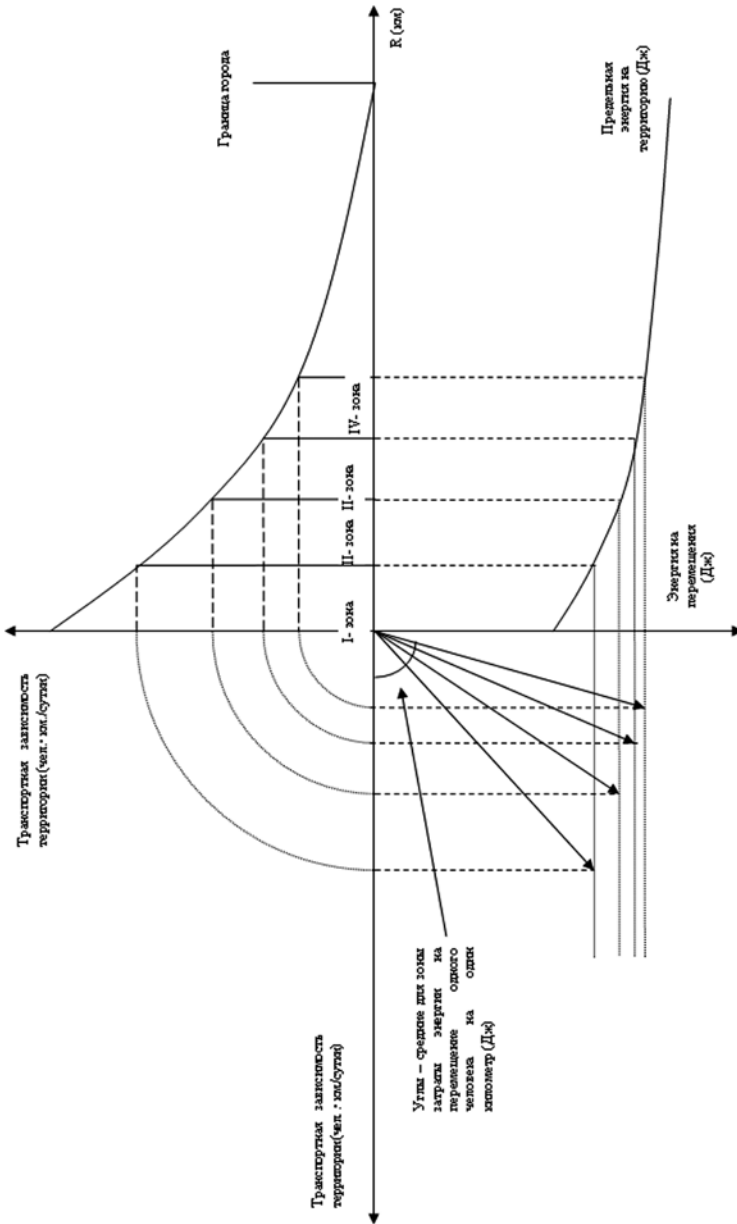


Рис. 3.39. Диаграмма предельного транспортного спроса



Переходя к анализу имеющегося в городе транспортного предложения, можно вполне четко разделить весь необходимый объем транспортного спроса через территорию в каждой зоне по способам его реализации, в частности по группам транспорта (рис. 3.40).

Из представленного графического анализа понятно, что при соблюдении предельных энергетических ограничений на каждой транспортно-зависимой городской территории будет наблюдаться большая доля перемещений пешком и далее на общественном транспорте при существенно меньших затратах энергии на перевозку одного человека.

В итоге для каждой городской зоны можно построить теоретический баланс задействования различных способов перемещения и типов систем транспорта при сохранении предельного уровня воздействия на окружающую среду. Предлагаемый подход можно также использовать при детальном рассмотрении различных типов транспортных средств, участвующих в городском движении.

Точно по такому же алгоритму следует рассматривать пространственные ограничения территории при реализации перемещений различными способами, которые связаны с разными затратами при реализации перемещений (пешком, на ОТ и ИТ). В этом случае предельным ограничением будет имеющаяся площадь улично-дорожной сети на исследуемой территории, определяемая так называемым динамическим коридором различных типов транспортных средств и основной диаграммой транспортного потока.

Тот же подход можно распространить и на оценку ограничений, связанных с предельным уровнем риска дорожно-транспортных происшествий (ДТП) при реализации транспортных перемещений через территорию. Риск ДТП будет также неодинаковым в пересчете на одного перемещенного человека для разных зон в зависимости от способов передвижения на различных видах транспорта и их взаимного баланса.

При рассмотрении отдельной территории можно также поставить задачу преимущественного «назначения» видов и способов передвижения людей на различных видах транспорта, основываясь на параметрах модели транспортного спроса. Для этого требуется совместный анализ видов и доли объемов корреспонденций по исследуемой территории с полученными параметрами их распределения по видам транспорта.

Такой подход дает возможность постановки оптимизационной задачи, где будет присутствовать и целевая функция, и система «верхних» и «нижних» ограничений. При этом задача оптимизации транспортной системы будет решаться на основе макроуровневых (территориальных) ограничений и посредством воздействий на территорию. Целевой функцией будут выступать *затраты на реализацию всех транс-*



портных корреспонденций всеми участниками дорожного движения и всеми видами транспорта на всей исследуемой территории.

### Выводы

Для реализации поставленной цели – повышения эффективности транспортной системы крупного города – необходим целый набор методов, позволяющих строить математические модели ее функционирования и на их основе давать доказательное обоснование выбранным инструментам.

Немногочисленные исследователи в области транспортного моделирования по-разному представляют себе назначение, состав и детализацию прогнозных транспортных моделей и, как следствие, лишены возможности достоверно оценивать их адекватность и точность.

Накопленный опыт разработки и последующей актуализации моделей позволил сформировать стройную и последовательную стратегию их создания, которая является самостоятельной научной ценностью. Предложенная в этой главе технология построения четырехшаговых прогнозных транспортных моделей будет использована как основа постановки ограничений и целевой функции при создании математической модели оптимизационной задачи построения эффективной транспортной системы крупного города. Предложена структурная схема решения задачи, связывающая шаги алгоритма создания и расчета модели, массивы необходимых исходных данных и набор определяющих соотношений.

Особое внимание в главе уделено калибровке транспортных моделей. Предложенная последовательность шагов калибровки моделей – единственно верная, ее технология опробована и подтверждена практическими исследованиями. Качество полученной в ходе калибровки модели транспортного спроса далее (в главе 4) будет определять качество построения оптимальных моделей формирования эффективной транспортной системы крупного города.

Для анализа распределения найденного транспортного спроса по исследуемой территории предлагается ввести новый показатель – «транспортная зависимость территории». Для оценки качества функционирования транспортной системы города предложен новый многоуровневый подход, а также новое понятие – «транспортная обеспеченность территории». Город должен представлять собой территории (зоны) равной транспортной обеспеченности. Таким образом, цель транспортной политики города – добиваться выравнивания транспортной обеспеченности его территорий. В целях расширения набора показателей оценки качества функционирования транспортной системы города предложено ввести и дополнительные характеристики, определяющие специфику функционирования транспортных систем

отдельных территорий, а также обобщенные интегральные показатели функционирования всей транспортной системы. Все предложенные показатели имеют качественную и количественную оценку, методика получения которых представлена в настоящей главе.

Отдельно предложено оценивать качество принятия управленческих решений и разделить оценки процесса транспортного планирования и организации движения. Расчетным образом полученные оценки управленческих решений в указанных сферах управления для города Перми позволяют использовать представленные алгоритмы в практике выработки и принятия управленческих решений органами муниципального управления других городов.

# Глава 4

## ОПТИМАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ГОРОДА

### 4.1. Математические модели в задачах оптимизации

#### 4.1.1. Транспортные модели различного назначения

Решение задач в области формирования и развития инфраструктуры крупного города может быть получено на основе построения математических моделей транспортных систем городов. Как уже отмечалось, можно выделить три основные группы математических моделей, применяемых для анализа транспортных сетей: прогнозные, имитационные, оптимизационные (оптимальные). Напомним, для чего они предназначены.

Прогнозные модели необходимы для моделирования транспортных потоков в сетях с известной геометрией и характеристиками и при известном транспортном спросе; прогнозирования последствий изменения транспортного спроса и транспортного предложения; расчета усредненных характеристик движения: объемов межрайонных передвижений, интенсивности потока, распределения автомобилей и пассажиров по путям движения и др.

Имитационные модели требуются для воспроизведения всех деталей движения, включая развитие процесса во времени. Объектом исследования при этом является одиночное транспортное средство, а не транспортный поток, а усредненные значения потоков и распределение по путям считаются известными и служат исходными данными. Таким образом, прогноз потоков и имитационное моделирование дополняют друг друга. Имитационные модели позволяют оценить скорости движения, задержки на перекрестках, длины и динамику образования очередей или заторов и другие характеристики движения.

Основная область их применения – совершенствование организации дорожного движения.

Разумеется, области применения прогнозных и имитационных моделей не строго разделены. Рассмотрим, например, задачу согласования светофорного регулирования вдоль крупной улицы. Для решения такой задачи может быть использована имитационная модель.

Однако улучшение условий проезда по данной улице может привести к тому, что большее количество водителей будет выбирать маршруты проезда по ней. Это, в свою очередь, приведет к ослаблению нагрузки на другие улицы и к дальнейшему перераспределению потоков. Таким образом, возникает задача о прогнозе нового распределения потоков по городу.

Прогнозные и имитационные модели ставят своей целью адекватное воспроизведение транспортных потоков. Существует, однако, большое количество задач оптимизации функционирования транспортных сетей, которые решают задачи оптимизации маршрутов пассажирских и грузовых перевозок, выбора оптимального пути и др.

На основе взаимосвязи моделей друг с другом все три класса математических моделей, использующихся при изучении функционирования транспортных систем, можно разделить также по объектам исследований, целям моделирования, входным и выходным данным (табл. 4.1).

Таблица 4.1

**Классификация математических транспортных моделей  
по различным признакам**

Вид моделей	Объект исследования (моделирования)	Цель моделирования	Вход (исходные данные)	Выход (результат моделирования)
Имитационные	Транспортное средство	Оценка проектов	Транспортный поток	Управленческое решение
Прогнозные	Транспортный поток	Оценка сценариев	Сценарии	Транспортный поток
Оптимальные	Транспортная система	Оценка системы	Цель, ограничения	Сценарий

Изложенный в настоящей главе новый подход в исследовании транспортных потоков заключается в приоритетном анализе затрат и эффектов с целью эффективного распределения транспортного спроса по городской территории.

Решение проблемы анализа и развития транспортной системы на основе спроса на передвижение предлагается осуществить с помощью методов математического программирования, в частности, инструментов линейного программирования. Это оптимизационные задачи, и

возникают они там, где есть свобода выбора. В исследовании транспортных потоков свобода выбора присутствует, как и система показателей, характеризующих функционирование транспортной системы; определены критерии оценки УДС и условия (ограничения) в виде спроса на передвижения и физических ограничений улично-дорожной сети, а также экологических и экономических ограничений.

Особое внимание в исследовании транспортной системы города отводится пространственному анализу распределения транспортного спроса по городской территории без учета конкретного транспортного предложения.

Такой подход не укладывается в привычное понятие транспортного моделирования, так как объектом исследования служат не транспортные средства и даже не транспортные потоки, а отдельные участки городской территории. Результатом моделирования будут определенные параметры, накладываемые на территорию, например предельные объемы транспортных корреспонденций, реализуемые тем или иным видом транспорта на исследуемой территории.

Результаты, полученные при расчете моделей, можно будет использовать для принятия управленческих решений по развитию улично-дорожной сети.

Использование такого инструмента исследования, как оптимальные модели, предполагает разработку и построение нескольких моделей с различными критериями и ограничениями, чтобы рассматривать задачу формирования эффективной транспортной системы города с разных позиций.

#### **4.1.2. Объект и предмет оптимизации**

Объектом оптимизации является территория крупного города, а предметом – процессы функционирования на ней транспортной системы. Выделяя в качестве предмета исследования только одну составляющую тех многочисленных процессов, которые происходят в жизни современного города, можно сказать, что в данной работе объектом исследования служит крупный город, а предметом – его транспортная система.

Детализируя, как предложено в предыдущих главах, предмет исследований на составляющие (дорожно-транспортный комплекс, участники дорожного движения, окружающая среда), можно сказать, что в такой трактовке объектом и предметом исследований является транспортная система. Именно окружающая среда (территория города) как часть транспортной системы определяет и объект исследования, и способы взаимодействия оставшихся двух ее составляющих.

С целью обеспечения максимально прикладного характера всем исследованиям в настоящей и предыдущих главах предлагается в каче-

стве объекта воздействия на транспортную систему выбрать входящий в нее дорожно-транспортный комплекс.

Основным допущением в постановке оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города будет неизменность транспортного спроса, которая предполагает неизменность баланса использования территории под объектами различного назначения, собственно, и формирующих этот транспортный спрос. Иными словами, задача будет поставлена и решена при помощи математической модели при неизменном (устоявшемся) на исследуемой территории транспортном спросе. При необходимости исследования поведения транспортной системы города при изменении транспортного спроса возникнет необходимость в постановке, формализации и решении уже иной задачи.

Объектом воздействия при исследовании транспортной системы является улично-дорожная сеть крупного города как самая основная, главная часть всей инфраструктуры, представляющая собой систему улиц и дорог в единой транспортной системе города. Основная задача УДС состоит в эффективном и безопасном удовлетворении спроса ее пользователей, то есть в перемещении заданного объема пассажиро- и грузопотоков, а также в обеспечении комфортного движения пешеходов.

Транспортное планирование и организация дорожного движения базируются на теории транспортных потоков, использовании разнообразного математического инструментария и моделировании УДС. Один из важнейших видов исходных данных для принятия решений в этой сфере – матрица корреспонденций. Значения ее элементов (корреспонденций) представляют собой количество транспортных средств, направляющихся из одного пункта в другой. В качестве пунктов следования можно взять центры транспортных районов. Практически формирование матрицы корреспонденций крупного города – это самостоятельная серьезная задача. Будем считать матрицу корреспонденций заданной. Методика ее формирования описана в главе 3.

При анализе функционирования транспортных систем городов первоочередной интерес представляют технологии и алгоритмы оценки территории городов с точки зрения их возможности удовлетворять имеющийся транспортный спрос. Именно территориальные (в широком понимании этого термина) ограничения определяют и возможности развития территории, и виды ее использования, и в итоге качество жизни на ней.

Транспортное движение на городской территории, как ничто другое, иллюстрирует тот факт, что потребности в моторизованном движении никогда не могут быть удовлетворены полностью. С одной стороны, увеличивающийся транспортный спрос требует увеличения транспортного предложения, с другой стороны, увеличение транспортного предложения приводит к отрицательным эффектам – растут за-



траты на реализацию транспортного спроса и негативное воздействие на окружающую среду.

Формализация (моделирование) процесса движения транспортных средств осложняется прежде всего следующими факторами:

- объем генерации транспортного потока зависит от множества факторов, сбор информации о которых представляет собой отдельную научную задачу;

- критерии оценки качества организации дорожного движения неоднозначно определены различными субъектами транспортной системы: участниками дорожного движения, представителями органов власти, надзорными органами (ГИБДД) и т. д.

Кроме того, необходимо учитывать и сложившиеся закономерности развития транспортной системы города. Незнание действительного состояния транспортного движения по всей транспортной сети города приводит к принятию ошибочных управленческих решений и, как следствие, к перегрузке (недогрузке) отдельных перегонов и узлов, образованию транспортных заторов, повышению уровня аварийности, ухудшению экологии города. Управление транспортными потоками, проектирование улично-дорожной сети и организация дорожного движения – глобальные насущные проблемы любого современного мегаполиса. Для их решения необходимы: измерение (сбор данных), наблюдение, моделирование, управление.

### 4.1.3. Решаемые задачи

Задача построения модели формирования эффективной транспортной системы крупного города предусматривает последовательное решение ряда следующих подзадач:

- формализация объекта исследования (области исследования). Десять транспортных зон;

- определение степеней свободы решаемой задачи. Три способа передвижения – пешком, на общественном и на индивидуальном транспорте;

- выбор критерия оптимальности (значение и единицы измерения целевой функции). Целевая функция будет представлять собой время и измеряться в минутах;

- выбор и формализация «верхних» ограничений, накладываемых на целевую функцию: 1) по спросу на перемещение в исследуемых областях; 2) по выбросам загрязняющих веществ; 3) по протяженности существующей улично-дорожной сети; 4) по рискам возникновения ДТП; 5) по шумовому воздействию.

- выбор и формализация «нижних» ограничений. Объемы перемещений по территории, связанные с существующим транспортным спросом;

– детализация «нижних» ограничений по различным типам перемещения в исследуемых областях для каждого типа прохождения маршрута.

#### 4.1.4. Способ исследования

В качестве основного способа решения задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города было выбрано построение и решение математической модели оптимизационной задачи. На данном этапе представляется целесообразным дать подробное толкование термину «модель», а также процессу моделирования и определить место в этом процессе решаемых в ходе исследования задач математического программирования.

Известно, что слово «модель» происходит от латинского *Modulus* – мерка, и означает:

- 1) миниатюрную копию предмета;
- 2) образец какого-либо предмета;
- 3) тип, марку изделия;
- 4) чертеж или образец, наглядно демонстрирующий строение и действие какого-либо объекта или процесса и т.д. [1].

В процессе исследований *модель* – это отображение, аналог явления или процесса в основных, существенных для целей исследования чертах. Процесс создания модели называется *моделированием*. Модель должна так учитывать все взаимосвязи, закономерности и условия, чтобы на ее основе можно было выполнить эксперименты, цель которых – определение «поведения» объекта моделирования в различных возможных (часто наблюдаемых в действительности) условиях [103].

Любые модели только отчасти воспроизводят объект исследования или какое-либо явление (процесс). Например, модель физическая или геометрическая, полностью воспроизводящая свойства моделируемого объекта, называлась бы тогда копией моделируемого объекта.

Исторически первым из известных приемов моделирования считается метод подобия, суть которого состоит в том, что изучаемое явление воспроизводится в экспериментальных условиях, в другом масштабе. На такой модели ведется изучение явления.

Модель – это специально создаваемый искусственный объект, на котором воспроизводятся вполне определенные характеристики исследуемого объекта с целью его изучения, а моделирование – вполне определенное конкретное отображение рассматриваемых характеристик изучаемого объекта в целях его исследования.

Построение модели часто продиктовано экономической целесообразностью, то есть попыткой получить максимально полное представление об объекте или процессе, не создавая его в натуре.

Моделирование служит важным инструментом научной абстракции, позволяющим выделить и проанализировать существенные для исследования свойства, взаимосвязи, структурные, функциональные параметры.

Аналогично следует рассматривать и математические модели. Нельзя построить математическую модель просто какого-либо объекта или явления как такового, не представляя изначально задачу, которую требуется решить при помощи этой модели – предмета исследования. Если взять в качестве простейшей модели функцию, то она, как известно, будет определять взаимно однозначное соответствие между несколькими переменными. И изначально важно определить, какие переменные в модели будут свободными, а какие – зависимыми. Это определение обычно продиктовано целями и задачами, стоящими перед исследователем, ради которых и строится модель.

При изучении сложных процессов, явлений очень часто применяется моделирование. Модели могут быть реализованы с помощью как некоторых физических (физическая модель), так и абстрактных объектов (абстрактная модель). Абстрактной моделью могут быть, в частности, математические выражения, описывающие характеристики исследуемого объекта (математическая модель). Модели с конкретными числовыми характеристиками называют числовыми, модели, записанные с помощью логических выражений, – логическими, а модели в графических образах – графическими. К логическим моделям относятся блок-схемы алгоритмов и программ.

По своей природе математические методы могут применяться не непосредственно к изучаемой действительности, а лишь к математическим моделям того или иного круга явлений или проблем [135, 136]. Математическое моделирование является наиболее совершенным и вместе с тем наиболее эффективным методом моделирования, так как открывает возможности для применения средств математического анализа.

Естественно, результаты исследования такой модели будут иметь практический интерес, если она достаточно адекватна рассматриваемому явлению, то есть хорошо отображает реальную ситуацию.

Для более точного описания действительности приходится строить несколько моделей, учитывающих различные стороны рассматриваемого явления, ибо иногда целесообразнее построить несколько моделей одного и того же объекта или явления, чем одну, наиболее полно описывающую этот процесс. В дальнейшем на этапе поиска алгоритма решения модели такой подход вдвойне оправдан.

Степень совершенства математических моделей, применяемых в той или иной науке, математический аппарат, используемый для их исследования, в известной мере характеризует уровень развития науки.

Адекватность модели является в какой-то мере условным понятием, так как полного соответствия модели реальному объекту быть не может. Чаще имеется в виду не просто адекватность, а лишь соответствие модели оригиналу по тем свойствам, которые считаются существенными для исследования.

Обычно при исследовании математическая модель строится несколько раз, а затем применяется математический метод, анализируется результат. В результате анализа полученных данных принимается решение о корректировке модели (внесение дополнительных условий, ограничений, изменение цели и др.) и снова проводятся расчет и анализ и т.д. Так происходит потому, что ни одна математическая модель не может точно описать действительное явление, а учитывает только вполне определенные характеристики, исходя из целей исследования.

Для исследователя, создавшего математическую модель интересующего его объекта либо явления, все ее компоненты (формулы и определяющие соотношения) несут вполне ясный физический смысл. Технология решения (метод решения модели) есть абстракция более высокого уровня, чем сама модель (например, метод Гаусса или симплексный метод). И это уже само по себе вызывает некоторое недоверие со стороны исследователя, создавшего модель.

Модель может с разной степенью достоверности описывать объект либо явление. Исследователь может до бесконечности усложнять математическую модель, но математические инструменты позволяют находить решения лишь для очень ограниченного класса моделей. Нет универсальных методик решения уравнений математической физики либо моделей задач динамического программирования.

Задача исследователя заключается только в построении модели. Решение модели – это задача математики. И если математическая модель – это всего лишь малая часть от общего количества свойств объекта либо явления, формализованная в виде набора определяющих соотношений, то решение модели – результат работы математического аппарата, который не допускает в себе вариативности.

Иными словами, адекватность решения поставленной задачи при помощи математического моделирования определяется не алгоритмом решения модели, а ее адекватностью – набором свойств, которыми наделил ее исследователь.

Особенность математических моделей оптимального планирования, применяемых в настоящих исследованиях, состоит в том, что они основаны на достаточно строгих теоретических положениях математического программирования. Это относится, например, к модели транспортной задачи, математическим моделям оптимального планирования (производства, торговли, перевозок). Оптимальное планирование не означает оптимального решения проблемы, которую исследовали.

Все зависит от того, насколько решенная модель адекватна действительности, это и определяет доверие к результату моделирования.

Решение различных задач посредством линейного программирования стало возможным в 1951 г. Математические модели, при помощи которых решались эти задачи, относятся к моделям на экстремум. Слово «программирование» означает, что набор переменных, подлежащих нахождению, обычно определяет программу (план) работы конкретного объекта.

В отличие от классической теории экстремальных задач, которая является частью математического анализа, в математическом программировании (и в линейном в частности) основное внимание уделяется тем задачам, в которых активно участвуют ограничения на область изменения переменных.

Решения этих моделей называют оптимальными. Следует особо отметить, что термин «оптимальное решение» относится именно к модели, а не к объекту или явлению, которые описывает эта модель. Оптимальное решение в этом плане – это лучшее решение модели. Лучшее не абсолютно, а относительно тех целей и ограничений, которые были заданы в математической модели самим исследователем.

Если модель построена, то перед математиком стоит задача, как получить решение. Не все модели можно точно рассчитать существующими математическими методами. Здесь возможности тоже ограничены. Но модели линейного программирования можно точно рассчитать, используя математические методы (симплексный метод, метод разрешающих множителей, Венгерский метод и др.), и получить оптимальное значение переменных (оптимальное решение).

В математических моделях на оптимум проблема формулировки критерия оптимальности имеет решающее значение. Решений оптимальных «вообще» не существует. Понятие оптимальности решения может быть определено лишь с точки зрения конкретного критерия оптимальности. Когда же модель на экстремум построена, математический метод решения этой модели дает оптимальное решение.

При решении задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города в качестве способа (инструмента) исследования будет применяться математическое программирование, а конкретно – линейное программирование.

Математическое программирование – область математики, разрабатывающая теорию и численные методы решения многомерных экстремальных задач с ограничениями, то есть задач на экстремум функции многих переменных с ограничениями на область изменения этих переменных. В отличие от классической теории экстремальных задач, которая является частью математического анализа, основное внимание уделяется тем задачам, в которых активно участвуют ограничения на область изменения переменных.

Линейное программирование – часть математического программирования, отличительная особенность которого состоит в том, что целевая функция и ограничения имеют линейную форму.

Теория линейного программирования – это раздел математики, относящийся к математическому программированию. Теория возникла в середине XX в. Исторически общая задача линейного программирования была впервые поставлена в 1947 г. Дж. Данцигом, М. Вудом, и тогда же предложен для ее решения так называемый симплексный метод.

Это исследование привело Данцига к мысли, что «соотношение между деятельностью различных предприятий можно рассматривать как модель задачи линейного программирования, оптимальное решение которой определяется условием минимальности некоторой линейной формы» [137].

Термин «линейное программирование» впервые появился в 1951 г.

Некоторые задачи, связанные с определением экстремума линейной формы, на переменные которой наложены линейные ограничения, были сформулированы еще раньше, например транспортная задача. Однако первое успешное решение задачи линейного программирования в России было осуществлено Л.В. Канторовичем в 1939 г.

Задачи программирования связаны с вопросами эффективного использования или распределения ограниченных ресурсов для достижения желаемых целей. Характерной чертой таких задач является большое число решений, удовлетворяющих их основным условиям.

Выбор частного решения как наилучшего зависит от целевых установок поставленной задачи. Решение, удовлетворяющее условиям задачи и соответствующее целевым установкам, называется *оптимальным*.

В дальнейшем, в целях сохранения описанных выше терминологических связей, в области приложения настоящих исследований будем использовать два понятия:

- «оптимизационная задача формирования эффективной транспортной системы крупного города»;
- «математическая модель оптимизационной задачи (оптимальная модель) формирования эффективной транспортной системы крупного города».

Первый из указанных терминов будет определять стоящую перед исследователем задачу (по аналогии с транспортной задачей), а второй термин – инструмент для решения уже поставленной исследователем задачи.

## 4.2. Постановка оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города

### 4.2.1. Логико-графическая модель постановки оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города

Одним из показателей успешного развития города является наличие в нем эффективной транспортной системы. Цель функционирования транспортной системы города, как любой природно-технической системы, заключается в повышении качества жизни на той территории, где она функционирует.

На рис. 4.1 приведена логико-графическая модель постановки оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города. Модель представляет собой графическую

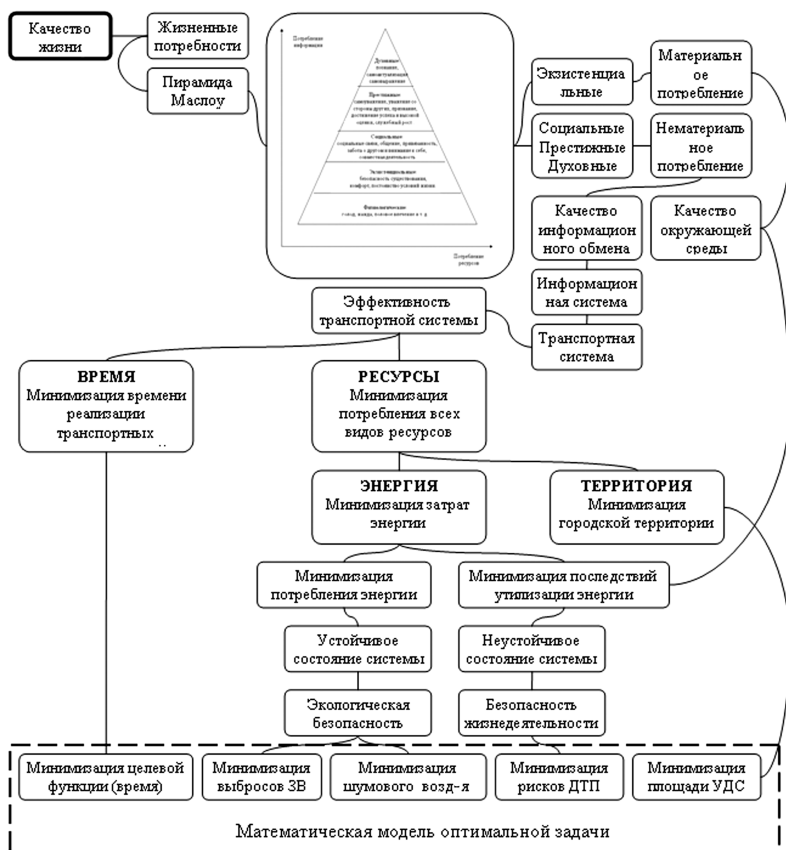


Рис. 4.1. Логико-графическая модель постановки оптимизационной задачи

интерпретацию логических построений при переходе от рассмотрения задачи повышения качества жизни на территории города к составляющим математической модели оптимальной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города.

По модели хорошо видно, что при постановке задачи эффективность есть результат сопоставления целей – времени реализации транспортных корреспонденций и ресурсов, затрачиваемых на достижение этих целей. В свою очередь, все ресурсы поделены на территориальные и энергетические.

В модели подробно рассмотрено движение энергии в системе. Очевидно, что введение в транспортную систему города каждой дополнительной единицы транспорта вносит в систему дополнительную энергию, при этом забирая часть городской территории, необходимой, в том числе, и для устойчивой утилизации этой энергии. В нижней части рисунка выделены итоговые составляющие, необходимость включения которых в математическую модель следует из логики постановки задачи повышения качества жизни в городе.

#### **4.2.2. Возможные способы формализации задачи формирования эффективной транспортной системы**

Формирование и управление транспортной системой включает в себя совокупность мероприятий, направленных на регулирование транспортного спроса, оптимальное распределение его по территории, снижение энергоемкости городских перевозок, обеспечение безопасности функционирования, минимизацию временных затрат, использования всех видов ресурсов (территория, энергия).

Целевой показатель функционирования транспортной системы – минимум средневзвешенного времени реализации транспортных корреспонденций всеми участниками движения с учетом средней скорости движения и дальности корреспонденций, совершаемых участниками посредством всех видов транспорта при выполнении ограничений по потребляемым ресурсам и транспортному предложению («верхние» ограничения) и ограничений транспортного спроса («нижние» ограничения).

Целевая функция учитывает потребности на передвижения для всего населения города. Следовательно, и ограничения должны учитывать потребности всех жителей города. Таким образом, если целевая функция будет доставлять минимум времени реализации транспортной корреспонденции на одного человека, то и ограничения при этом будут представлять собой предельный вред от функционирования транспортной системы того или иного рода, приходящийся на одного жителя города.



При рассмотрении различных сторон формирования эффективной транспортной системы города возможны самые различные подходы, определяющие предмет исследований – непосредственно транспортную систему.

Возможные критерии оптимальности функционирования транспортной системы города:

- минимум затрат времени на перемещения всех участников движения;
- максимум средней скорости передвижения всех участников движения;
- минимум затрат денежных средств на перемещение всех пассажиров любым способом;
- минимум затрат на содержание транспортной инфраструктуры.

Возможные переменные степени свободы задачи построения эффективной транспортной системы, обозначающие:

- количество пассажиров, которым необходимо переместиться из одного района в другой тем или иным способом (пешком, ОТ, ИТ);
- переменные модели могут обозначать необходимый объем транспортной инфраструктуры того или иного вида.

Также возможны различные варианты задания и последующего учета ограничений на функционирование системы:

- ограничения по спросу. Для каждого вида и целей перемещения строятся отдельные матрицы корреспонденций, которые содержат объем спроса на передвижения пассажиров, грузов между транспортными районами города. Спрос должен быть удовлетворен полностью;
- ограничения по имеющимся возможностям УДС. Объем этого ресурса может быть ограничен площадью всего дорожного полотна или длиной всех полос проезжих частей;
- ресурсные ограничения. Необходимая информация о предельно допустимом воздействии транспортной системы на отдельную городскую территорию.

Объектом управления в системе является транспортный поток, состоящий из различных видов транспортных средств и имеющий те же характеристики, что и поток жидкости или газа: скорость, плотность, интенсивность и состав. Нужно учесть, что водители автомобилей обладают свободной волей и реализуют свои частные цели, поэтому управлять транспортным потоком, учитывая только технические аспекты, невозможно. Ситуация осложняется отсутствием надежных технических средств (датчиков), предназначенных для получения данных о транспортных потоках.

Проведение масштабных натуральных экспериментов по анализу транспортных потоков ограничено рядом причин (необходимость обеспечения безопасности движения, материальные и трудовые затраты), оно затрагивает интересы большого количества людей – участни-

ков дорожного движения. Применение методов моделирования обусловлено прежде всего проблемой анализа транспортной системы.

В использовании математических методов есть слабые стороны. Например, моделирование какого-либо процесса или явления может привести к очень сложной математической задаче, которую современные инструментальные средства математики решить уже не могут. Возникает необходимость в упрощении модели. В задачу вводятся некоторые допущения, которые могут отразиться на качестве полученных результатов.

Иногда этот процесс приводит к парадоксальным ситуациям, когда на каком-то этапе формализации задачи происходит существенное усложнение алгоритма и повышение детализации задачи, а на последующем этапе, например, из-за невозможности решения нелинейных форм модели, начинается обратный процесс, связанный с существенным упрощением и огрублением задачи в ходе ее линеаризации.

В любом случае модель – это упрощенное формальное описание существующих явлений. Модели, как правило, позволяют выявить особенности функционирования объекта исследования и на основе этого прогнозировать поведение объекта при изменении каких-либо параметров (исходных данных).

Главное требование при моделировании любой проблемы – модель должна быть адекватна действительности, то есть соответствовать реальности. От этого зависит качество выводов, полученных по моделям. Проверку адекватности модели проводят опытным путем, а результаты, полученные при ее использовании, сравнивают с действительными данными. В связи с этим принято строить несколько моделей с разными критериями, условиями, допущениями, а затем проверять их на адекватность.

В основе исследований по распределению транспортного спроса на перевозки по территории города лежит информация о спросе на передвижения и информация о возможностях улично-дорожной сети. Матрица корреспонденций, по сути, характеризует спрос на передвижение. Он может быть выражен количеством людей, которым необходимо переместиться из одного пункта в другой. Рассмотрим это положение подробнее.

Используем предложенное в главе 3 разбиение города на  $n$  транспортных районов. Перемещение из одного транспортного района в другой будем называть корреспонденцией, которая измеряется количеством людей, перемещающихся из одного района в другой в течение суток.

Корреспонденции могут осуществляться с различными целями: поездки домой, на работу, учебу, к местам отдыха и развлечений. Различают корреспонденции следующих видов: на общественном транспорте, на индивидуальном транспорте, а также по различным систе-

мам транспорта. Для каждого вида и целей корреспонденций строятся отдельные матрицы.

Объем спроса на передвижение между транспортными районами города можно определить по методике, изложенной в литературе [138], выразив его с помощью матрицы корреспонденции  $K$ :

$$K = \begin{Bmatrix} 0 & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & 0 & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & 0 \end{Bmatrix},$$

где  $K_{ij}$  – объем корреспонденций из  $i$ -го района в  $j$ -й район за сутки (количество человек).

Таким образом, транспортный спрос задан матрицей корреспонденций, а транспортное предложение связано с состоянием дорожно-транспортного комплекса города. Улично-дорожная сеть представляет собой систему улиц и дорог в единой транспортной сети города.

Уровень развития УДС оценивается двумя параметрами: протяженностью и плотностью движения на отдельных ее участках. Традиционно наибольшая плотность характерна для густонаселенных районов и центральной части города. Основная задача улично-дорожной сети состоит в эффективном и безопасном удовлетворении спроса ее пользователей. Однако для моделирования городской транспортной системы необходим критерий эффективности всей улично-дорожной сети, а не отдельных ее участков.

Характерной чертой дорожного движения является стремление его участников осуществлять требуемые передвижения как можно с большей скоростью. Скорость – это один из важнейших показателей качества организации дорожного движения, определяющих эффективность функционирования всей УДС. Предлагается использовать в качестве критерия качества функционирования улично-дорожной сети время нахождения на ней автотранспортных средств. Этот показатель отражает и скорость, и плотность транспортного потока.

Моделирование транспортной системы нужно осуществлять с применением теории линейного программирования, которая хорошо изучена и практически реализуема. Решение задач линейного программирования позволяет получать уникальные результаты, всесторонне оценивающие предмет изучения. Кроме того, исследователю предоставлены во множестве прикладные пакеты программ для решения задач линейного и нелинейного программирования.

Транспортная задача линейного программирования в ее классическом виде не может быть использована при моделировании всей транспортной системы города, так как основное требование в зада-

че – перевозка (передвижение) однородного груза. Заданы пункты отправления и пункты доставки с фиксированным спросом, необходимо определить маршруты перевозки с той или иной целью. В качестве цели обычно служит минимум затрат на все перевозки. Однако в случае с транспортной системой города неизвестно, каким видом транспорта и по какому маршруту транспортной сети будет реализован спрос на передвижение каждым его участником.

Предпринимались попытки использования транспортной задачи линейного программирования при рассмотрении перевозок пассажиров. При этом в модель вводилось большое число ограничений, и практически она имела смысл для небольшого числа транспортных районов. То же самое относится и к перевозке грузов, так как существует жесткое требование в отношении того, какой груз, откуда и куда должен быть доставлен и каким транспортом.

Предлагаем принять за основу классическую модель задачи линейного программирования. Рассмотрим подробнее ее суть и основные моменты при моделировании. В общем виде варианты приложения теории линейного программирования при постановке оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города изложены в литературе [138].

На этапе выбора целей и ограничений при формализации задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города возможны два подхода. Они определяют две отличные друг от друга, но приводящие к одному результату задачи распределения транспортного спроса и транспортного предложения.

Отличие в формализации этих задач заключается в выборе неизвестных. Для первой задачи неизвестными являются параметры, характеризующие транспортный спрос, то есть объем перемещений людей. Во второй задаче неизвестны объемы различных единиц транспортных средств, функционирующих в своих системах транспорта. Соответственно, будут различаться и сами модели при формализации их целевых функций.

Цель первой задачи – достижение минимума времени, второй – максимума скорости. Постановка указанных задач подробно рассмотрена в литературе [139]. Следует заметить, что эти задачи приводят к структурно симметричным математическим моделям, которые различаются только тем, что в них находят перераспределение транспортного спроса и транспортного предложения по территории города в разных размерностях.

В первой задаче в качестве неизвестных выступают люди, перемещающиеся на различных видах транспорта, во второй – требуемое количество перевозящих их транспортных средств.

Кроме того, поменялась целевая функция: в первой задаче это была минимизация времени реализации всех транспортных корреспонден-



$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (4.3)$$

В векторно-матричной форме задача имеет вид:

$$Z = C \cdot X \rightarrow \max, \quad (4.1')$$

$$A \cdot X \geq B, \quad (4.2')$$

$$X \geq 0, \quad (4.3')$$

где  $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$  – вектор коэффициентов целевой функции;  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор переменных;  $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$  – вектор свободных членов системы ограничений;

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \text{ – матрица коэффициентов} \\ \text{системы ограничений.}$$

Планом (или допустимым решением) называется вектор  $X$ , удовлетворяющий ограничениям (4.2), (4.3). Оптимальным планом или решением задачи (4.1)–(4.3) называется план, дающий максимум линейной форме (4.1).

Терминология математического программирования определяется как раз экономическими задачами, решениям которых были посвящены первые исследования в теории линейного программирования. Результатом решения становится план или программа, поэтому всю математическую теорию, посвященную нахождению оптимальной программы (выпуска продукции), назвали математическим программированием.

В сформулированной нами задаче аналогом производственно-экономического термина «программа выпуска» является термин «программа развития дорожно-транспортного комплекса города». Как следствие, эта программа будет решением математической модели оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города.

С каждой задачей линейного программирования связана другая задача, называемая двойственной по отношению к исходной.

Задачи (4.1) и (4.1') называют двойственными друг другу, если они построены по следующим правилам:

Если задача (4.1) имеет размеры  $m \times n$  ( $m$  – ограничений,  $n$  – переменных), то задача (4.1') – размеры  $n \times m$ .



Переменные двойственной задачи ( $y_1, y_2, \dots, y_m$ ) называют двойственными оценками или теневыми ценами. Они являются важным инструментом для принятия управленческого решения. Рассмотрим их смысл подробнее.

Каждой переменной двойственной задачи соответствует ограничение прямой задачи. Переменная двойственной задачи показывает, насколько (увеличится/уменьшится) целевая функция прямой задачи, если значение правой части прямой задачи (увеличится/уменьшится) на одну единицу. Например, если  $i$ -е неравенство прямой задачи характеризует расход какого-либо ресурса, то величина двойственной оценки  $y_i$  означает, насколько бы увеличилось значение целевой функции  $Z$ , если бы объем соответствующего ресурса  $v_i$  увеличили на одну единицу.

Это действительно для небольших приращений объемов в пределах устойчивости переменных  $y_i, i = 1, 2, \dots, m$ :

$$\Delta Z = y_i \cdot \Delta v_i, \quad (4.7)$$

где  $\Delta Z$  – приращение целевой функции;  $\Delta v_i$  – приращение правой части  $i$ -го ограничения.

Таким образом, величина двойственной оценки характеризует влияние дополнительной единицы какого-то фактора на критерий оптимальности. По ней судят об эффективности того или иного ресурса: чем больше оценка, тем эффективнее соответствующий ресурс. Об избыточности ресурса говорят, если оценка равна нулю.

Зная значения двойственных оценок рассматриваемых в прямой задаче факторов, можно принимать обоснованные решения об изменении их величин.

В сформулированной нами задаче результатом решения двойственной задачи будет оценка влияния тех или иных управленческих решений в области транспортного строительства, организации дорожного движения либо благоустройства города на конечные показатели качества функционирования его транспортной системы.

Таким образом, для формирования задачи с использованием теории линейного программирования необходимо определить:

- переменные;
- цель задачи – критерий оптимальности, описать ее через переменные;
- ограничения, описать их через переменные. Ограничения могут быть различных типов –  $\geq$  или  $\leq$ , характеризовать различные ресурсы или спрос.

Поставленные выше задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города могут также решаться на основе построения математической модели линейного программирования по



распределению транспортного спроса на территории города. Формализацию области исследования и принципы построения таких моделей с той или иной целью можно рассматривать в рамках изложенных основ теории линейного программирования.

Рассмотрим подробнее постановку указанных выше задач распределения транспортного спроса и транспортного предложения, отличающихся, как было отмечено, выбором неизвестных (для первой это параметры, характеризующие транспортный спрос, то есть объем перемещений людей, для второй – объемы различных единиц транспортных средств, функционирующих в своих системах транспорта) и целевыми функциями (в первой задаче это достижение минимума времени, во второй – максимума скорости).

### Задача распределения транспортного спроса

Проведем построения на основе изложенных в главе 3 подходов к дискретизации объектов исследования – транспортной системы и территории города.

Город разделили на  $n$  транспортных районов естественным путем (компактное проживание людей, границы в виде рек, рвов, железных дорог, крупных магистралей). Номер района  $t = 1, 2, \dots, n$ . Выделены произвольным образом области исследования. Номер области  $r = 1, 2, \dots, E$ . Известны координаты центров транспортных районов и вершин каждой области исследования. Определена матрица корреспонденций между районами  $K = (k_{ij})$ , характеризующая спрос на передвижения. Установлена предельно допустимая экологическая нагрузка в каждой области  $D_r$ . На основе изложенного определена сумма долей всех корреспонденций, проходящих через область исследования ( $I_{rs}$ ), и транспортная зависимость области ( $G_{rs}$ ) с учетом типа прохождения маршрута.

Рассматриваются три способа передвижения: пешком, на городском пассажирском транспорте общего пользования (ОТ), на индивидуальном транспорте (ИТ).

Требуется распределить все количество людей из матрицы корреспонденций по различным способам передвижения в исследуемых областях для каждого типа прохождения маршрута с целью получения минимума затрат суммарного времени всеми участниками движения.

В модели предлагаются следующие ограничения в исследуемых областях:

- по спросу на передвижение;
- по предельной экологической нагрузке;
- по транспортному предложению.

Обозначим:

$X_{rs1}$  – количество людей, передвигающихся в области  $r$  по типу  $s$  пешком;

$X_{rs2}$  – количество людей, передвигающихся в области  $r$  по типу  $s$  на ОТ;

$X_{rs3}$  – количество людей, передвигающихся в области  $r$  по типу  $s$  на ИТ;

$S$  – количество типов пересечения области исследования ( $S = 3$ ).

Таким образом, для конкретной области исследования  $r$  будет 9 переменных:

$X_{r11}$  – количество людей, передвигающихся по типу 1 (транзит) пешком;

$X_{r21}$  – количество людей, передвигающихся по типу 2 (въезд/выезд) пешком;

$X_{r31}$  – количество людей, передвигающихся по типу 3 (внутри области) пешком;

$X_{r12}$  – количество людей, передвигающихся по типу 1 (транзит) на ОТ и т.д.

Ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях будут иметь следующий вид:

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \geq G_{rs}, \quad (4.8)$$

где  $l_{rs}$  – сумма долей всех корреспонденций, проходящих через область исследования  $r$  по типу  $s$  (км);  $G_{rs}$  – транспортная зависимость области  $r$  по типу  $s$  (чел · км).

Обозначим:

$a_1$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км пешком ( $a_1 = 0$ );

$a_2$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км на ОТ (Дж/км/чел.);

$a_3$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км на ИТ (Дж/км/чел.).

Тогда экологические ограничения на передвижения по исследуемым областям будут иметь следующий вид:

$$a_1 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs1} + a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \leq D_r, \quad (4.9)$$

где  $D_r$  – предельная экологическая нагрузка в области  $r$  (Дж).

Существует понятие плотности транспортного потока – это число автомобилей, занимающих единицу длины полосы движения проезжей части дороги при условии непрерывного движения. В качестве единицы длины возьмем 1 км.

Число автомобилей пересчитаем на количество людей по среднему их количеству в одном автомобиле и получим количество людей, занимающих 1 км полосы движения проезжей части дороги при движении на различных видах транспорта.

Пусть  $k_2$  – количество людей, занимающих 1 км длины проезжей части при движении на ОТ;  $k_3$  – количество людей, занимающих 1 км длины проезжей части при движении на ИТ.

Тогда ограничения по наличию дорог имеют вид:

$$\frac{1}{k_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{k_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad (4.10)$$

где  $L_r$  – суммарная длина проезжих частей дорог в области  $r$ .

Пусть:

$v_1$  – средняя скорость перемещения одного человека пешком на 1 км (км/ч);

$v_2$  – средняя скорость перемещения одного человека на ОТ на 1 км (км/ч);

$v_3$  – средняя скорость перемещения одного человека на ИТ на 1 км (км/ч);

Примем в качестве критерия оптимизации общее время совершения корреспонденций. Тогда целевая функция будет иметь вид:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} + \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs2} + \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \rightarrow \min.$$

### Модель оптимального распределения транспортного спроса

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} \cdot \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs} + X_{rs2} \cdot \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs} + X_{rs3} \right) \rightarrow \min; \quad (4.11.1)$$

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \geq G_{rs}, \quad r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3; \quad (4.11.2)$$

$$a_1 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs1} + a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \leq D_r, \\ r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.11.3)$$

$$\frac{1}{k_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{k_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.11.4)$$

$$X_{rs1} \geq 0, \quad X_{rs2} \geq 0, \quad X_{rs3} \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3. \quad (4.11.5)$$

Модель оптимального распределения спроса (4.11.1)–(4.11.5) позволяет для любых произвольно выбранных областей исследования найти, как распределяется существующий спрос на передвижения между транспортными районами по выбранным областям исследования с учетом способа передвижения (пешком, ОТ, ИТ) и типа прохождения маршрута через исследуемые области (транзит, въезд/выезд, внутри области)  $X_{rs1}$ ,  $X_{rs2}$ ,  $X_{rs3}$ . При этом поставлена цель – минимум затрат времени всех участников движения по всем маршрутам.

### Задача распределения транспортного предложения

При решении задачи распределения транспортного предложения целевой функцией будет выступать *суммарная скорость передвижения в транспортной сети* всех участников дорожного движения всеми видами транспорта на всей территории исследуемой области, а неизвестными – количество транспортных средств различного назначения и эксплуатационных параметров, реализующих имеющийся на территории города транспортный спрос.

Обозначим:

$X_{rs1}$  – количество людей, передвигающихся в области  $r$  по типу  $s$  пешком;

$X_{rs2}$  – количество транспортных средств ОТ, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$X_{rs3}$  – количество транспортных средств ИТ, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$S$  – количество типов прохождения маршрутов в области исследования ( $S = 3$ ).

Следовательно, для конкретной области исследования  $r$  будет 9 переменных:

$X_{r11}$  – количество людей, передвигающихся по типу 1 (транзит) пешком;

$X_{r21}$  – количество людей, передвигающихся по типу 2 (въезд/выезд) пешком;

$X_{r31}$  – количество людей, передвигающихся по типу 3 (внутри области) пешком;

$X_{r12}$  – количество транспортных средств ОТ, перевозящих пассажиров по типу 1 (транзит) и т. д.

Вместо коэффициентов  $k_j$  используем следующие параметры:

$w_2$  – среднее количество человек, перевозимых на одном транспортном средстве ОТ (иначе – средняя вместимость транспортного средства);

$w_3$  – среднее количество человек, перевозимых на одном транспортном средстве ИТ.

Тогда ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях будут иметь следующий вид:

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} \cdot w_2 + l_{rs} \cdot X_{rs3} \cdot w_3 \geq G_{rs}, \quad (4.12)$$

где  $l_{rs}$  – сумма долей всех корреспонденций, проходящих через область исследования  $r$  по типу  $s$  (км);  $G_{rs}$  – транспортная зависимость области  $r$  по типу  $s$  (чел · км).

Также обозначим:

$a_2$  – пробеговые выбросы загрязняющих веществ единицей подвижного состава ОТ (г/км);

$a_3$  – пробеговые выбросы загрязняющих веществ единицей подвижного состава ИТ (г/км).

При этом экологические ограничения на передвижения по исследуемым областям будут иметь следующий вид:

$$a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \leq D_r, \quad (4.13)$$

где  $D_r$  – предельная суточная эмиссия загрязняющих веществ в области  $r$  (граммов).

Для определения ограничений по УДС количество участков улично-дорожной сети всего города обозначим  $m$ . Длину  $i$ -го участка сети в области исследования  $r$  обозначим  $d_{ri}$ . Количество полос, соответствующее  $i$ -му участку, обозначим  $k_i$ .

Тогда для области исследования  $r$  можно посчитать суммарную длину всех полос движения проезжих частей улиц и дорог:

$$L_r = \sum_{i=1}^m d_{ri} \cdot k_i. \quad (4.14)$$

После этого требуется рассчитать плотность транспортного потока при непрерывном движении со скоростью движения конкретного вида транспорта. При таком расчете важен динамический габарит автомобиля, который зависит от времени реакции водителя и тормозных качеств транспортных средств. Динамический габарит автомобиля  $L_0$  включает в себя длину автомобиля  $l_a$  (м) и дистанцию безопасности  $d$  (м).

Подробный расчет динамического габарита автомобиля описан в специальной литературе [32, 75, 96]. Учтем, что дистанция безопасности между движущимися автомобилями будет рассчитываться следующим образом:

$$d = c \cdot t + \frac{c^2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right), \quad (4.15)$$

где  $c$  – скорость движения транспортного потока (м/с);  $t$  – время реакции водителя (с);  $j_i$  – замедление  $i$ -го автомобиля (м/с<sup>2</sup>).

Если транспортное средство движется непрерывно со скоростью  $c$ , то на улично-дорожной сети оно занимает  $L_0$  метров проезжей части.

Тогда на 1 км проезжей части приходится  $p = \frac{1000}{L_0}$  (авто/км), пара-

метр  $p$  назовем максимальной плотностью транспортного потока, движущегося с заданным значением скорости  $C$ .

Для каждого вида подвижного состава можно рассчитать свою плотность транспортного потока, таким образом, обозначим:

$p_2$  – плотность транспортного потока ОТ при скорости  $c_2$  (авто/км);

$p_3$  – плотность транспортного потока ИТ при скорости  $c_3$  (авто/км).

Тогда ограничения по транспортному предложению для области исследования имеют вид:

$$\frac{1}{p_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{p_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad (4.16)$$

где  $L_r$  – суммарная длина всех полос движения проезжих частей улиц и дорог в области  $r$ .

В процессе создания транспортных моделей проводятся натурные замеры различных параметров транспортных потоков, и один из них – скорость. Обследования скоростных характеристик проводят для различных видов транспорта, для каждого вида получены значения средней скорости движения транспортного потока. В поставленной оптимальной модели натурные данные скоростных параметров транспортных потоков обозначим следующих образом:

$v_1$  – средняя скорость перемещения одного человека пешком (км/ч);

$v_2$  – средняя скорость движения транспортных средств ОТ (км/ч);

$v_3$  – средняя скорость движения ИТ (км/ч);

Тогда целевая функция максимизации суммарной скорости перемещения всех участников движения будет иметь вид:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 (v_1 \cdot X_{rs1} + v_2 \cdot X_{rs2} \cdot w_2 + v_3 \cdot X_{rs3} \cdot w_3) \rightarrow \max.$$

### Модель оптимального распределения транспортного предложения

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 (v_1 \cdot X_{rs1} + v_2 \cdot X_{rs2} \cdot w_2 + v_3 \cdot X_{rs3} \cdot w_3) \rightarrow \max; \quad (4.17.1)$$

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} \cdot w_2 + l_{rs} \cdot X_{rs3} \cdot w_3 \geq G_{rs}, \\ r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3; \quad (4.17.2)$$

$$a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \leq D_r, \quad r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.17.3)$$

$$\frac{1}{p_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{p_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.17.4)$$

$$X_{rs1} \geq 0, \quad X_{rs2} \geq 0, \quad X_{rs3} \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3. \quad (4.17.5)$$

С учетом постановки математических моделей, изложенных в литературных источниках [138], отмечаем, что поставлены две структурно симметричные математические модели, с помощью которых находим перераспределение транспортного спроса и транспортного предложения по территории города в разных размерностях. Неизвестные в первой задаче – люди, перемещающиеся на различных видах транспорта, во второй – требующееся для них количество транспортных средств. При этом стала другой целью: в первой задаче – минимизация времени реализации всех транспортных корреспонденций, во второй – максимизация суммарной скорости перемещения всех участников движения. Как уже отмечалось, это пример двойственности в экстремальных задачах, в том числе в задачах математического программирования.

Суть постановки задачи не изменилась, как и формулировка всей модели, стали другими параметры, постоянные для каждой конкретной задачи. Различия могут быть только в том, для каких целей мы ищем решение в том или ином виде.

### 4.3. Построение математической модели оптимизационной задачи

Математическая модель оптимизационной задачи представляет собой линейную модель задачи математического программирования и состоит из трех обязательных элементов:

- целевой функции;
- системы линейных неравенств (ограничений);
- условия неотрицательности переменных.

#### 4.3.1. Задание степеней свободы оптимальной модели. Выбор переменных

Задание степеней свободы является решающим шагом при построении любой математической модели. От него зависит полнота и



адекватность модели, с одной стороны, и скорость и удобство работы с моделью, с другой стороны.

При построении математической модели будем ориентироваться на поставленную выше задачу нахождения оптимального распределения транспортного спроса по территории города. Как это следует из постановки задачи, в качестве неизвестных в модели будут выступать корреспонденции людей, которые станем искать в суточном (дневном) цикле. Все корреспонденции всех жителей города будем искать в зависимости:

- от зоны (территории города), в которой совершается корреспонденция;
- способа реализации корреспонденции;
- типа реализации корреспонденции.

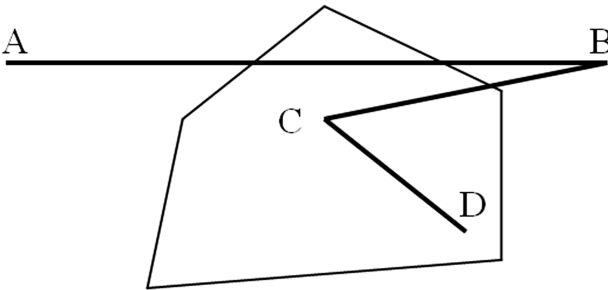
Строить и решать модель формирования эффективной транспортной системы крупного города в первом приближении будем для трех способов передвижений: пешком, на общественном транспорте, на индивидуальном транспорте.

Каждый из способов перемещений в каждой зоне будем рассматривать в зависимости от типа перемещения (рис. 4.2):

AB – транзит;

BC – въезд в зону;

CD – внутреннее движение в зоне.



**Рис. 4.2.** Схема типов перемещения для каждой зоны

Требуется распределить все количество людей из матрицы корреспонденций по различным способам передвижения в исследуемых областях для каждого типа прохождения маршрута с целью получения минимума затрат суммарного времени всеми участниками движения.

Для постановки модели оптимизационной задачи введем следующие искомые переменные:

$X_{rs1}$  – количество людей, передвигающихся в области  $r$  по типу  $s$  пешком;

$X_{rs2}$  – количество транспортных средств ОТ, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$X_{rs3}$  – количество транспортных средств ИТ, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$S$  – количество типов прохождения маршрутов в области исследования ( $S = 1, 2, 3$ ).

Таким образом, для конкретной области исследования  $r$  будет 9 переменных:

$X_{r11}$  – количество людей, передвигающихся по типу 1 (транзит) пешком;

$X_{r21}$  – количество людей, передвигающихся по типу 2 (въезд/выезд) пешком;

$X_{r31}$  – количество людей, передвигающихся по типу 3 (внутри области) пешком.

Итого: для всей области исследования (10 транспортных зон) модель будет иметь 90 степеней свободы. Задача решения математической модели будет заключаться в отыскании лучшего набора значений всех 90 переменных. При таком выборе неизвестных и степеней свободы поставленная математическая модель оптимизационной задачи будет решать задачу распределения транспортного спроса между видами транспорта.

Поставленную задачу, а значит, и математическую модель можно существенно усложнить и расширить, например, разделив переменные, отвечающие за перемещения на ОТ, на виды подвижного состава ОТ, такие как маршрутные автобусы с разрешенной максимальной массой до 5 тонн (типа М2), автобусы с разрешенной максимальной массой свыше 5 тонн (типа М3), трамвай, троллейбус. Кроме того, можно ввести в модель в качестве переменных внеуличные системы транспорта.

Для этого количество транспортных средств ОТ –  $X_{rs2}$  необходимо разбить по видам подвижного состава:

$X_{rs21}$  – количество автобусов типа М2, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$X_{rs22}$  – количество автобусов типа М3, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$X_{rs23}$  – количество трамваев, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$X_{rs24}$  – количество троллейбусов, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ .

Разумеется, для каждого вида подвижного состава должны быть заданы основные эксплуатационные характеристики транспортного средства, такие как скорость и вместимость, а также основные параметры, участвующие в расчете ограничений на целевую функцию.

Средняя вместимость транспортного средства будет задана следующими параметрами:

$w_{21}$  – среднее количество человек, перевозимых на одном автобусе типа М2, средняя вместимость маршрутной газели;

$w_{22}$  – среднее количество человек, перевозимых на одном автобусе типа М3, средняя вместимость автобуса;

$w_{23}$  – среднее количество человек, перевозимых на одном трамвае, средняя вместимость трамвая;

$w_{24}$  – среднее количество человек, перевозимых на одном троллейбусе, средняя вместимость троллейбуса.

Пробеговые выбросы загрязняющих веществ каждой единицей подвижного состава ОТ (г/км) разделятся по видам транспорта:

$a_{21}$  – пробеговые выбросы загрязняющих веществ единицей подвижного состава автобусов типа М2 (г/км);

$a_{22}$  – пробеговые выбросы загрязняющих веществ единицей подвижного состава автобусов типа М3 (г/км);

$a_{23}$  – пробеговые выбросы загрязняющих веществ единицей подвижного состава трамваев;

$a_{24}$  – пробеговые выбросы загрязняющих веществ единицей подвижного состава троллейбусов.

Плотность транспортного потока рассматриваемых видов транспорта будет зависеть от габаритов единиц подвижного состава и скорости перемещения того или иного вида транспорта:

$p_{21}$  – плотность транспортного потока автобусов типа М2, движущихся со скоростью  $c_{21}$  (авто/км);

$p_{22}$  – плотность транспортного потока автобусов типа М3, движущихся со скоростью  $c_{22}$  (авто/км);

Следует иметь в виду, что даже при таком незначительном повышении детализации математической модели количество степеней ее свободы почти удвоится и будет равняться 162. В дальнейшем следует ожидать соответствующего повышения требований к алгоритмам и

инструментам поиска решения модели, увеличения времени нахождения решения и снижения точности результатов.

### 4.3.2. Формирование целевой функции оптимальной модели

Для построения целевой функции требуется задать эксплуатационные параметры систем транспорта, а также произвести расчет объемов этих перемещений в километрах для каждой зоны.

Обозначим:

$v_k$  – средняя скорость движения транспортного средства типа  $k$ .

Пусть известно, что:

$v_1$  – средняя скорость перемещения одного человека пешком (км/ч);

$v_2$  – средняя скорость перемещения одного человека на ОТ (км/ч);

$v_3$  – средняя скорость перемещения одного человека на ИТ (км/ч);

$l_{rs}$  – средневзвешенная по количеству людей длина доли корреспонденций, проходящих через зону  $r$  по типу  $s$ , км:

$$l_{rs} = \frac{\sum_{i,j} l_{ijrs} k_{ijrs}}{\sum_{i,j} k_{ijrs}}, \quad (4.18)$$

где  $l_{ijrs}$  – длина доли корреспонденций из района  $i$  в район  $j$ , проходящих через зону  $r$  по типу  $s$ , км;  $k_{ijrs}$  – количество корреспонденций из района  $i$  в район  $j$ , проходящих через зону  $r$  по типу  $s$  в сутки, чел.

Тогда целевая функция будет иметь вид:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_s \cdot X_{s1} + \frac{1}{v_2} \cdot l_s \cdot X_{s2} + \frac{1}{v_3} \cdot l_s \cdot X_{s3} \right) \rightarrow \min, \quad (4.19)$$

где  $E$  – количество транспортных зон.

В такой постановке целевой функции целевой показатель функционирования транспортной системы – минимум средневзвешенного времени реализации транспортных корреспонденций всеми участниками движения в течение суток.

### 4.3.3. Формирование системы ограничений математической модели оптимизационной задачи

#### Структурная схема ограничений оптимальной модели

В качестве набора ограничений, накладываемых на целевую функцию, будем использовать шесть типов ограничений:

- по протяженности существующей улично-дорожной сети;
- спросу на перемещение в исследуемых областях;
- выбросам загрязняющих веществ;
- рискам возникновения ДТП;
- имеющемуся подвижному составу;
- шумовому загрязнению.

Структурная схема ограничений математической модели оптимизационной задачи приведена на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Структурная схема ограничений математической модели оптимизационной задачи

По аналогии с постановкой задачи представим логико-графическую модель способов формирования ограничений математической модели оптимизационной задачи (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Логико-графическая модель способов постановки ограничений математической модели оптимизационной задачи

По смыслу все вводимые ограничения можно разбить в соответствии с видом правой части на фактические и планируемые. Фактические ограничения связаны с существующим состоянием транспортной системы – спросом, инфраструктурой, подвижным составом. Все эти параметры фиксированы и при этом хорошо формализованы. Они составляют информационную основу всех транспортных моделей.

В свою очередь, планируемые ограничения – это те ограничения, правая часть которых не является строго формализованной. Кроме того, они не фиксированы и позволяют функционировать транспортной системе города в широком диапазоне своих изменений. К ним можно отнести ограничения: по шумовому загрязнению территории, загрязнению атмосферы выбросами автомобильного транспорта, рискам ДТП.

Планируемые ограничения есть результат планирования качества жизни в городе как неких условий функционирования транспортной системы. Их можно задать жесткими, добиваясь выполнения высоких показателей качества функционирования транспортной системы как природно-технической системы. Например, задать цель – добиться выполнения требований по качеству атмосферного воздуха, либо соблюдения предельно допустимых уровней шума во всех жилых помещениях города, либо недопущения гибели людей в ДТП. В результате следует ожидать, что оптимальной при таких ограничениях станет транспортная система, не предоставляющая ожидаемых сообществом

временных показателей скорости удовлетворения транспортных потребностей жителей города.

Следует заметить, что параметры предельно допустимого уровня шумового загрязнения территории и предельный уровень загрязнения атмосферного воздуха нормируются, и их значения зафиксированы в соответствующих документах, хотя не существует понятия предельного риска ДТП. Сообщество жителей города, скорее, определяет для себя «приемлемый» на определенном этапе развития риск ДТП и смерти в них людей.

Представляется целесообразным при формировании планируемых ограничений задаться принципом неухудшения существующей ситуации. Такие ограничения контролировали бы поддержание параметров качества жизни в городе, относящиеся к природе каждого ограничения, на некоем фиксированном уровне, наблюдаемом в настоящее время.

Термин «неухудшение ситуации» следует применять не к отдельным территориям, на которых эта ситуация может быть зафиксирована, а к среднему состоянию качества природной среды по отношению к одному жителю города. Иными словами, эффективность функционирования транспортной системы города должна выражаться минимумом времени, затрачиваемого на реализацию корреспонденций, в пересчете на одного жителя, при сохранении общего среднего объема своего негативного влияния на него.

При рассмотрении всей территории города нетрудно заметить, что жители центральных районов города больше времени находятся на территориях с более высокими уровнями ингредиентного и параметрического загрязнения окружающей среды. Жители отдаленных районов испытывают меньшее негативное воздействие от функционирования городской транспортной системы как по абсолютной величине загрязнения среды, так и по времени воздействия.

Целевая функция математической модели эффективной транспортной системы определяет суммарное время всех транспортных корреспонденций всех жителей города. В связи с этим логично и ограничения, накладываемые на развитие транспортной системы, относить к среднему уровню воздействия, приходящегося на одного жителя города.

Загрязнение атмосферного воздуха на отдельных городских территориях оказывает постоянное вредное воздействие на организм человека. Оно обусловлено физиологическими процессами, в частности дыханием. Как частота дыхания человека, оставаясь практически неизменной в течение всего дня (и всей жизни), так и уровень вреда от воздействия загрязненной атмосферы постоянны в течение дня. Иначе обстоит дело с шумом.

Шумовое загрязнение (оно называется параметрическим) наносит неодинаковый вред здоровью человека при неизменном значении са-

мого параметра. Значимыми являются продолжительность и период шумового воздействия в течение суток. Кроме того, шумовое загрязнение среды не подвержено эффектам накопления и релаксации.

Параметр, определяющий уровень шумового загрязнения территории, гораздо более динамичен в диапазонах своего изменения. Представляется целесообразным шумовые ограничения в математической модели строить исходя из времени шумового воздействия на человека и времени суток, в течение которого оно осуществлялось. Возможен аналогичный подход к постановке ограничений на загрязнение атмосферного воздуха.

При постановке ограничений по риску ДТП территория города, на которой его можно ограничивать, не важна. Риск ДТП связан с собственно передвижениями человека, которые, в свою очередь, осуществляются по всей территории города согласно модели транспортного спроса. При нахождении человека в местах проживания либо на рабочем месте риск стать участником дорожного движения равен нулю. Предельные риски ДТП будут определяться в расчете на одного жителя города, для чего требуется на основе существующей статистики ДТП и натуральных данных об интенсивностях транспортных, пассажирских и пешеходных потоков определить существующие предельные значения ущерба от ДТП и частоты их возникновения в расчете на одного жителя города.

Для этого потребуется рассматривать отдельно по каждой зоне предельную пропускную способность полосы движения. Различные по величине пропускные способности полос движения для каждой из рассматриваемых зон определены в результате анализа результатов расчета теоретической пропускной способности полосы движения в зонах с учетом технических средств организации и регулирования дорожного движения.

Вред, наносимый каждому жителю функционирующей в городе транспортной системой, можно ограничить абсолютными показателями, измеряемыми в Вт · ч для шумового воздействия (ШВ) и граммах загрязняющих веществ выбросов автомобильного транспорта, попавших в легкие человека.

Для постановки ограничений требуется провести ряд дополнительных исследований:

1) исследовать уровни шумового загрязнения и загрязнения атмосферного воздуха выбросами автомобильного транспорта:

а) построить картограмму шумового загрязнения территории города;  
б) построить картограмму загрязнения атмосферы города выбросами автомобильного транспорта;

2) построить зависимости шумового загрязнения территории города в течение суток; построить три диаграммы шумового загрязнения (в течение дня, вечера, ночи);



3) определить количество людей, находящихся в каждой исследуемой зоне в течение трех периодов дня;

4) найти объем среднего вреда, приходящегося на одного человека, получаемого им в течение суток от функционирования транспортной системы (в Вт · ч ШВ и в граммах ЗВ);

5) найти предельное значение вреда (правую часть ограничений) в зависимости от количества людей, пребывающих в зоне, в течение дня и умноженного на средний вред по городу за период;

6) для постановки ограничений по предельным рискам ДТП необходимо определить расчетную пропускную способность полосы движения для каждой из зон.

На основании транспортного анализа городской территории разделим ее на 10 транспортных зон:  $r = 1, 2, \dots, 10$ . Все зоны сгруппируем в четыре типа:

1) городской центр (зона 1). Для зон данного типа характерна максимальная деловая активность;

2) центральные районы, прилегающие к городскому центру (зоны 2–5). Для зон данного типа характерна преобладающая высотная застройка и многофункциональное использование территории;

3) удаленные районы (зоны 6–8). Зоны данного типа имеют собственные центры деловой и социальной активности. Перспектива – преобразование данных участков в самодостаточные поселения и их автономизация;

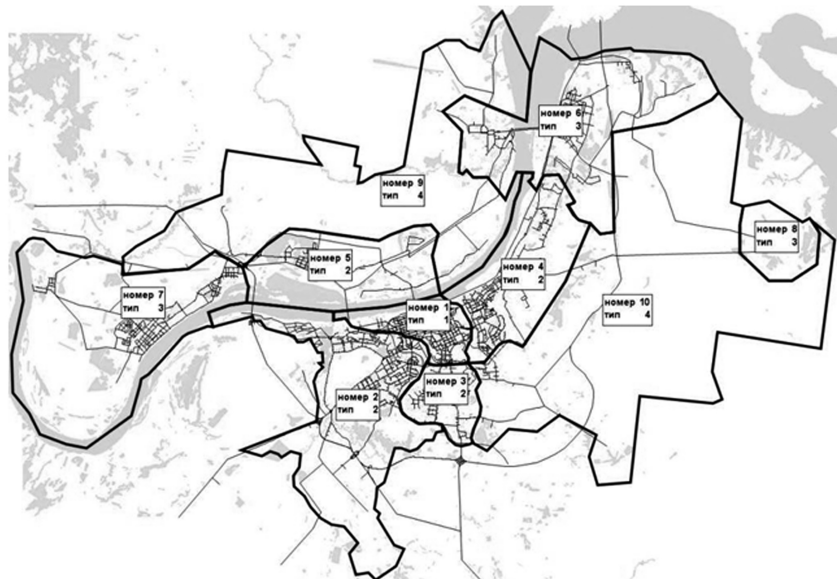


Рис. 4.5. Границы исследуемых зон в городе Перми

4) обширные участки с низкой плотностью населения (малоэтажные строения) (зоны 9, 10).

Для перечисленных зон будем назначать необходимые ограничения и искать оптимальные объемы перемещений различными видами транспорта и различными способами.

### Ограничение по транспортному спросу

Смысл введения ограничений по транспортному спросу определен назначением транспортной системы. Основным и самым главным условием эффективного ее функционирования является полное удовлетворение имеющегося на территории транспортного спроса. Ограничения по транспортному спросу обусловлены транспортной зависимостью территории, которая определяет объем существующего на ней транспортного спроса. Этот объем представляет собой так называемые «нижние» ограничения в модели функционирования транспортной системы, связанные с существующим транспортным спросом.

Структурная схема постановки ограничений по транспортному спросу представлена на рис. 4.6. При постановке ограничений используется введенное в разделе 3.2 главы 3 понятие «транспортная зависимость территории».

**Постановка ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях в общем виде.** Ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях будут иметь следующий вид:

$$f(X_{rsk}, l_{rs}) \geq G_{rs}, \quad (4.20)$$

где  $l_{rs}$  – средневзвешенная по количеству людей длина доли корреспонденций, проходящих через зону  $r$  по типу  $s$  (км);  $X_{rsk}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел.;  $f(X_{rsk}, l_{rs})$  – некоторая функция от указанных параметров, характеризующая объем перемещений;  $G_{rs}$  – транспортная зависимость области исследования  $r$  по типу  $s$  в сутки, чел. · км.

Кроме того, функция  $f$  должна быть предпочтительно линейного вида относительно переменных  $X_{rsk}$ .

**Постановка левой части ограничения.** Левая часть ограничения будет иметь следующий вид:

$$f(X_{rsk}, l_{rs}) = l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3}, \quad (4.21)$$

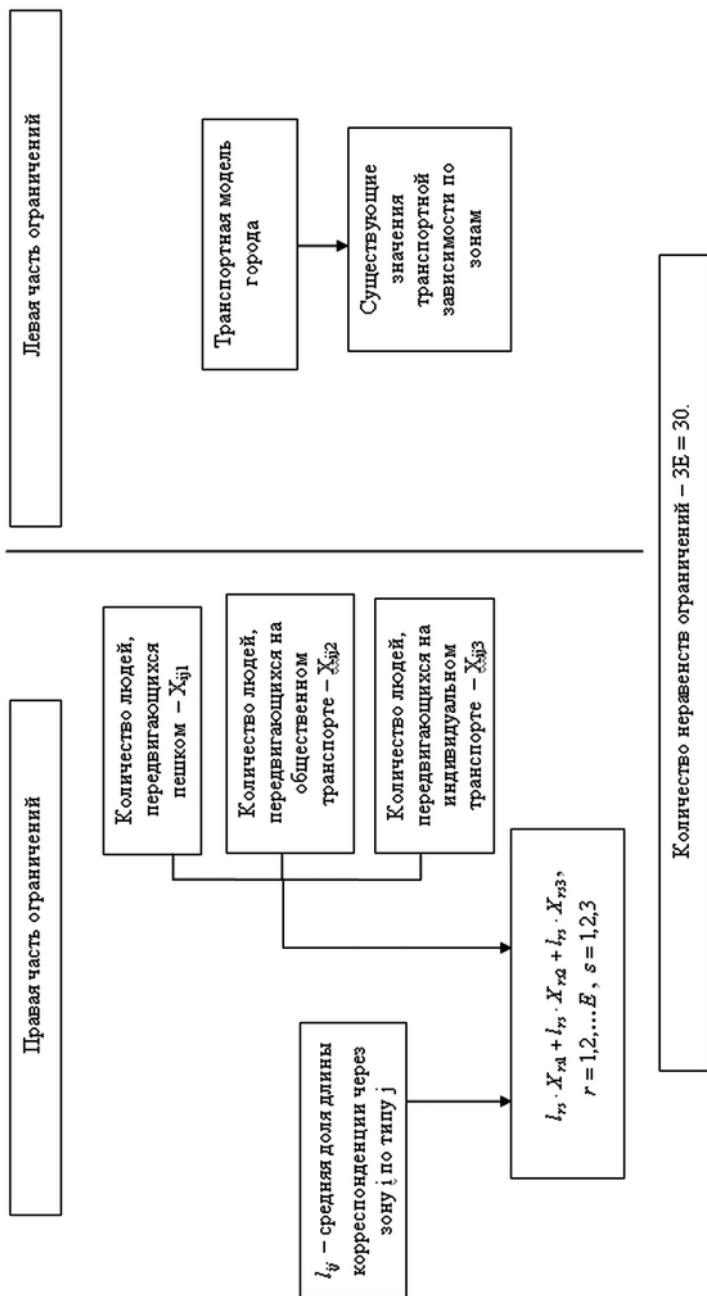


Рис. 4.6. Структурная схема постановки ограничений по транспортному спросу

где  $l_{rs}$  – среднее значение длин долей всех корреспонденций, проходящих через область исследования  $r$  по типу  $s$  (км);  $X_{rsk}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел.

Типы длин долей корреспонденций  $l_{rs}$  изображены на рис. 4.7.

$l_{rs}$  рассчитывается как

$$l_{rs} = \frac{\sum_{i,j} l_{ijrs} k_{ijrs}}{\sum_{i,j} k_{ijrs}}, \quad (4.22)$$

где  $l_{rs}$  – средневзвешенная по количеству людей длина доли корреспонденций, проходящих через зону  $r$  по типу  $s$ , км;  $l_{ijrs}$  – длина доли корреспонденций из района  $i$  в район  $j$ , проходящих через зону  $r$  по типу  $s$ , км (рис. 4.7);  $k_{ijrs}$  – количество корреспонденций из района  $i$  в район  $j$ , проходящих через зону  $r$  по типу  $s$  в сутки, чел.

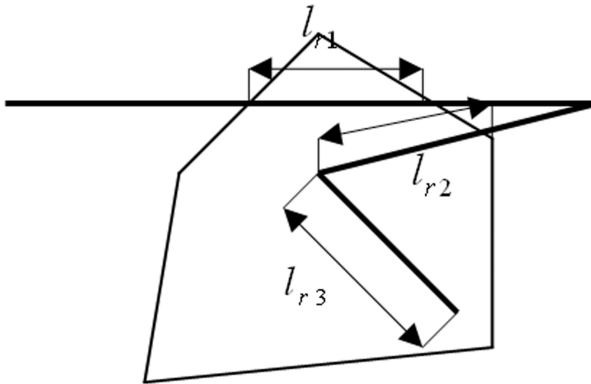


Рис. 4.7. Типы прохождения корреспонденций через зону

**Постановка правой части ограничения.** В качестве правой части ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях используется значение параметра транспортной зависимости территории для исследуемой зоны  $G_{rs}$ . Подробнее методика расчета этого параметра описана в главе 3.

Постановка ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях для модели города Перми.

Значения параметров  $G_{rs}$  и  $l_{rs}$  для Перми получены из его прогноз-ной транспортной модели и приведены в табл. 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2

Значения параметров  $G_{rs}$  для города Перми

Номер зоны	Тип прохождения	$G_{rs}$ , чел·км	Переменная правой части
1	AB	519 339,74	$G_{11}$
	BC	1 716 040,70	$G_{12}$
	CD	158 831,35	$G_{13}$
2	AB	858 295,45	$G_{21}$
	BC	2 988 937,70	$G_{22}$
	CD	894 427,16	$G_{23}$
3	AB	168 594,20	$G_{31}$
	BC	1 263 217,21	$G_{32}$
	CD	113 051,18	$G_{33}$
4	AB	395 748,50	$G_{41}$
	BC	1 831 469,25	$G_{42}$
	CD	433 986,51	$G_{43}$
5	AB	576 649,42	$G_{51}$
	BC	1 495 145,96	$G_{52}$
	CD	129 690,90	$G_{53}$
6	AB	244 201,37	$G_{61}$
	BC	1 405 037,59	$G_{62}$
	CD	520 286,20	$G_{63}$

Окончание табл. 4.2

Номер зоны	Тип прохождения	$G_{rs}$ , чел.·км	Переменная правой части
7	AB	166 619,34	$G_{71}$
	BC	1 352 256,44	$G_{72}$
	CD	688 103,26	$G_{73}$
8	AB	0,00	$G_{81}$
	BC	382 821,44	$G_{82}$
	CD	0,10	$G_{83}$
9	AB	859 473,78	$G_{91}$
	BC	398 349,97	$G_{92}$
	CD	5 012,87	$G_{93}$
10	AB	1 515 830,25	$G_{10-1}$
	BC	238 742,42	$G_{10-2}$
	CD	4 930,00	$G_{10-3}$

Таблица 4.3

Значения параметров  $l_{rs}$  для города Перми

Номер зоны	Доли длин корреспонденций, км		
	транзитных $l_{r1}$	пограничных $l_{r2}$	внутренних $l_{r3}$
1	6,70	4,37	1,82
2	9,80	5,77	3,47
3	7,12	4,50	2,08
4	10,12	5,63	2,73
5	12,48	7,88	4,16
6	15,17	8,10	3,87
7	20,72	9,43	3,46
8	0,10	14,45	0,10
9	14,87	5,94	3,05
10	11,23	5,92	5,31

Приведенные в табл. 4.2 и 4.3 значения коэффициентов правой и левых частей ограничений по транспортному спросу будут использованы при построении математической модели оптимизационной задачи для города Перми.

### Ограничение по протяженности существующей УДС

Ограничение по протяженности существующей улично-дорожной сети является территориальным ограничением на существующее транспортное предложение. Подобные ограничения определяют предложение дорожно-транспортного комплекса с точки зрения возможности удовлетворения имеющегося транспортного спроса. Использование указанного ограничения в постановке оптимизационной задачи связано с тем, что территория – один из важнейших ресурсов в условиях города. В качестве ограничения будет использоваться существующая протяженность УДС города, поэтому ограничение по ее протяженности – единственное жесткое ограничение в оптимизационной задаче. Параметры УДС любого города хорошо формализованы и являются основой при формировании графа сети в построении прогнозных транспортных моделей.

Структурная схема постановки ограничений по протяженности существующей улично-дорожной сети представлена на рис. 4.8. При постановке данного вида ограничений используются такие понятия, как «плотность транспортного потока» и «средняя вместимость транспортного средства».

**Постановка ограничения по протяженности существующей УДС в общем виде.** Ограничение по транспортному предложению для области исследования имеет вид:

$$f(X_{rsk}, p_k, w_k) \leq L_r, \quad (4.23)$$

где  $p_k$  – плотность транспортного потока типа  $k$ , ТС/км;  $w_k$  – вместимость ТС типа  $k$ , чел./ТС;  $X_{rsk}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел.;  $f(X_{rsk}, p_k, w_k)$  – некоторая функция от указанных параметров, характеризующая необходимый объем УДС;  $L_r$  – суммарная длина всех полос движения проезжих частей улиц и дорог в области  $r$ .

Функция  $f$  должна быть предпочтительно линейного вида относительно переменных  $X_{rsk}$ .

**Постановка левой части ограничения.** В общем виде левая часть ограничения будет иметь вид:

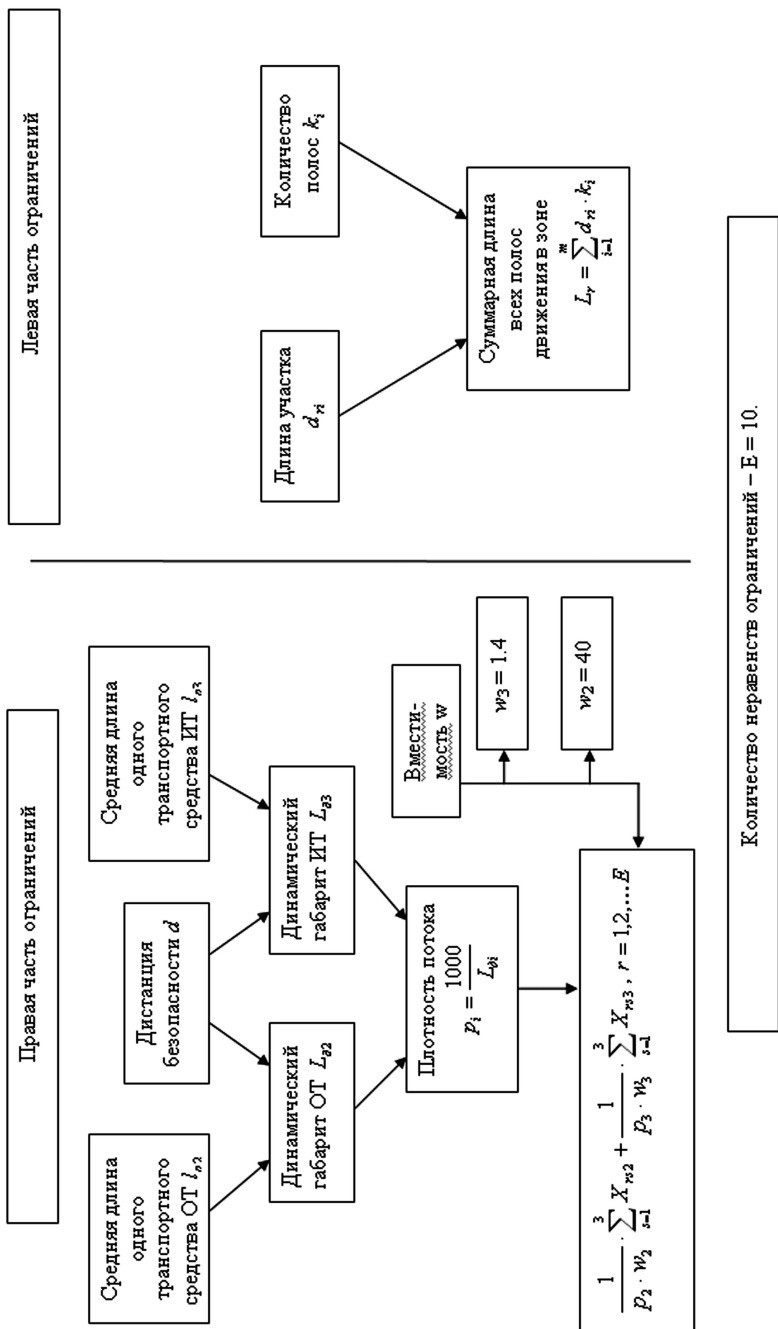


Рис. 4.8. Структурная схема постановки ограничения по протяженности существующей улично-дорожной сети



$$f(X_{rsk}) = \frac{1}{p_2 w_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{p_3 w_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3}, \quad (4.24)$$

где  $L_r$  – суммарная длина всех полос движения проезжих частей улиц и дорог в области  $r$ ;  $p_2$  – плотность транспортного потока для ОТ, ТС/км;  $p_3$  – плотность транспортного потока для ИТ, ТС/км;  $w_2$  – вместимость ТС ОТ, чел/ТС;  $w_3$  – вместимость ТС ИТ, чел/ТС;  $p_2, p_3$  – максимальные плотности транспортных потоков для общественного и индивидуального транспорта соответственно. Значение  $p_i$  определяется по формуле:

$$p_i = \frac{1000}{L_{oi}}, \quad (4.25)$$

где  $L_{oi}$  – динамический габарит транспортного средства  $i$ -го вида, включает в себя длину транспортного средства  $l_a$  (м) и дистанцию безопасности  $d$  (м).

$$L_{oi} = l_a + d_i. \quad (4.26)$$

Дистанция безопасности  $d$  (м) рассчитывается по формуле:

$$d_i = v_i \cdot t + \frac{v_i^2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right), \quad i = 2, 3, \quad (4.27)$$

где  $v_i$  – скорость движения транспортного потока типа  $i$  (м/с);  $v_2$  – скорость движения ОТ, м/с;  $v_3$  – скорость движения ИТ, м/с;  $t$  – время реакции водителя, с;  $j_1, j_2$  – замедление впереди едущего автомобиля и следующего за ним соответственно (м/с<sup>2</sup>).

Таким образом,

$$p_i = \frac{1000}{l_a + v_i \cdot t + \frac{v_i^2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right)}. \quad (4.28)$$

Левая часть ограничения примет вид:

$$\begin{aligned}
 f(X_{rsk}) = & \frac{1}{1000} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \\
 & \frac{w_2}{l_a + v_2 \cdot t + \frac{v_2^2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right)} \\
 & + \frac{1}{1000} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \cdot \quad (4.29) \\
 & \frac{w_3}{l_a + v_3 \cdot t + \frac{v_3^2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right)}
 \end{aligned}$$

**Постановка правой части ограничения.** Суммарная длина всех полос движения на УДС города (значение  $L_r$ ) определяется по формуле:

$$L_r = \sum_{i=1}^m d_{ri} \cdot k_i, \quad (4.30)$$

где  $d_{ri}$  – длина  $i$ -го участка сети в области исследования  $r$ , км;  $k_i$  – количество полос, соответствующее  $i$ -му участку;  $m$  – количество участков УДС в области.

**Постановка ограничения по протяженности существующей УДС для модели города Перми.** Значения  $L_r$ , рассчитанные для существующего состояния транспортного предложения для каждой зоны, приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Суммарная длина всех полос движения проезжих частей по зонам

Номер зоны	$L_r$ , км
1	301,098
2	473,328
3	129,390
4	261,613
5	151,266
6	229,257
7	228,690
8	12,705
9	83,828
10	117,013

Рассчитаем значения параметров для левой части ограничения: на основании натуральных замеров для индивидуального транспорта значения  $j_1$  и  $j_2$  равны соответственно 3 и 2,8 м/с<sup>2</sup>.

Среднюю длину легкового автомобиля примем равной 4,3 м, среднюю длину единицы общественного транспорта – 12 м. Для общественного транспорта значения  $j_1$  и  $j_2$  равны соответственно 2,8 и 1 м/с<sup>2</sup>.

По данным натуральных обследований скоростей, скорости движения транспортного потока равны:

индивидуальный транспорт – 24 км/ч (7,5 м/с);

общественный транспорт – 18 км/ч (5 м/с).

Время реакции водителя равно 1 с.

Таким образом, плотность транспортного потока ИТ при скорости 24 км/ч равна:

$$p_3 = \frac{1000 \text{ м}}{4,3\text{ м} + 7,5\text{ м/с} \cdot 1\text{ с} + \frac{(7,5\text{ м/с})^2}{2} \left( \frac{1}{2,8\text{ м/с}^2} \cdot \frac{1}{3\text{ м/с}^2} \right)}. \quad (4.31)$$

Плотность транспортного потока ОТ при скорости 18 км/ч равна:

$$p_2 = \frac{1000 \text{ м}}{12\text{ м} + 5\text{ м/с} \cdot 1\text{ с} + \frac{(5\text{ м/с})^2}{2} \left( \frac{1}{1\text{ м/с}^2} - \frac{1}{2,8\text{ м/с}^2} \right)}. \quad (4.32)$$

По результатам анализа проведенных натуральных обследований загрузки транспортных средств примем следующие значения для  $w$ :

$$w_2 = 40 \text{ чел./ТС},$$

$$w_3 = 1,4 \text{ чел./ТС}.$$

Тогда ограничение по территории будет иметь вид:

$$\frac{1}{1000\text{ м}} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{12\text{ м} + 5\text{ м/с} \cdot 1\text{ с} + \frac{(5\text{ м/с})^2}{2} \left( \frac{1}{1\text{ м/с}^2} - \frac{1}{2,8\text{ м/с}^2} \right)} \cdot 40 \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r \quad (4.33)$$

$$+ \frac{1}{4,3\text{ м} + 7,5\text{ м/с} \cdot 1\text{ с} + \frac{(7,5\text{ м/с})^2}{2} \left( \frac{1}{2,8\text{ м/с}^2} - \frac{1}{3\text{ м/с}^2} \right)} \cdot 1,4 \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r$$

Значения  $L_r$  приведены в табл. 4.4.

**Учет наличия выделенных полос для движения общественного транспорта.** Последующий анализ решения двойственной модели оптимизационной задачи распределения транспортного спроса показал, что транспортной системе города не хватает основного ресурса – городского пассажирского транспорта общего пользования.

Самая большая двойственная оценка (теневая цена) зафиксирована у ограничения по количеству подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования. Тем не менее пуск дополнительного подвижного состава неоднозначно повлияет на целевую функцию, так как в этом случае следует прогнозировать падение скорости смешанного транспортного потока на УДС города. В связи с этим становится актуальным выделение полос для движения ОТ в составе УДС. Дерево целей увеличения количества подвижного состава ОТ приведено на рис. 4.9.

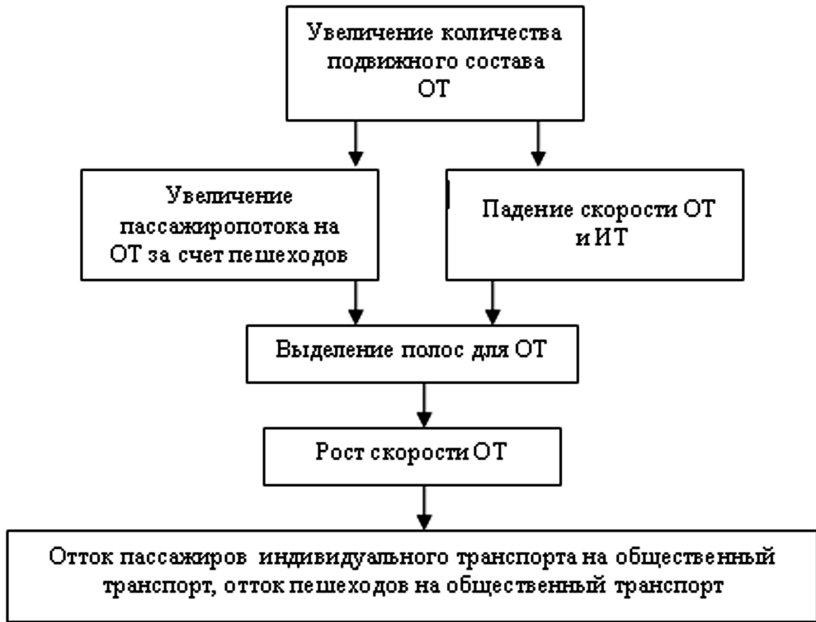


Рис. 4.9. Дерево целей увеличения количества подвижного состава ОТ

Параметры и количество выделенных полос для движения общественного транспорта также можно ввести в модель в виде отдельного ограничения, поэтому в модель вводится еще одно ограничение – по длине выделенных полос в зоне. Вид ограничения аналогичен ограничению по протяженности УДС:

$$\frac{1}{p_2' \cdot w_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \geq L_r', \quad (4.34)$$

где  $p_2'$  – плотность потока ОТ на выделенной полосе, она будет соответствовать максимальной плотности потока ОТ;  $L_r'$  – длина выделенных полос ОТ в зоне.

С учетом введенного ограничения в модели предлагается учитывать два показателя скорости движения ОТ: в общем потоке и на выделенной полосе.

Плотность потока ОТ на выделенной полосе  $p_2'$  будем рассчитывать как

$$p_2' = \frac{1000}{L_{oi}'}, \quad (4.35)$$

где  $L_{oi}'$  – динамический габарит транспортного средства ОТ на выделенной полосе, включает в себя длину транспортного средства  $l_a$  (м) и дистанцию безопасности  $d'$  (м):

$$L_{oi}' = l_a + d'. \quad (4.36)$$

Среднюю длину единицы общественного транспорта примем 12 м.

Дистанцию безопасности  $d'$  (м) рассчитываем по формуле [32, 75, 96]:

$$d' = v_2' \cdot t + \frac{v_2'^2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right), \quad (4.37)$$

где  $v_2'$  – скорость движения транспортного потока ОТ по выделенной полосе (м/с);  $t$  – время реакции водителя (с);  $j_1, j_2$  – замедление едущего впереди автомобиля и следующего за ним соответственно (м/с<sup>2</sup>).

Для общественного транспорта значения  $j_1$  и  $j_2$  равны соответственно 2,8 и 1 м/с<sup>2</sup>. Для движения по выделенной полосе скорость общественного транспорта примем равной скорости потока индивидуального транспорта – 24 км/ч (7,5 м/с). Время реакции водителя равно 1 с.

Плотность транспортного потока ОТ на выделенной полосе равна:

$$p_2' = \frac{1000 \text{ м}}{12 \text{ м} + 7,5 \text{ м/с} \cdot 1 \text{ с} + \frac{(7,5 \text{ м/с})^2}{2} \left( \frac{1}{1 \text{ м/с}^2} - \frac{1}{2,8 \text{ м/с}^2} \right)} = 26,6 \text{ авт./км.} \quad (4.38)$$

Ограничение по использованию выделенных полос примет вид:

$$\frac{1}{26,6 \cdot 40} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \geq L_r', \quad (4.39)$$

где  $X_{rs2}$  – количество людей, совершающих корреспонденции через зону  $r$  по типу  $s$  на ОТ;  $L_r'$  – длина выделенных полос ОТ в зоне.

К постановке ограничения по количеству выделенных полос есть несколько подходов. Самый правильный – делить корреспонденции ОТ по видам транспорта, с тем чтобы разделять при этом показатели – трамвайные пути, полосы для движения автомобильного транспорта общего пользования и общую проезжую часть. В этом случае придется выделять корреспонденции различных систем транспорта и в остальных ограничениях.

Однако такое увеличение количества переменных затрудняет проведение анализа результатов решения оптимизационной задачи, вследствие чего предлагаем использовать упрощенный подход к учету выделенных полос, не подразумевающий дополнительного разделения переменных по видам.

Данный подход подразумевает, что выделенные полосы (для движения автомобильного транспорта) должны использоваться на 100%, потому это ограничение в такой постановке будет «нижним».

### Ограничение по имеющемуся подвижному составу

Кроме территории, ограничения по транспортному предложению включают в себя ограничения, связанные с обеспеченностью городской транспортной системы подвижным составом общественного транспорта и наличием индивидуального транспорта у населения. Количество транспортных средств в собственности населения и подвижного состава общественного транспорта будут ограничениями и при оптимальном распределении транспортного спроса в транспортной системе города.

Структурная схема постановки ограничений по имеющемуся подвижному составу представлена на рис. 4.10. При постановке данного вида ограничений используются такие параметры, как средний пассажирооборот и коэффициент выхода подвижного состава на линию, а

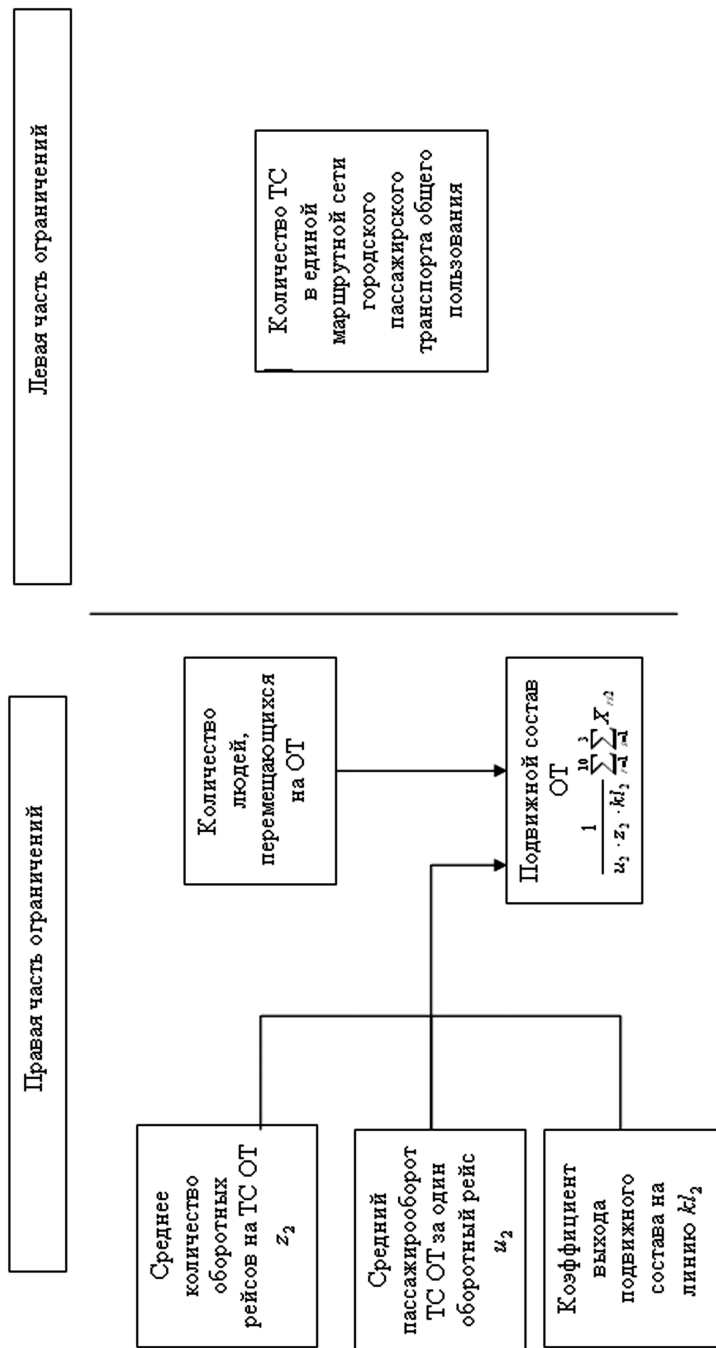


Рис. 4.10. Структурная схема постановки ограничений по имеющемуся подвижному составу ОТ

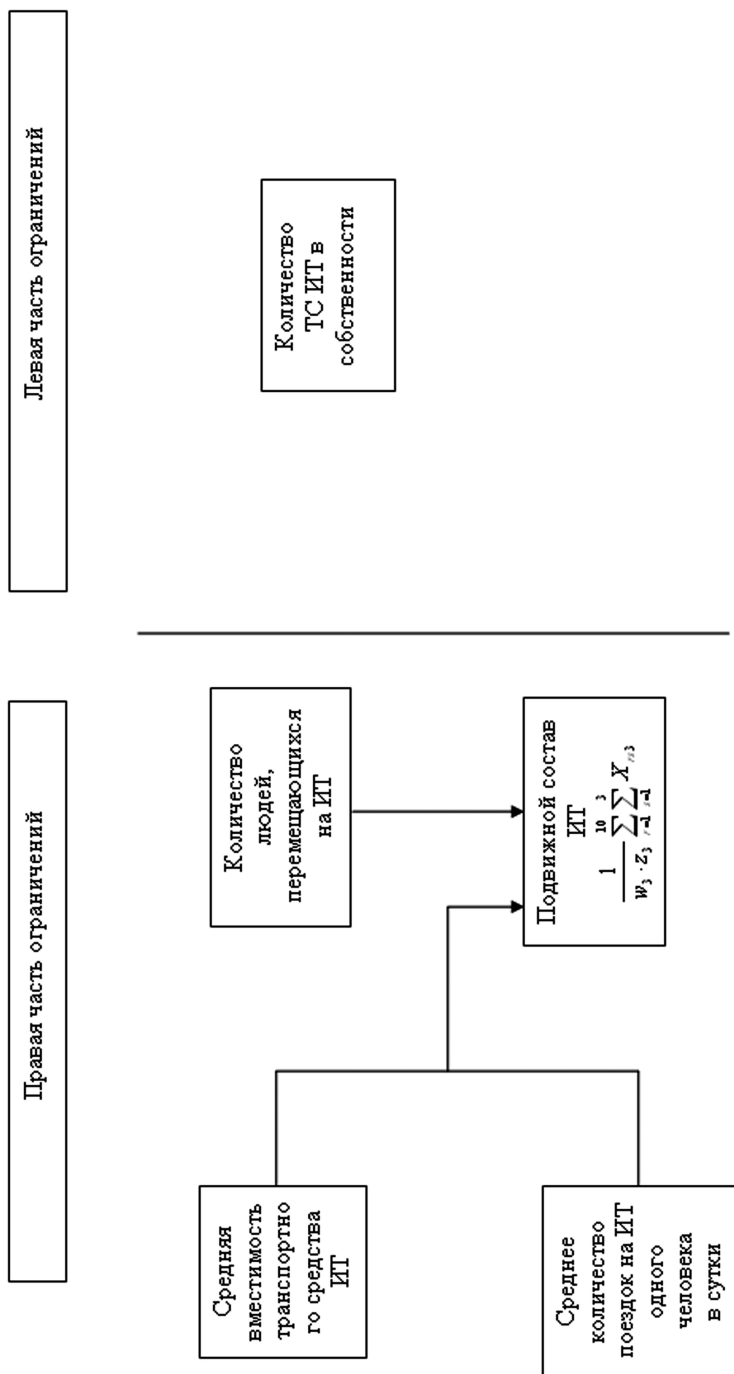


Рис. 4.11. Структурная схема постановки ограничений по имеющемуся подвижному составу индивидуальному транспорту



в качестве левой части – общее количество имеющегося подвижного состава.

Структурная схема постановки ограничений по имеющемуся подвижному составу индивидуального транспорта представлена на рис. 4.11. При постановке данного вида ограничений используются такие параметры, как средняя вместимость ТС индивидуального транспорта и среднее количество поездок на индивидуальном транспорте на одного человека в сутки, а в качестве левой части – общее количество индивидуальных транспортных средств, имеющихся в собственности у жителей исследуемой области.

### Постановка ограничения по подвижному составу в общем виде

В общем виде ограничение по имеющемуся подвижному составу будет следующим:

$$g(X_{rs2}, u_2, z_2, kl_2) \leq OT; \quad (4.40)$$

$$f(X_{rs3}, w_3, z_3) \leq ИТ, \quad (4.41)$$

где  $X_{rs2}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ОТ в сутки, чел.;  $X_{rs3}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ИТ в сутки, чел.; ОТ – количество единиц подвижного состава общественного транспорта, который используется в единой маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования, ТС; ИТ – количество зарегистрированного в городе индивидуального транспорта, ТС;  $u_2$  – средний пассажирооборот единицы транспортного средства общественного транспорта за один оборотный рейс, чел./рейс;  $z_2$  – среднее количество оборотных рейсов на единицу подвижного состава общественного транспорта в сутки, рейс/ТС;  $kl_2$  – коэффициент выхода подвижного состава на линию;  $w_3$  – средняя вместимость транспортного средства ИТ, чел./ТС;  $z_3$  – среднее количество поездок на ИТ одного человека в сутки, рейс.

$f(X_{rs3}, w_3, z_3)$ ,  $g(X_{rs2}, u_2, z_2, kl_2)$  – некоторые функции от указанных параметров, характеризующие количество подвижного состава.

**Постановка правой части ограничения.** В качестве правой части неравенств будут использоваться следующие параметры:

ОТ – количество единиц подвижного состава общественного транспорта, который используется в единой маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования, ТС;

ИТ – количество зарегистрированного в городе индивидуального транспорта, ТС.

Постановка левой части ограничения. Левая часть ограничения по имеющемуся подвижному составу будет иметь вид:

$$g(X_{rs2}) = \frac{1}{u_2 \cdot z_2 \cdot kl_2} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs2}; \quad (4.42)$$

$$f(X_{rs3}) = \frac{1}{w_3 \cdot z_3} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs3}, \quad (4.43)$$

где  $X_{rs2}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ОТ в сутки, чел.;  $X_{rs3}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ИТ в сутки, чел.; ОТ – количество единиц подвижного состава общественного транспорта, который используется в единой маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования, ТС; ИТ – количество зарегистрированного в городе индивидуального транспорта, ТС.

Требуется установить вид функций  $g$  и  $f$ . Для этого введем следующие параметры:

$u_2$  – средний пассажирооборот единицы транспортного средства общественного транспорта за один оборотный рейс, чел./рейс. Данная величина определяет параметры суточной неравномерности пассажиропотоков на маршрутах городского пассажирского транспорта общего пользования, а также уровень загрузки подвижного состава (чел./м<sup>2</sup>) в соответствии со стандартом качества перевозок;

$z_2$  – среднее количество оборотных рейсов на единицу подвижного состава общественного транспорта в сутки, рейс/ТС. Данная величина определяет общие параметры сети городского пассажирского транспорта общего пользования, такие как протяженность маршрута и скорость на линии;

$kl_2$  – коэффициент выхода подвижного состава на линию. Данная величина определяет эксплуатационные параметры использования подвижного состава парка транспортных средств городского пассажирского транспорта общего пользования.

Аналогично для индивидуального транспорта примем:

$w_3$  – средняя вместимость транспортного средства ИТ, чел./ТС. Данная величина определяет сложившуюся (наблюдаемую) в крупных городах степень использования индивидуального транспорта в ежедневных поездках в будний день;

$z_3$  – среднее количество поездок на ИТ одного человека в сутки, рейс;

В дальнейшем в модель будет включен также подвижной состав ОТ, который не входит в единую маршрутную сеть городского пассажирского транспорта общего пользования.

**Постановка ограничения по имеющемуся подвижному составу для города Перми.** Для города Перми приняты следующие значения параметров:

ОТ = 1000 ТС;

ИТ = 285000 ТС;

$u_2 = 100$  пасс./рейс;

$z_2 = 16$  рейсов;

$kl_2 = 0,8$ ;

$w_3 = 1,4$  чел./ТС;

$z_3 = 6$ .

Тогда для Перми ограничение примет вид:

$$\frac{1}{100 \cdot 16 \cdot 0,8} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \leq 1000, \quad (4.44)$$

$$\frac{1}{1,4 \cdot 6} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq 285000. \quad (4.45)$$

### Особенности построения энергетических ограничений

При построении энергетических ограничений используются понятия идеальной и реальной сети, схематичные изображения которой приведены на рис. 4.12–4.13 (см. цветную вклейку).

*Реальная сеть* – это физически существующая УДС, представленная в виде графа, ребрами которого являются дороги и улицы, узлами – перекрестки. Нагрузка участка реальной сети – это интенсивности транспортных потоков на данном участке.

*Идеальная сеть* – это сеть, узлами которой являются центры транспортных районов, а ребрами – воздушные линии, соединяющие их. Нагрузка участка идеальной сети – это количество корреспонденций, совершаемых между парой районов, центры которых служат началом и концом отрезка.

Необходимость использования терминов реальной и идеальной сети в ограничениях связана с тем, что переменные оптимизационной

задачи  $X_{rsk}$  определены в терминах идеальной сети. При этом энергетические ограничения строятся по принципу «не хуже, чем есть», поэтому правые части данных ограничений логичнее строить исходя из текущего анализа работы реальной УДС города. Далее, при расчете каждого из ограничений нужно учитывать не только размеры исследуемой зоны и протяженность ее УДС, но и население путем учета удельного вредного воздействия. При этом постановка ограничений также формируется по принципу «не хуже, чем сейчас».

Предложенный подход к расчету энергетических ограничений имеет ряд недостатков. В частности, он не учитывает количество жителей каждой из исследуемых зон, которые попадают под воздействие загрязняющих веществ, шума, риска ДТП.

При использовании данного подхода результаты расчета позволяют сделать вывод о том, что допустимый уровень шума или объем загрязняющих веществ в зоне 1 может быть больше, чем в зоне 9, имеющей меньшее население и меньшую площадь УДС при большей площади, то есть в действительности при равномерном распределении загрязнения по зоне 9 в пересчете на одного жителя объем вредного воздействия окажется меньше, чем в зоне 1.

Возможен альтернативный подход к расчету энергетических ограничений. Он включает в себя расчет удельного вредного воздействия на одного жителя зоны. При расчете каждого из ограничений нужно учитывать не только размеры исследуемой зоны и протяженность УДС данной зоны, но и население зоны, проводя учет удельного вредного воздействия. Расчет ограничений также выполняется по принципу «не хуже, чем сейчас».

### **Ограничение по загрязнению атмосферного воздуха**

Ограничение по загрязнению атмосферного воздуха относится к энергетическим ограничениям транспортного предложения. Несовершенство технологий преобразования энергии в двигателе внутреннего сгорания наносит вред окружающей среде и здоровью жителей городов.

При постановке ограничения по загрязнению атмосферного воздуха был использован комбинированный подход. Он включает в себя анализ существующих объемов выбросов автотранспорта загрязняющих веществ в городах.

В целях формирования ограничений на выбросы загрязняющих веществ на городских территориях был проведен комплекс расчетных экспериментов. Вычислительные эксперименты проводили с целью определения предельного объема движения, формирующего предельно допустимое загрязнение атмосферного воздуха в течение суток.

Возможен также прямой расчет правой части ограничения как существующего положения с загрязнением исследуемой территории, в этом случае ограничение соответствует принципу «не хуже, чем сейчас».

Структурная схема постановки ограничений по загрязнению атмосферного воздуха представлена на рис. 4.14. При этом используются такие параметры, как удельные значения энергии выбросов загрязняющих веществ, средняя доля длины корреспонденций в зоне, население зоны.

**Постановка ограничения по загрязнению атмосферного воздуха в общем виде.** Ограничение по загрязнению атмосферного воздуха в общем виде будет следующим:

$$f(X_{rsk}, l_{rs}, a_k) \leq D, \quad (4.46)$$

где  $X_{rsk}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел.;  $a_k$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км видом транспорта  $k$ , Дж/км/чел.;  $l_{rs}$  – средняя доля длины корреспонденции через зону  $r$  по типу  $s$ , км;  $f(X_{rsk}, l_{rs}, a_k)$  – некоторая функция от указанных параметров, характеризующая объем выбросов загрязняющих веществ;  $D$  – предельный суточный объем возможной утилизации энергии выбросов загрязняющих веществ на одного жителя города в сутки, Дж/чел.

**Постановка левой части ограничения по загрязнению атмосферного воздуха.** Левая часть ограничения по загрязнению атмосферного воздуха в общем виде будет следующей:

$$f(X_{rsk}) = a_1 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs1} + a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3}, \quad (4.47)$$

где  $X_{rs1}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  пешком в сутки, чел.;  $X_{rs2}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ОТ в сутки, чел.;  $X_{rs3}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ИТ в сутки, чел.;  $l_{rs}$  – средняя доля длины корреспонденции через зону  $r$  по типу  $s$ , км;  $a_k$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км видом транспорта  $k$ , Дж/км/чел.

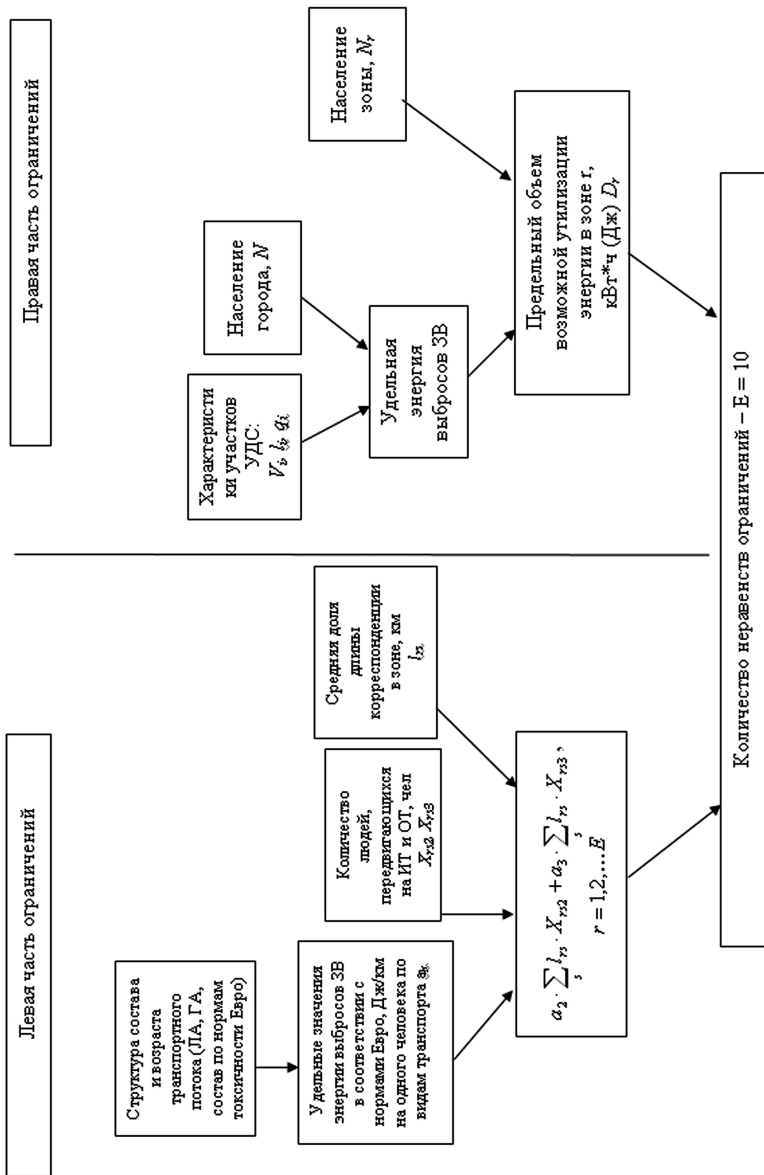


Рис. 4.14. Структурная схема постановки ограничений по загрязнению атмосферного воздуха

Для того чтобы получить значение энергии в пересчете на одного человека, левую часть неравенства разделим на количество жителей данной зоны:

$$f(X_{rsk}) = \frac{1}{N_r} \left( a_1 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs1} + a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \right), \quad (4.48)$$

где  $X_{rs1}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  пешком в сутки, чел.;  $X_{rs2}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ОТ в сутки, чел.;  $X_{rs3}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ИТ в сутки, чел.;  $l_{rs}$  – средняя доля длины корреспонденции через зону  $r$  по типу  $s$ , км;  $a_k$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км видом транспорта  $k$ , Дж/км/чел.;  $N_r$  – количество жителей зоны  $r$ , чел.

Для постановки левой части экологического ограничения необходимо произвести расчет коэффициентов  $a_2$  и  $a_3$ , которые отвечают за расход энергии при использовании индивидуального и общественного транспорта. Значение параметра  $a_1$  равно нулю. Для расчета значений коэффициентов  $a_2$  и  $a_3$  потребуются введение ряда параметров.

Рассчитаем массовый расход топлива, затрачиваемый определенным видом транспорта:

$$bm_i = u_i \cdot \rho, \quad (4.49)$$

где  $bm_i$  – массовый расход топлива, затрачиваемый определенным видом транспорта, кг/км;  $u_2$  – средний расход топлива ОТ, л/км;  $u_3$  – средний расход топлива ИТ, л/км;  $\rho$  – плотность топлива, составляет, кг/л.

Тогда расход энергии, затрачиваемой на 1 км пути, будет рассчитываться следующим образом:

$$am_i = \frac{bm_i}{b}, \quad (4.50)$$

где  $am_i$  – расход энергии, затрачиваемой на 1 км пути видом транспорта  $i$ , кВт · ч/км;  $bm_i$  – массовый расход топлива, затрачиваемый видом

транспорта  $i$ , кг/км;  $b$  – расход топлива на выработку 1 кВт · ч энергии, кг/кВт · ч.

Значение расхода энергии на перемещение одного человека на 1 км пути для ОТ составит:

$$a_2 = \frac{am_2}{w_2}, \quad (4.51)$$

где  $a_2$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км на ОТ, Дж/км/чел.;  $w_2$  – вместимость ТС ОТ, чел./ТС;

$am_2$  – расход энергии, затрачиваемой на 1 км пути ОТ, кВт · ч/км.

Значение расхода энергии на перемещение одного человека на 1 км пути для ИТ составит:

$$a_3 = \frac{am_3}{w_3}, \quad (4.52)$$

где  $a_3$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км на ИТ, Дж/км/чел.;  $w_3$  – вместимость ТС ИТ, чел./ТС;

$am_3$  – расход энергии, затрачиваемой на 1 км пути ИТ, кВт · ч/км.

Таким образом, в общем виде экологическое ограничение будет следующим:

$$\frac{1}{N_r} \left( \frac{\rho \cdot u_2}{b \cdot w_2} \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + \frac{\rho \cdot u_3}{b \cdot w_3} \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \leq D \quad (4.53)$$

или

$$\frac{1}{N_r} \left( a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \leq D. \quad (4.54)$$

**Постановка правой части ограничения по загрязнению атмосферного воздуха.** Правая часть ограничения ( $D$ ) определяет существующий объем утилизации энергии на одного жителя города, который рассчитывают по методике [140, 141].

Цель выполнения данного ограничения – не допустить увеличения объема утилизации энергии в расчете на одного жителя города по сравнению с существующим объемом.

Расчет объема утилизации энергии будем осуществлять по  $\text{NO}_x$ , так как оксиды азота являются одними из наиболее вредных веществ, по-



ступающих в атмосферу вместе с отработавшими газами автомобиля и прямо влияющих на качество окружающей атмосферы в зоне действия автомагистралей [64].

Для расчета  $D$  сначала необходимо найти общий объем выбросов  $\text{NO}_x$  транспортными потоками на территории города. Значение параметра  $D$  будет определяться как

$$D = \frac{D_{\text{NO}_x}}{N}, \quad (4.55)$$

где  $D_{\text{NO}_x}$  – масса выбросов  $\text{NO}_x$  в городе за сутки, г;  $N$  – количество жителей города, чел.

Величина  $D_{\text{NO}_x}$  будет равняться сумме эмиссий  $\text{NO}_x$  всех участков УДС города:

$$D_{\text{NO}_x} = \sum_{i=1}^T d_{\text{NO}_xi}, \quad (4.56)$$

где  $d_{\text{NO}_xi}$  – суточная эмиссия  $\text{NO}_x$   $i$ -го участка УДС, г/сутки;  $T$  – количество участков УДС в городе.

Величина  $d_{\text{NO}_xi}$  рассчитывается согласно методике [142], в соответствии с которой эмиссия одного автомобиля будет полиномиально зависеть от его скорости движения :

$$d_{\text{NO}_xi} = (a + b \cdot v_i + c \cdot v_i^2 + d \cdot v_i^3 + e \cdot v_i^4) l_i \cdot q_i, \quad (4.57)$$

где  $v_i$  – актуальная скорость движения на  $i$ -м участке УДС, км/ч;  $q_i$  – интенсивность транспортных потоков на  $i$ -м участке УДС, авт./сутки;

$l_i$  – длина  $i$ -го участка УДС, км.

Значения коэффициентов  $a, b, c, d, e$  для легкового транспорта и автобусов приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

**Значения коэффициентов для расчета эмиссии легкового автомобиля и автобуса**

Виды транспорта	Значения коэффициентов				
	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$
Легковой автомобиль	0,7586	0,028004	-0,00099187	0,000014276	0,000000056655
Автобус	24,216	-0,70194	0,015787	-0,00015996	0,000000717510

Таким образом, выражение для  $D$  примет следующий вид:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^T (a + b \cdot v_i + c \cdot v_i^2 + d \cdot v_i^3 + e \cdot v_i^4) \cdot l_i \cdot q_i}{N}. \quad (4.58)$$

Переведем полученную величину из граммов в джоули (Дж) и получим итоговый результат правой части ограничения по выбросам загрязняющих веществ:

$$D = k_{NOx} \frac{\sum_{i=1}^T (a + b \cdot v_i + c \cdot v_i^2 + d \cdot v_i^3 + e \cdot v_i^4) \cdot l_i \cdot q_i}{N}, \quad (4.59)$$

где  $D$  – удельная энергия, генерирующая выбросы  $NO_x$  транспортным потоком, приходящаяся на одного жителя города в сутки, Дж/чел.;  $N$  – количество жителей города, чел.;  $v_i$  – актуальная скорость движения на  $i$ -м участке УДС, км/ч;  $q_i$  – интенсивность транспортных потоков на  $i$ -м участке УДС, авт./сутки;  $l_i$  – длина  $i$ -го участка УДС, км;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – коэффициенты методики [142];  $k_{NOx}$  – коэффициент, характеризующий величину энергии, которую тратит автомобиль на выброс 1 г  $NO_x$ , Дж/г.

**Постановка ограничения по загрязнению атмосферного воздуха для города Перми.** Проведем расчет коэффициентов  $a_2$  и  $a_3$  для Перми. Значение параметра  $a_1$  равно нулю.

Примем следующие значения параметров:

$$u_2 = 30 \text{ л/100 км};$$

$$u_3 = 10 \text{ л/100 км};$$

$$\rho = 0,74 \text{ кг/л}.$$

Таким образом, для автобуса массовый расход топлива составит:

$$bm_2 = 30 \text{ л / 100 км} \cdot 0,74 \text{ кг/л} = 22,2 \text{ кг / 100 км} = 0,222 \text{ кг/км}.$$

Для легкового автомобиля массовый расход топлива составит:

$$bm_3 = 10 \text{ л/100 км} \cdot 0,74 \text{ кг/л} = 7,4 \text{ кг/100 км} = 0,074 \text{ кг/км}.$$

Расход энергии, затрачиваемой на 1 км пути, рассчитывают следующим образом:

$$am_i = \frac{bm_i}{b}, \quad (4.60)$$

Значение параметра  $b = 0,25$  кг/кВт·ч.

Таким образом, расход энергии автобусом на 1 км пути для ОТ составит:

$$am_2 = \frac{0,222 \text{ кг/км}}{0,25 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}} = 0,888 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км} . \quad (4.61)$$

Расход энергии легковым автомобилем на 1 км пути:

$$am_3 = \frac{0,074 \text{ кг/км}}{0,25 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}} = 0,296 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км} . \quad (4.62)$$

Переведем значения коэффициентов  $a_2$  и  $a_3$  в МДж:

$$am_2 = 0,888 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км} = 3,2 \text{ МДж/км}, \quad (4.63)$$

$$am_3 = 0,296 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км} = 1,06 \text{ МДж/км}. \quad (4.64)$$

Для пересчета значений коэффициентов на одного человека используем значение средней пассажироместности ТС ОТ  $w_2 = 40$  чел., среднюю наполненность ТС ИТ  $w_3 = 1,4$  чел.

Тогда значения  $a_2$  и  $a_3$  равны:

$$a_2 = \frac{3,2 \text{ МДж/км}}{40 \text{ чел.}} = 0,08 \frac{\text{МДж}}{\text{км}\cdot\text{чел.}}, \quad (4.65)$$

$$a_3 = \frac{0,296 \text{ МДж/км}}{1,4 \text{ чел.}} = 0,211 \frac{\text{МДж}}{\text{км}\cdot\text{чел.}} . \quad (4.66)$$

Значение  $D$  было рассчитано с помощью прогнозной транспортной модели города Перми, в которой были найдены суточные интенсивности и актуальные скорости движения транспортных потоков на УДС. Далее по методике был проведен расчет суточного объема энергии выбросов  $\text{NO}_x$  транспортными потоками. В результате получено следующее значение  $D$ :

$$D = 18,753 \text{ МДж/чел./сутки}.$$

Найденная величина  $D$  является суточным объемом энергии, который приходится на выбросы  $\text{NO}_x$  всем движущимся по УДС города Перми транспортом в расчете на одного жителя города. Значение

получено на основе данных о суточных интенсивностях транспортных потоков.

Таким образом, ограничение по загрязнению атмосферного воздуха для Перми будет иметь вид:

$$\frac{1}{N_r} (0,08 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + 0,757 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3}) \leq 18,753. \quad (4.67)$$

Значения  $l_{rs}$  для каждой зоны представлены в табл. 4.3 (см. выше).

### Постановка ограничения по шумовому воздействию

Ограничение по шумовому воздействию относится к энергетическим ограничениям по транспортному предложению. Работа с шумовым воздействием была разделена на два направления: анализ существующего шумового воздействия в Перми и постановка ограничения по этому показателю на одного жителя города.

В ходе анализа существующей ситуации с шумовым загрязнением от автотранспортных потоков были разработаны алгоритм для расчета количества населения, находящегося в зоне превышения ПДУ, и алгоритм построения полей шумового загрязнения.

При постановке ограничения в качестве правой части оптимальной модели было использовано существующее состояние шумового загрязнения территории в расчете на одного жителя.

Структурная схема постановки ограничений по шумовому воздействию представлена на рис. 4.15. При постановке данного вида ограничений используются такие параметры, как площадь шумового загрязнения в зоне и вместимость ТС.

**Постановка шумового ограничения в общем виде.** В общем виде шумовое ограничение будет иметь вид:

$$f(X_{rsk}, w_k) \leq SR, \quad (4.68)$$

где  $X_{rsk}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел.;  $w_k$  – средняя вместимость транспортного средства типа  $k$ , чел./ТС;  $f(X_{rsk}, w_k)$  – некоторая функция от указанных параметров, характеризующая объем шумового загрязнения территории;  $SR$  – среднее значение шумовой энергии, приходящейся на одного жителя города в сутки, Вт/чел.

**Постановка правой части шумового ограничения.** В качестве правой части ограничения будет использоваться фактическая энергия

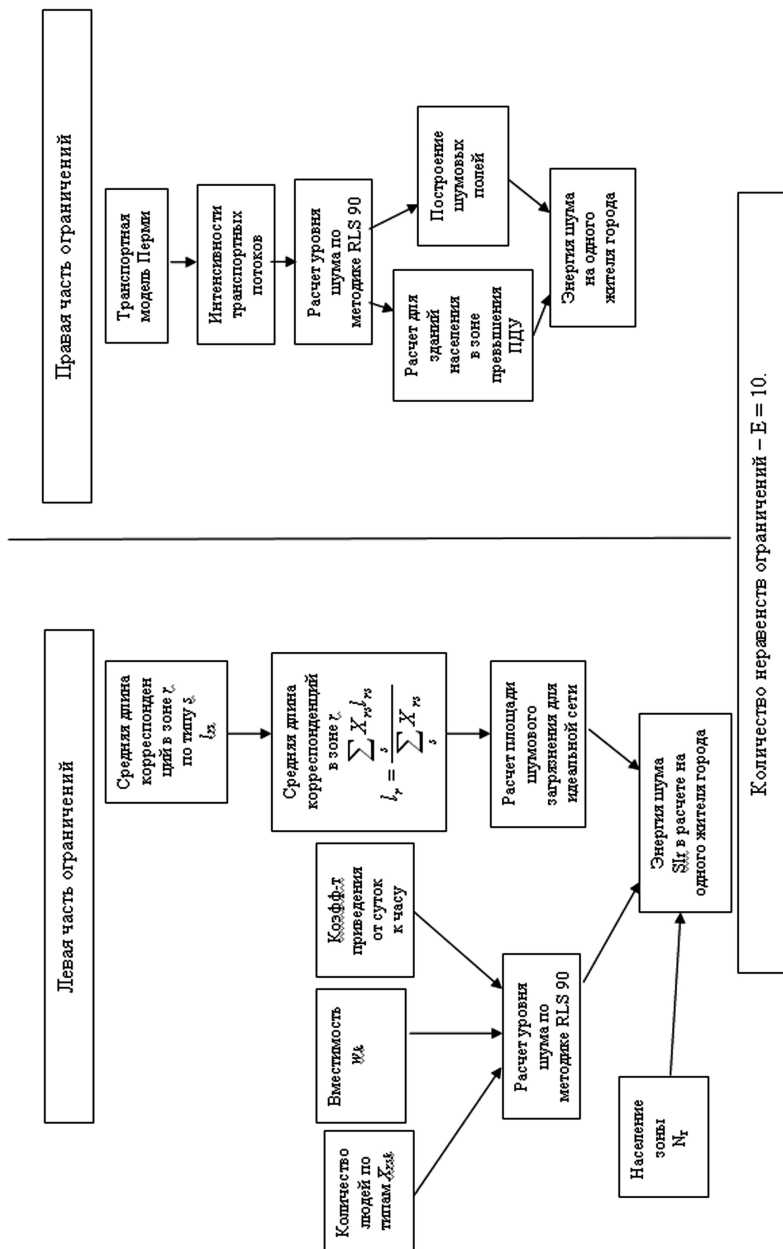


Рис. 4.15. Структурная схема постановки ограничений по шумовому воздействию

шума от транспортных потоков, рассчитанная для реальной сети, приходящаяся на одного жителя города. При этом решение оптимизационной задачи будет сводиться к тому, чтобы уменьшать общее время совершения корреспонденций, не увеличивая при этом среднюю шумовую нагрузку, приходящуюся на каждого жителя города.

Расчет уровня шума производится для каждого участка УДС на основе интенсивности транспортных потоков в периоды:

- дневной (с 7 до 19 часов),
- вечерний (с 19 до 23 часов),
- ночной (с 23 до 7 часов).

Для каждого участка реальной УДС подсчитан уровень шума  $l'_i$  по методике RLS (описание методики приведено для каждого периода):

$l_{Di}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в дневной период, дБА;

$l_{Ei}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в вечерний период дБА;

$l_{Ni}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в ночной период, дБА.

Далее для каждого отрезка сети был рассчитан средний уровень шума за период «день-вечер-ночь»:

$$L_{deni} = 10 \lg \frac{1}{24} (12 \cdot 10^{\frac{l_{Di}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{l_{Ei}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{l_{Ni}+10}{10}}), \quad (4.69)$$

где  $L_{deni}$  – средний уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети за период «день-вечер-ночь» в час, дБА;  $l_{Di}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в дневной период (за 12 часов), дБА;  $l_{Ei}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в вечерний период (за 4 часа), дБА;  $l_{Ni}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в ночной период (за 8 часов), дБА.

Для всей территории города были построены шумовые поля. С этой целью она была разбита сеткой с шагом 10 м, для каждого узла сетки рассчитан уровень шума в зависимости от уровня шума ближайших четырех участков УДС и расстояния до данных участков. Таким образом, для каждого узла сетки уровень шума рассчитывался как:

$$L_{xy} = \max(L_{xy1}, \dots, L_{xy4}) + \Delta(\max(L_{xy1}, \dots, L_{xy4}) - \min(L_{xy1}, \dots, L_{xy4})), \quad (4.70)$$

где  $L_{xy}$  – уровень шума в точке с координатами  $(x, y)$ , дБА;  $\Delta$  – функция, зависящая от разности уровней шума источников с самым большим и самым маленьким уровнем шума, дБА.

Значения  $\Delta$  в зависимости от значения разности приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

**Значения  $\Delta$  в зависимости от значения разности**

Разность уровней шума, дБА	0	1	2,5	4	6	10
Значение $\Delta$ , дБА	3	2,5	2	1,5	1	0,5

$L_{xyi}$  – уровень шума в точке с координатами  $(x, y)$  от  $i$ -го из четырех ближайших к данной точке участков УДС, дБА:

$$L_{xyi} = L_{deni} - 10 \log_{10} \frac{R_i}{7.5}, \quad (4.71)$$

где  $L_{deni}$  – средний уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети за период «день-вечер-ночь», дБА;  $R_i$  – расстояние от отрезка  $i$  до точки  $(x, y)$ , м.

В итоге была получена шумовая карта для всей территории города (рис. 4.16) (см. цветную вклейку).

Для каждого здания на территории города рассчитаем, какая доля жителей данного здания находится в зоне превышения ПДУ:

Для всех отрезков реальной сети необходимо определить расстояние, на котором шум не будет превышать ПДУ. В соответствии с «Методическими рекомендациями по оценке необходимого снижения звука у населенных пунктов и определению требуемой акустической эффективности экранов с учетом звукопоглощения», снижение уровня шума источника ( $L_{A_{pac}}$ ) с расстоянием равно:

$$L_{A_{pac}} = 10 \log_{10} \frac{R}{R_0}, \text{ дБА}, \quad (4.72)$$

где  $R$  – расстояние от акустического центра автотранспортного потока до расчетной точки, м;  $R_0 = 7,5$  м – для автотранспортных потоков.

Из данного соотношения можно выразить  $R$ :

$$R = R_0 \cdot 10^{\frac{L_{A_{рас}}}{10}}, \text{ м}, \quad (4.73)$$

где за  $L_{A_{рас}}$  примем разность между рассчитанным уровнем шума и ПДУ (45 дБА).

Для каждого отрезка строим через каждые 10 м лучи длиной  $R$  перпендикулярно отрезку, как показано на рис. 4.17:

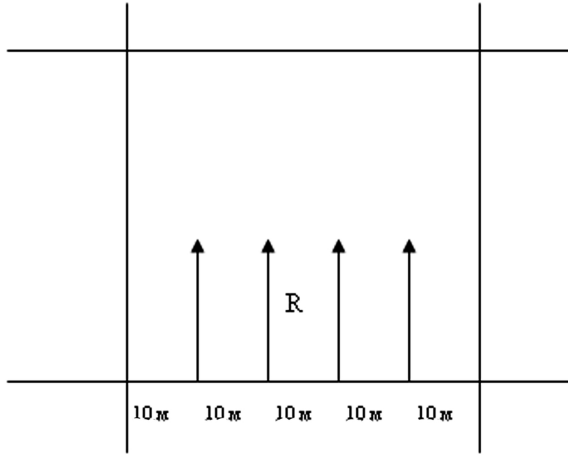


Рис. 4.17. Построение лучей перпендикулярно отрезку

Координаты начала и конца лучей определяют из следующих соотношений:

$$xl_{1i} = x_1 + 10 \cdot \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \cdot i; \quad (4.74)$$

$$yl_{1i} = y_1 + 10 \cdot \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \cdot i; \quad (4.75)$$

$$xl_{2i} = xl_{1i} + R \cdot \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}; \quad (4.76)$$

$$yl_{2i} = yl_{1i} + R \cdot \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}; \quad (4.77)$$



$$i = 1, \dots, N; \quad (4.78)$$

$$N = (L \operatorname{div} 10); \quad (4.79)$$

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (4.80)$$

где  $\operatorname{div}$  – операция целочисленного деления;  $(xl_{1i}, yl_{1i})$  – координаты начала  $i$ -го луча;  $(xl_{2i}, yl_{2i})$  – координаты конца  $i$ -го луча;  $(x_p, y_p)$  – координаты начала отрезка;  $(x_2, y_2)$  – координаты конца отрезка;  $L$  – длина отрезка;  $R$  – длина луча.

Для каждой точки отрезка, из которой выходит луч, ищем все здания, расстояние до центров которых не превышает  $R$ . Расстояние считаем по формуле:

$$l_i = \sqrt{(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2}, \quad (4.81)$$

где  $X, Y$  – координаты начала луча;  $x_i, y_i$  – координаты центра здания  $i$ .

Для найденных зданий проводим следующую операцию. Перебираем каждый луч из рассматриваемого отрезка и проверяем каждую сторону данных зданий, устанавливаем, пересекается ли сторона с рассматриваемым лучом. Для этого проверяем пересечение прямых, образующих сторону здания и луч. Если они пересекаются, необходимо определить, лежит ли точка пересечения внутри отрезка и внутри луча одновременно.

Для этого записываем оба уравнения прямых в виде:

$$1. A_1x + B_1y + C_1 = 0,$$

$$2. A_2x + B_2y + C_2 = 0.$$

1 – уравнение прямой луча длиной  $R$ ;

2 – уравнение прямой стороны здания.

Тогда координаты точки пересечения прямых:

$$x = -\frac{C_1B_2 - C_2B_1}{A_1B_2 - A_2B_1}, \quad (4.82)$$

$$y = -\frac{A_1C_2 - A_2C_1}{A_1B_2 - A_2B_1}. \quad (4.83)$$

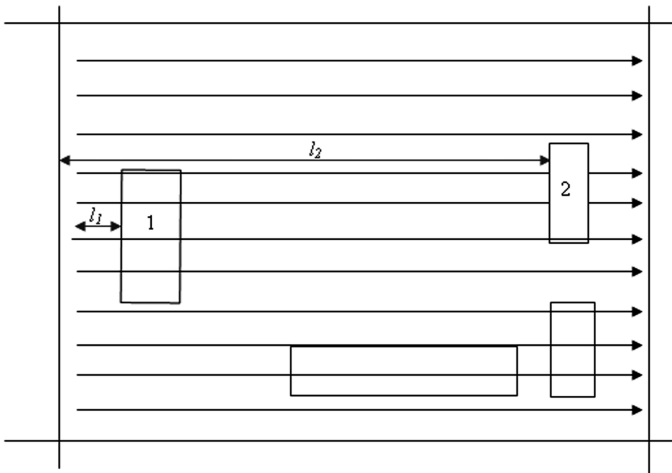
Нахождение точки внутри луча и стороны здания проверяем следующим образом. Определяем площади треугольников, образованных началом координат, точкой пересечения и одним из концов луча (стороны здания). Проверяем, равна ли сумма этих площадей площади треугольника, образованного началом координат и концами луча

(стороны здания). Если да, то вычисляем расстояние от начала луча до стороны здания:

$$l = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}, \quad (4.84)$$

где  $x, y$  – координаты точки пересечения луча и стороны здания;  $x_1, y_1$  – координаты начала луча.

Из всех сторон полигонов зданий выбираем ту, до которой расстояние от начала рассматриваемого луча наименьшее, и в свойствах данного здания увеличиваем значение параметра количества сторон, в которые приходят лучи ( $k_i$ , где  $i$  – идентификатор полигона здания), на единицу, также в свойствах стороны полигона (рис. 4.18).



**Рис. 4.18.** Выбор стороны здания и определение значения параметра количества сторон

$$l_1 < l_2 \Rightarrow k_2 := k_2 + 1$$

Переходим к следующим лучам поочередно. При этом исключаем из рассмотрения стороны полигонов зданий, которые пересек какой-либо из лучей.

Получаем для каждого полигона здания количество сторон, для которых превышен ПДУ, а также для каждой стороны – пересекает ее какой-либо луч или нет.

Считаем население в каждом здании, живущее в зоне превышения ПДУ, по формуле:

$$N' = N \cdot \frac{\sum_{i=1}^k l_i}{P}, \quad (4.85)$$

где  $N'$  – население здания, живущее в зоне превышения ПДУ;  $l_i$  – длина  $i$ -й стороны полигона здания, которую пересекает один из лучей;  $P$  – периметр полигона здания.

Суммируем  $N'$  по зонам.

В результате для каждого здания в городе определена доля населения, попадающего в зону превышения ПДУ (рис. 4.19, 4.20) (см. цветную вклейку).

Таким образом, для каждой точки территории города известен уровень шума  $L_{xy}$ , дБА, а для каждого здания – количество жителей, живущих в зоне превышения ПДУ. Требуется определить энергию шумового загрязнения в расчете на одного жителя города.

Для определения уровня шума на территории здания в зависимости от полученных значений в узлах регулярной сетки рассчитаем средний по площади уровень шума для каждого здания. Для этого найдем среднее значение уровня шума на его территории:

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^M L_{xyij}}{M}, \quad (4.86)$$

где  $L_i$  – уровень шума для  $i$ -го здания, дБА;  $L_{xyij}$  – уровень шума в  $j$ -й точке с координатами  $(x, y)$ , находящейся внутри здания  $i$ , дБА;  $M$  – количество узлов сетки с шагом 10 м внутри здания  $i$ .

Полученный уровень шума  $L_i$  для каждого здания из дБА переведем в Вт/м<sup>2</sup>. Уровень шума, измеряемый в Вт/м<sup>2</sup>, является удельной по площади мощностью шума. При расчете уровня шума в дБА в качестве эталонного уровня шума принят 10<sup>-12</sup> Вт/м<sup>2</sup>. Это означает, что рассчитанный уровень шума в 1 дБА соответствует 10<sup>-12</sup> Вт/м<sup>2</sup>. В связи с этим перевод из дБА в Вт/м<sup>2</sup> был произведен по формуле:

$$L_i^{\text{Вт}} = 10^{-12 + \frac{L_i}{10}}, \quad (4.87)$$

где  $L_i^{\text{Вт}}$  – уровень шума для здания  $i$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $L_i$  – уровень шума для здания  $i$ , дБА.

Для расчета абсолютного значения мощности шума для каждого здания надо рассчитать площадь, для которой будет производиться оценка уровня шума. Для зданий площадью шумового загрязнения это площадь зданий.

Таким образом, шумовое загрязнение в расчете на одного жителя города определяем следующим образом:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^K L_i^{Bm} \cdot S_i / N_i}{K}, \quad (4.88)$$

где  $L$  – энергия шума в расчете на одного жителя, Вт;  $L_i^{Bm}$  – уровень шума для  $i$ -го здания, Вт/м<sup>2</sup>;  $S_i$  – площадь основания  $i$ -го здания м<sup>2</sup>;  $N_i$  – количество жителей здания, живущих в зоне превышения ПДУ, чел.;  $K$  – количество жилых зданий в городе.

**Расчет левой части шумового ограничения.** Расчет коэффициентов для постановки левой части ограничений по шуму будем осуществлять по той же методике, по которой происходит расчет шума в прогнозной транспортной модели ([143, 144]). Отличие от расчета правой части ограничения будет в том, что левая часть строится в терминах идеальной сети.

В методике RLS 90 уровень шума рассчитывается как:

$$L = 37,5 + 10 \cdot \log_{10}(q), \quad (4.89)$$

где  $L$  – уровень шума на участке УДС на расстоянии 7,5 м от края проезжей части, дБА;  $q$  – часовая интенсивность, авт./ч.

При расчете левой части ограничения примем некоторые допущения:

1) вместо интенсивности потока будем использовать частное количество людей и вместимости введенных в модель подвижных единиц каждой из систем транспорта;

2) площадь полуцилиндров, характеризующих зону шумового загрязнения, будем строить для отрезков идеальной сети.

Тогда, с учетом допущения 1), выражение для уровня шума в дБА примет вид:

$$SI_r = 37,5 + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right), \quad (4.90)$$

где  $SI_r$  – общий уровень шума в зоне  $r$ , рассчитанный для идеальной сети, дБА на расстоянии 7,5 м;  $X_{rsk}$  – количество людей, передвигаю-

щихся в зоне  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$ , чел./сутки;  $r = 1..10$  – номера зон;  $s = 1..3$  – типы прохождения зон (транзит, въезд, внутреннее движение);  $k = 1..3$  вид транспорта (пешком, ОТ, ИТ);  $w_2$  – вместимость ТС типа 2 (ОТ);  $w_3$  – вместимость ТС типа 3 (ИТ).

Так как для расчета по методике требуется часовая интенсивность, будем использовать коэффициент приведения от суток  $dh$ :

$$SI_r = 37,5 + 10 \cdot \log_{10} \left( dh \cdot \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \right). \quad (4.91)$$

Полученная величина будет выражаться в дБА. Переведем ее в Вт/м<sup>2</sup>:

$$SI_r = 10^{-12 + \frac{37,5 + 10 \cdot \log_{10} \left( dh \cdot \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \right)}{10}}, \quad (4.92)$$

где  $SI_r$  – уровень шума в зоне  $r$ , рассчитанный для идеальной сети, Вт/м<sup>2</sup>.

Далее, с учетом допущения 2), для получения энергии шума нужно умножить получившееся выражение на площадь боковой поверхности эллиптического цилиндра  $s_r$ , построенного следующим образом:

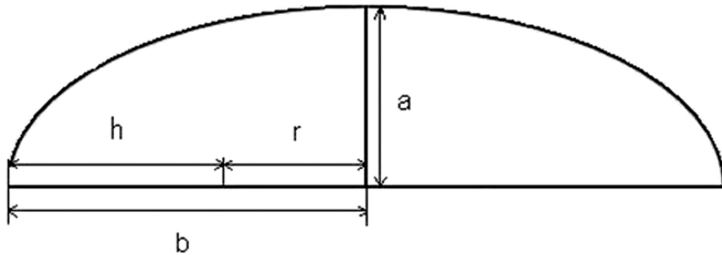
- в качестве образующей прямой цилиндра выбирается средняя длина корреспонденций в зоне  $l_r$ , то есть средняя длина отрезка идеальной сети. При этом используется допущение о том, что все корреспонденции в зоне совершаются по одному среднему отрезку идеальной сети;

- в качестве направляющей кривой цилиндра выбирается эллипс с малой полуосью, равной 7,5 м и большой полуосью, равной средней ширине проезжей части дороги + 7,5 м. Средняя ширина проезжей части в Перми составляет 1,12 полосы, или 3,92 м.

Высота цилиндра равняется средней длине корреспонденции в каждой зоне:

$$l_r = \frac{\sum_s X_{rs} l_{rs}}{\sum_s X_{rs}}, \quad (4.93)$$

где  $l_r$  – длина отрезка идеальной сети, равная средней длине корреспонденции в зоне  $r$ ;  $l_{rs}$  – средняя длина корреспонденции типа прохождения  $s$  в зоне  $r$ ;  $X_{rs}$  – фактическое количество людей, передвигающихся в зоне  $r$  по типу  $s$ .



**Рис. 4.21.** Сечение полуцилиндра

Вид полуцилиндра приведен на рисунке 4.21.

Обозначения:

$a$  – малая полуось эллипса, м;  $a = h = 7,5$  м;

$b$  – большая полуось эллипса, м;  $b = h + r = 7,5$  м +  $n \cdot 3,5$  м;

$r$  – ширина проезжей части, м;

$n$  – количество полос движения в одном направлении.

Площадь полуцилиндра будет равна:

$$s_r = \frac{1}{2} \pi \cdot (a + b) \cdot l_r, \quad (4.94)$$

где  $s_r$  – площадь полуцилиндров в зоне  $r$ ;  $a$  – малая полуось цилиндра;  $b$  – большая полуось цилиндра;  $l_r$  – длина отрезка идеальной сети, равная средней длине корреспонденции в зоне  $r$ .

$$l_r = \frac{\sum_s X_{rs} l_{rs}}{\sum_s X_{rs}}, \quad (4.95)$$

где  $l_{rs}$  – средняя длина корреспонденции типа прохождения  $s$  в зоне  $r$ ;  $X_{rs}$  – фактическое количество людей, передвигающихся в зоне  $r$  по типу  $s$ .

Далее мы должны получить значение шумовой энергии, приходящейся на одного жителя зоны. Для этого разделим левую часть на количество жителей зоны  $N_r$ .

Таким образом, получим следующие ограничения по шуму:

$$\frac{s_r}{N_r} \cdot 10^{-12 + \frac{37,5 + 10 \cdot \log_{10} \left( dh \cdot \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \right)}{10}} \leq SR. \quad (4.96)$$

Приведем неравенство к линейному виду:

$$\log_{10} 10^{-12 + \frac{37,5 + 10 \cdot \log_{10} \left( dh \cdot \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \right)}{10}} \leq \log_{10} \frac{SR \cdot N_r}{s_r}; \quad (4.97)$$

$$-12 + \frac{37,5 + 10 \cdot \log_{10} \left( dh \cdot \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \right)}{10} \leq \log_{10} \frac{SR \cdot N_r}{s_r}; \quad (4.98)$$

$$\log_{10} \left( dh \cdot \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \right) \leq \log_{10} \frac{SR \cdot N_r}{s_r} + 8,25; \quad (4.99)$$

$$\log_{10} \left( dh \cdot \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \right) \leq \log_{10} \frac{SR \cdot N_r}{s_r} + \log_{10} 10^{8,25} \quad (4.100)$$

$$\log_{10} \left( dh \cdot \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \right) \leq \log_{10} \left( \frac{SR \cdot N_r}{s_r} \cdot 10^{8,25} \right); \quad (4.101)$$

$$\frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \leq \frac{1}{dh} 10^{8,25} \cdot \frac{SR \cdot N_r}{s_r}; \quad (4.102)$$

$$\frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8,25}} \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \leq SR. \quad (4.103)$$

Полученное неравенство является линейным и может использоваться в постановке оптимизационной задачи.

**Постановка шумового ограничения для города Перми.** Для постановки левой части ограничения был проведен расчет площадей полуцилиндров  $s_r$ . Значения  $s_r$  приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Значения параметра  $s_r$  по зонам

Номер зоны	Значение параметра $s_r$ , м <sup>2</sup>
1	127 560,60
2	188 563,53
3	135 689,70
4	183 038,51
5	242 803,77
6	268 745,61
7	332 808,10
8	145 066,39
9	180 444,33
10	236 130,18

Расчет правой части ограничения проводили с помощью данных прогнозной транспортной модели Перми и получили характеристики участков УДС, а также интенсивности транспортных потоков.

В результате расчета получилось следующее значение шумовой энергии, приходящейся на одного жителя:

$$SR = 0,00006556 \text{ Вт/м}^2.$$

Стоит отметить, что полученное значение шумовой энергии, приходящейся на одного жителя, является средним за час. Для получения значения шумовой энергии за сутки полученное значение необходимо умножить на 24. Таким образом, для Перми суточное значение шумовой энергии на одного жителя составляет:

$$SR = 0,001573346 \text{ Вт/м}^2.$$

Величина  $SR$  представляет собой объем шумовой энергии, образуемой транспортными потоками, в расчете на одного жителя.

Таким образом, для города Перми ограничение по шумовому воздействию примет вид:

$$\frac{s_r \cdot 0,1}{N_r \cdot 10^{8,25}} \left( \frac{\sum X_{rs2}}{s} + \frac{\sum X_{rs3}}{1,4} \right) \leq 0,001573346. \quad (4.104)$$

**Сравнение алгоритмов расчета правой и левой частей при формировании шумового ограничения.** Главное отличие расчета правой и левой частей ограничения – разное суммирование энергетических ха-



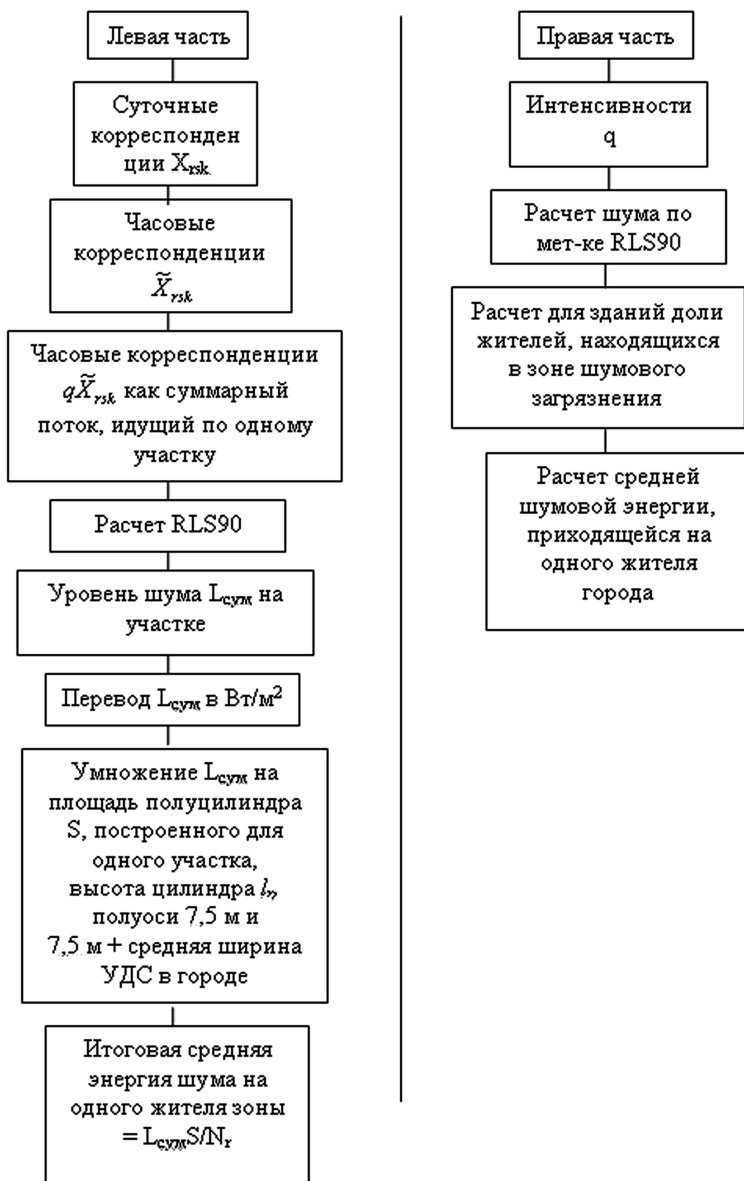


Рис. 4.22. Алгоритм расчета правой и левой частей ограничения

рактических характеристик. Разное суммирование связано с тем, что левая часть ограничения определена в терминах идеальной сети, а правая – в терминах реальной сети. Изобразим схематически алгоритмы расчета правой и левой частей ограничения (рис. 4.22).

Таким образом, в левой части сначала суммируется весь поток в зоне, а затем уровень шума в зоне. При этом используется допущение, что все корреспонденции через зону  $\tilde{X}_{rsk}$  совершаются по одному участку идеальной сети с длиной, равной средней длине корреспонденции в зоне  $l_r$  (рис. 4.23). Ширина данного участка равняется средней ширине участка на УДС города.

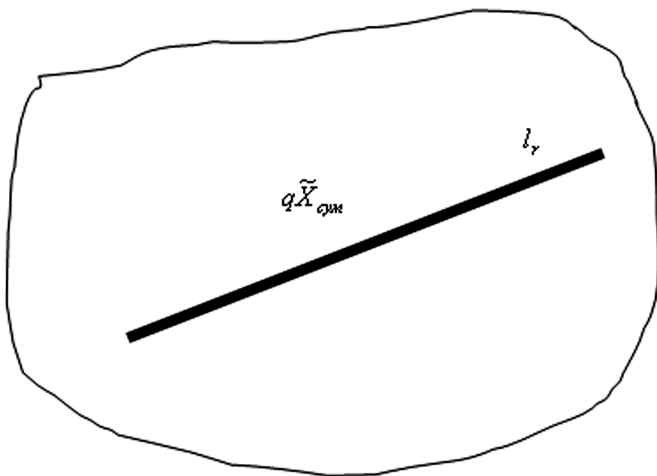


Рис. 4.23. Сеть для расчета шума для идеальной сети

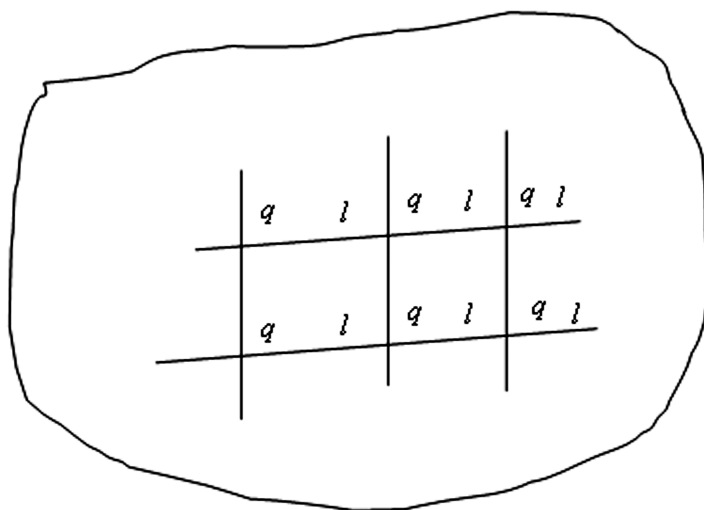


Рис. 4.24. Сеть для расчета шума для реальной сети

Именно для этого участка затем строится полуцилиндр, определяющий площадь территории, подвергающейся шумовому воздействию.

Так как принята гипотеза, что все корреспонденции  $\tilde{X}_{rsk}$  совершаются по одному участку, шумовое воздействие происходит вдоль этого участка. Площадь территории, попадающей в зону шумового воздействия, определяется через полуцилиндр, построенный для данного участка. Высота полуцилиндра равна  $l_r$ , оси полуцилиндра равны 7,5 м и 7,5 м + средняя ширина участка УДС города.

В правой же части, соответствующей реальной сети, сначала считается энергия шума для каждого участка УДС города (рис. 4.24).

Затем определяется доля населения в зоне шумового загрязнения и рассчитывается существующее среднее значение шумовой энергии, приходящейся на одного жителя города в сутки.

### Ограничения по рискам возникновения ДТП

Ограничение по рискам возникновения ДТП, как и ограничение по выбросам загрязняющих веществ и шумовому воздействию, относится к энергетическим ограничениям по транспортному предложению.

Оценка риска возникновения ДТП важна, так как при этом кинетическая энергия движущегося транспортного средства утилизируется в прямой вред жизни и здоровью человека, снижая качество жизни людей, отражаясь на самых первых и главных – физиологических и экзистенциальных потребностях людей. Кроме того, в случае сохранения безопасности участников дорожного движения при возникновении мелких ДТП энергия транспортного потока также тратится неэффективно: возникают заторы, которые влияют на функционирование всей транспортной системы города [145–147].

Введем следующие определения.

*Риск возникновения ДТП* – это качественная характеристика опасности попадания участников дорожного движения в ДТП. Понятие «риск» введем как прямую зависимость частотности возникновения ДТП и ущерба от них. Их произведение будет представлять собой риск возникновения ДТП.

*Частотность возникновения ДТП* – это вероятностная характеристика риска их возникновения. В расчете на одного человека этот показатель характеризует вероятность попадания одного человека в ДТП, произошедшие в рассматриваемой области за рассматриваемый период.

*Ущерб от ДТП* – это денежный эквивалент риска их возникновения. Совокупный ущерб определяется как средний ущерб от одного ДТП, умноженный на их количество. В расчете на одного человека ущерб от ДТП определяет в денежном эквиваленте приходящийся на одного жителя города ущерб от всех произошедших за рассматриваемый

мый период ДТП с учетом материального ущерба, а также количества погибших и раненых в ДТП.

Таким образом, риск ДТП будем оценивать по частотности их возникновения и ущербу от них. Частотность будет характеризовать вероятность реализации риска ДТП, а ущерб – последствия реализации риска ДТП.

При постановке ограничений по рискам возникновения ДТП оцениваются частотность их возникновения и ущерб от них для каждого из типов перемещения – пешком, на индивидуальном и общественном транспорте. При этом и частотность возникновения ДТП, и ущерб от них будут определяться в расчете на одного жителя города.

Правая часть ограничения по риску возникновения ДТП строится по принципу «не хуже, чем сейчас». Рассчитывается оценка существующих значений частотности возникновения ДТП и ущерба от них для одного жителя города с учетом имеющегося на сегодня разделения реализации транспортного спроса по типам транспорта.

Структурная схема постановки ограничений по риску возникновения ДТП представлена на рис. 4.25. При этом используются такие параметры, как средняя вместимость и скорость ТС.

**Постановка ограничения по риску возникновения ДТП в общем виде.** В общем виде ограничения по частотности возникновения ДТП и ущербу от ДТП будет иметь вид:

$$\begin{aligned} e(X_{rsk}, v_k, w_k) &\leq P, \\ g(X_{rsk}, v_k, w_k) &\leq U, \end{aligned} \quad (4.105)$$

где  $X_{rsk}$  – количество корреспонденций, совершаемых через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел.;  $v_k$  – скорость движения транспортного средства типа  $k$ , км/ч;  $w_k$  – средняя вместимость транспортного средства типа  $k$ , чел./ТС;  $P$  – частотность возникновения ДТП в расчете на одного жителя города, ДТП/чел./год;  $U$  – ущерб от ДТП в расчете на одного жителя города, руб./чел./год;

$e(X_{rsk}, v_k, w_k)$ ,  $g(X_{rsk}, v_k, w_k)$  – некоторые функции от указанных параметров, характеризующие частотности возникновения и ущерб от ДТП.

**Постановка левой части ограничения.** Левая часть ограничения имеет вид

$$\begin{aligned} e(X_{rsk}, v_k, w_k), \\ g(X_{rsk}, v_k, w_k). \end{aligned}$$

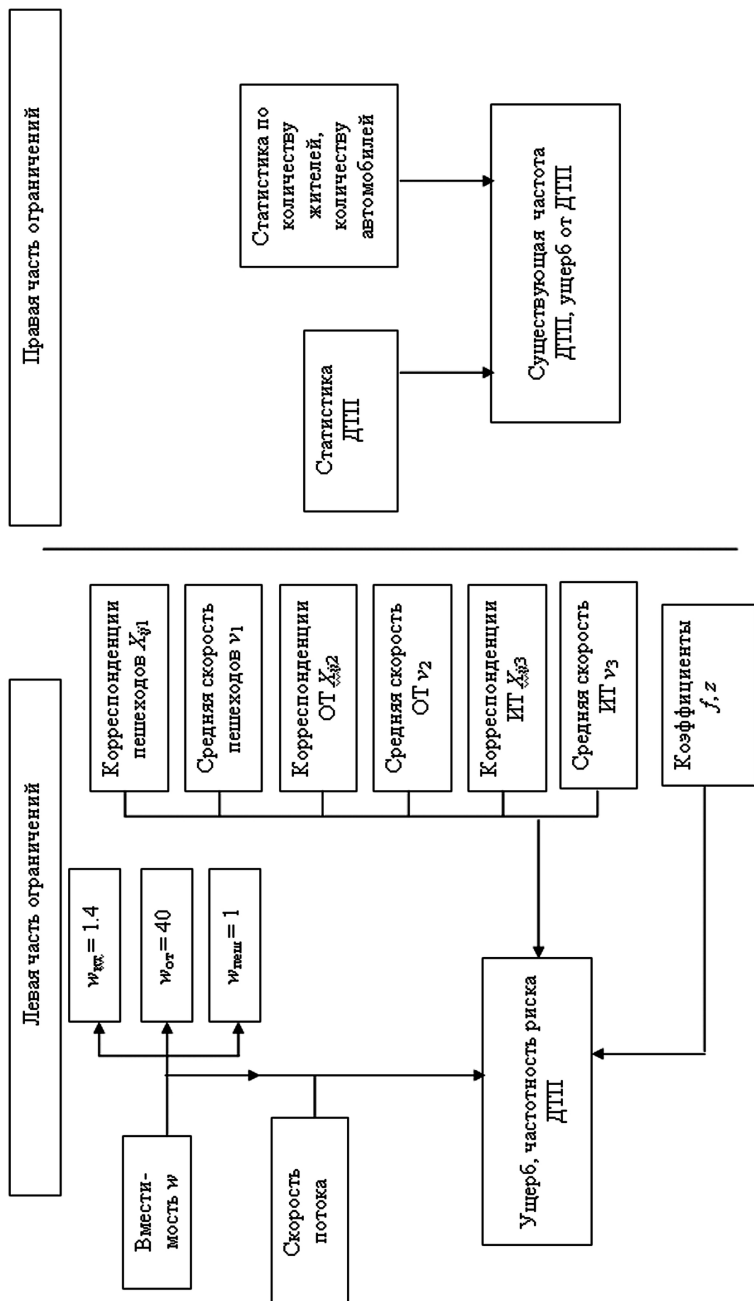


Рис. 4.25. Структурная схема постановки ограничения по риску возникновения ДТП

При определении конкретного вида ограничений примем гипотезу, что ограничение имеет линейный вид. Тогда необходимо ввести коэффициенты  $z$  и  $f_k$ , которые будут характеризовать частотность возникновения (коэффициент  $z$ ) и ущерб от ДТП (коэффициенты  $f_k$ ) в пересчете на единицу потока, так как общепринятой методики определения этих коэффициентов не существует. По смыслу эти коэффициенты будут аналогами коэффициентов  $a_k$  для экологического ограничения (количество энергии, затрачиваемой одной единицей ТП типа  $k$  на выброс 1 кг  $\text{NO}_x$ ).

Ограничение по риску ДТП определяет частотность их возникновения и величину ущерба от них в расчете на одного жителя города, поэтому необходимо добавить в ограничение зависимость от количества жителей, а также от количества пользователей ИТ и ОТ зоны.

Тогда ограничение будет иметь вид:

$$z \cdot \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \right) \leq P; \quad (4.106)$$

$$f_1 \cdot \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + f_2 \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + f_3 \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \leq U, \quad (4.107)$$

где  $P$  – частотность возникновения ДТП в расчете на одного жителя города, ДТП/чел./год;  $U$  – ущерб от ДТП в расчете на одного жителя города, руб./чел./год,  $X_{rsk}$  – количество корреспонденций, совершаемых через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$ , чел.;  $v_k$  – скорость движения транспортного средства типа  $k$ , км/ч;  $w_k$  – средняя вместимость транспортного средства типа  $k$ , чел./ТС;  $N_{1r}$  – количество жителей в зоне  $r$ , чел.;  $N_{2r}$  – количество пользователей ОТ в зоне  $r$ , чел.;  $N_{3r}$  – количество пользователей ИТ в зоне  $r$ , чел.;  $z$  – нормирующий коэффициент, характеризующий частотность возникновения ДТП в расчете на одно транспортное средство, км/ч/ТС;  $f_k$  – нормирующий коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП для корреспонденций, совершаемых на транспортном средстве типа  $k$  в расчете на одно транспортное средство, руб.· км/ч/ТС;  $s$  – тип прохождения через зону: транзит, въезд, внутреннее движение,  $s = 1, 2, 3$ .

Значения параметров  $z$  и  $f_k$  определяются на основании существующей статистики ДТП. Методика их расчета описана ниже.

**Постановка правой части ограничения.** Правые части ограничения характеризуют удельное отношение частотности и ущерба от ДТП на одного человека: для ОТ величина риска и ущерб в расчете на одного пассажира ОТ, для ИТ – в расчете на одного пользователя ИТ, для пешеходов – на одного жителя города.

Правая часть неравенства будет рассчитана по существующей ситуации на основе данных о местах концентрации ДТП, их количества и тяжести.

На рис. 4.26 (см. цветную вклейку) представлены места концентрации ДТП. К каждой точке их концентрации привязана следующая информация: общее количество ДТП, количество погибших, количество раненых.

На основе статистических данных будет рассчитан существующий ущерб от ДТП для каждой группы корреспонденций и найдены зависимости ущерба от существующего количества корреспонденций каждой группы.

В правой части неравенства в качестве ограничения будет использоваться существующий уровень риска ТП. Его расчет проведем на основе статистических данных о ДТП, произошедших на территории Перми за 2009 г., представленных ГИБДД города Перми.

Представленные данные об имевших место ДТП можно классифицировать по типовому набору различных причин их возникновения.

В этих целях используем принятую в практике региональных подразделений ГИБДД классификацию типовых причин возникновения ДТП (табл. 4.8).

Для каждого из видов ДТП по причине возникновения определены пострадавшие – пассажиры ИТ, ОТ или пешеходы. Соотношение участия транспортных средств ИТ и ОТ в данных ДТП примем пропорциональным количеству одновременно движущихся по УДС единиц подвижного состава транспортных средств различной принадлежности.

Построим статистику по количеству ДТП, погибших и раненых по видам транспорта. При этом важно учесть следующие случаи:

Если для данного вида ДТП пострадавшие – ИТ и ОТ, то и материальный ущерб, и количество погибших и раненых делятся пропорционально количеству одновременно движущихся по УДС единиц подвижного состава транспортных средств различной принадлежности.

Если для данного вида ДТП пострадавшие – пешеходы, то все погибшие и раненые относятся к пешеходам, а материальный ущерб относится к ОТ и ИТ также пропорционально количеству одновремен-

Таблица 4.8

## Классификация типовых причин возникновения ДТП

Виды причин ДТП	Пострадавшие в ДТП
Боковой интервал	ИТ, ОТ
«Встречка»	ИТ, ОТ
«Встречка», выход	ИТ, ОТ
«Встречка», скорость	ИТ, ОТ
Выход	ИТ, ОТ
Дистанция	ИТ, ОТ
Дистанция, сигнал	ИТ, ОТ
Интервал, не уступил	ИТ, ОТ
Маневрирование	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Нарушение правил проезда перекрестка	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, «встречка»	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, дистанция	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, задний ход	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, переход	пешеход
Непредоставление преимущества, сигнал	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, скорость	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, наезд	пешеход
Непредоставление преимущества, скорость	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, сигнал	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, «встречка»	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, скорость	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Несоблюдение скоростного режима	ИТ, ОТ
Обгон	ИТ, ОТ
Переход	пешеход
Переход в неустановленном месте	пешеход
Переход, непредоставление преимущества, скорость	пешеход



Окончание табл. 4.8

Виды причин ДТП	Пострадавшие в ДТП
Переход, скорость	пешеход
Переход, скорость, «встречка»	пешеход
Расположение на проезжей части	ИТ, ОТ
Сигнал	ИТ, ОТ
Скорость	ИТ, ОТ
Скорость, «встречка»	ИТ, ОТ
Скорость, дистанция	ИТ, ОТ
Скорость, непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Скорость, обгон	ИТ, ОТ
Скорость, переход	ИТ, ОТ
Скорость, правила обгона	ИТ, ОТ
Скорость	ИТ, ОТ

но движущихся по УДС единиц подвижного состава транспортных средств различной принадлежности.

Таким образом, учитывается ущерб для каждого вида транспорта (табл. 4.9).

Таблица 4.9

## Статистика ДТП по видам транспорта

Кому нанесен ущерб	Всего ДТП с участием	Погибших	Раненых
Пешеходы	$DTP_{11}$	$DTP_{12}$	$DTP_{13}$
ОТ	$DTP_{21}$	$DTP_{22}$	$DTP_{23}$
ИТ	$DTP_{31}$	$DTP_{32}$	$DTP_{33}$

Поясним:  $DTP_{ij}$  – количество ДТП с пострадавшими типа  $i$  и последствиями типа  $j$ ;  $i = 1..3$  (1 – пешеход, 2 – пассажир ОТ, 3 – пассажир ИТ);  $j = 1..3$  (1 – всего ДТП, 2 – ДТП с погибшими, 3 – ДТП с ранеными).

Например,  $DTP_{11}$  – это общее количество ДТП с участием пешеходов,  $DTP_{32}$  – это количество ДТП с погибшими пассажирами ИТ и т. д.

Частотность возникновения ДТП в расчете на одного жителя города будет рассчитываться как:

$$P = \frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \frac{P_3}{N_3}, \quad (4.108)$$

где  $P$  – частотность возникновения ДТП, ДТП/чел./год;  $P_1$  – количество ДТП с участием пешеходов, ДТП/год;  $P_2$  – количество ДТП с участием пассажиров ОТ, ДТП/год;  $P_3$  – количество ДТП с участием пользователей ИТ, ДТП/год;  $N_1$  – количество жителей города, чел.;  $N_2$  – количество пользователей ОТ города, чел.;  $N_3$  – количество пользователей ИТ города, чел.

Итак, при расчете частотности возникновения риска ДТП учитывается именно та группа пользователей, которая рискует попасть в конкретный вид ДТП. Стоит еще раз отметить, что группы ДТП по видам пострадавших формировались именно на основе причин их возникновения, поэтому имеет смысл использовать разные знаменатели для каждого слагаемого.

Например, в ДТП из числа  $P_1$  пострадавшие – пешеходы, поэтому не стоит учитывать в данной группе ДТП дополнительно пассажиров ИТ и пассажиров ОТ. Аналогично в ДТП из числа  $P_2$  не принимают участия пешеходы (их причины – несоблюдение бокового интервала, выезд на встречную полосу движения), поэтому не имеет смысла учитывать их при расчете частотности возникновения ДТП этого типа.

С учетом статистики ДТП по видам транспорта итоговый ущерб от всех ДТП за год на одного жителя города будет равен:

$$U = U_{N_0} \cdot \left( \frac{D_{11}}{N_1} + \frac{D_{12}}{N_2} + \frac{D_{13}}{N_3} \right) + U_{N_1} \cdot \left( \frac{D_{21}}{N_1} + \frac{D_{22}}{N_2} + \frac{D_{23}}{N_3} \right) + U_{N_2} \cdot \left( \frac{D_{31}}{N_1} + \frac{D_{32}}{N_2} + \frac{D_{33}}{N_3} \right), \quad (4.109)$$

где  $D_{1k}$  – число ДТП с материальным ущербом с видом транспорта  $k$ ;  $D_{2k}$  – число погибших в ДТП видом транспорта  $k$ ;  $D_{3k}$  – число раненых в ДТП видом транспорта  $k$ ;  $U_{N_0}$  – экономические потери от одного ДТП с материальным ущербом, руб.;  $U_{N_1}$  – экономические потери от одного ДТП с погибшими, руб.;  $U_{N_2}$  – экономические потери от одного ДТП с ранеными, руб.;  $N_1$  – количество жителей города, чел.;  $N_2$

– количество пользователей ОТ города, чел.;  $N_3$  – количество пользователей ИТ города, чел.

Значение  $U_{N1}$  согласно исследованиям по формированию методики оценки стоимости среднестатистической жизни человека [148] равняется 30 млн руб. Значения  $U_{N2}$  и  $U_{N0}$  выразим через  $U_{N1}$ :

$$U_{N0} = K^N \cdot U_{N1}, \quad (4.110)$$

$$U_{N2} = K^N \cdot U_{N1}, \quad (4.111)$$

где  $K^N$  – коэффициент снижения ущерба.

$K^N$  для ДТП с материальным ущербом – 0,01;  $K^N$  для ДТП с легкими ранениями – 0,04; с тяжелыми ранениями – 0,07; с тяжелыми ранениями, приведшими к инвалидности, – 0,7.

Для расчетов примем среднее значение коэффициента 0,07.

Повторим, что для нормирования правой и левой частей (приведения их к одному порядку и единицам измерения) мы вводим коэффициенты  $z$  и  $f$ . При этом для частотности возникновения ДТП коэффициент  $z$  – общий для всех слагаемых, а для ущерба от ДТП будет свой коэффициент  $f_k$  для каждого слагаемого (вида транспорта  $k$ ).

Проведем расчет нормирующего коэффициента  $z$ . Правая часть ограничения по частотности возникновения ДТП рассчитана по существующей статистике ДТП, то есть определена существующая частотность их возникновения в расчете на одного жителя города. Для определения значения коэффициента  $z$  подставим в левую часть ограничения суммарные существующие объемы движения в реальной сети по видам транспорта для мест концентрации ДТП. Отношение правой и левой частей, рассчитанных для существующих объемов движения, и будут определять значение коэффициента  $z$ .

$$z = \frac{P}{\left( \frac{\sum_{i=1}^H q_{i1}}{N_1 \cdot v_1 \cdot w_1} + \frac{\sum_{i=1}^H q_{i2}}{N_2 \cdot v_2 \cdot w_2} + \frac{\sum_{i=1}^H q_{i3}}{N_3 \cdot v_3 \cdot w_3} \right)}, \quad (4.112)$$

где  $q_{ik}$  – существующий объем движения по реальной сети вида транспорта  $k$  в месте концентрации ДТП  $i$ , чел.;  $v_k$  – скорость движения транспортного средства типа  $k$ , км/ч;  $w_k$  – средняя вместимость транс-

портного средства типа  $k$ , чел./ТС;  $N_1$  – количество жителей города, чел.;  $N_2$  – количество пользователей ОТ города, чел.;  $N_3$  – количество пользователей ИТ города, чел.;  $z$  – нормирующий коэффициент, характеризующий частотность возникновения ДТП на исследуемой территории, км/ч/ТС;  $H$  – количество мест концентрации ДТП в представленной ГИБДД статистике по городу Перми.

Расчет коэффициентов  $f_k$  происходит аналогично, но отдельно для каждого типа перемещений:

$$f_1 = \frac{\frac{D_{11}}{N_1} \cdot U_{N_0} + \frac{D_{21}}{N_1} \cdot U_{N_1} + \frac{D_{31}}{N_1} \cdot U_{N_2}}{\frac{\sum_{i=1}^H q_{i1}}{N_1 \cdot v_1 \cdot w_1}}}; \quad (4.113)$$

$$f_2 = \frac{\frac{D_{12}}{N_2} \cdot U_{N_0} + \frac{D_{22}}{N_2} \cdot U_{N_1} + \frac{D_{32}}{N_2} \cdot U_{N_2}}{\frac{\sum_{i=1}^H q_{i2}}{N_2 \cdot v_2 \cdot w_2}}}; \quad (4.114)$$

$$f_3 = \frac{\frac{D_{13}}{N_3} \cdot U_{N_0} + \frac{D_{23}}{N_3} \cdot U_{N_1} + \frac{D_{33}}{N_3} \cdot U_{N_2}}{\frac{\sum_{i=1}^H q_{i3}}{N_3 \cdot v_3 \cdot w_3}}}, \quad (4.115)$$

где  $q_{ik}$  – существующий объем движения по реальной сети вида транспорта  $k$  в месте концентрации ДТП  $i$ , чел.;  $v_k$  – скорость движения транспортного средства типа  $k$ , км/ч;  $w_k$  – средняя вместимость транспортного средства типа  $k$ , чел./ТС;  $D_{ik}$  – число ДТП с материальным ущербом с видом транспорта  $k$ ;  $D_{2k}$  – число погибших в ДТП видом транспорта  $k$ ;  $D_{3k}$  – число раненых в ДТП видом транспорта  $k$ ;  $U_{N_0}$  – экономические потери от одного ДТП с материальным ущербом, руб.;  $U_{N_1}$  – экономические потери от одного ДТП с погибшими,

руб.;  $U_{N_2}$  – экономические потери от одного ДТП с ранеными, руб.;  $N_1$  – количество жителей города, чел.;  $N_2$  – количество пользователей ОТ города, чел.;  $N_3$  – количество пользователей ИТ города, чел.;  $f_1$  – нормирующий коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП с участием пешеходов, руб. · км/ч/ТС;  $f_2$  – нормирующий коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП с участием пассажиров ОТ, руб. · км/ч/ТС;  $f_3$  – нормирующий коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП с участием пассажиров ИТ, руб. · км/ч/ТС;  $H$  – количество мест концентрации ДТП в представленной ГИБДД статистике по городу Перми.

**Постановка ограничения по риску ДТП для города Перми.** Значения параметров  $V_s$  для города Перми приведены в табл. 4.10.

Таблица 4.10

**Значения скорости  $V_s$  по видам транспорта**

Вид транспорта	Скорость $V_s$ , км/ч
Пешком, $V_1$	4
ОТ, $V_2$	18
ИТ, $V_3$	24

Значения параметров  $w_k$  приняты те же, что и в остальных ограничениях:

$$w_1 = 1; w_2 = 40; w_3 = 1,4.$$

Количество ДТП в год с разбиением по местам концентрации для Перми представлено в табл. 4.11.

Определим соотношение участия в ДТП подвижного состава ИТ и ОТ для Перми. Для ИТ количество одновременно движущихся единиц подвижного состава – примерно 17 000 единиц, для ОТ – 1000 единиц. Таким образом, примерное соотношение количества единиц

Таблица 4.11

## Статистика ДТП по местам концентрации ДТП (фрагмент)

Номер места концентрации ДТП	Вид ДТП	Всего ДТП	Раненые	Погибшие
1	Боковой интервал	6	0	0
2	«Встречка»	6	3	1
3	«Встречка»	4	6	4
4	«Встречка»	4	5	1
5	«Встречка»	3	3	0
6	«Встречка», выход	5	8	0
7	«Встречка», выход	11	18	2
8	«Встречка», выход	3	3	1
9	«Встречка», выход	6	7	1
10	«Встречка», скорость	3	2	1
11	«Встречка», скорость	18	0	0
12	Выход	0	3	0
13	Дистанция	20	6	0
14	Дистанция	7	4	0
15	Дистанция	4	5	2
16	Дистанция	8	5	1
...	...	...	...	...

подвижного состава ИТ и ОТ, одновременно движущегося по УДС города, составляет 17 к 1. Соответственно частотность возникновения ДТП того или иного вида для пассажира ИТ и ОТ будет также различаться в 17 раз.

С учетом данных соображений на основе представленной статистики ДТП была получена статистика ДТП для каждого вида перемещения для всего города, то есть были получены значения параметров  $DTP_{ij}$ .

Так, значение  $DTP_{11} = 382$ ,  $DTP_{12} = 10$  и т.д. (табл. 4.12).

На основе полученной статистики для города Перми были получены следующие значения коэффициентов  $z$  и  $f_k$  (табл. 4.13):

$z$  – коэффициент, характеризующий частотность возникновения ДТП в расчете на одного жителя города;

Таблица 4.12

## Статистика ДТП по видам перемещения для города Перми

Участники ДТП	Всего ДТП с их участием	Погибших	Раненых
Пешеходы	382	10	91
Пассажиры ОТ	198	3	23
Пассажиры ИТ	3339	58	397

Таблица 4.13

Значения коэффициентов  $z$  и  $f_k$  для города Перми

Параметр	$z_r$
$z$	0,0000025369
$f_1$	0,484
$f_2$	0,770
$f_3$	3,300

$f_k$  – коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП на одного жителя города для типа перемещения  $k$ .

Количество пользователей ОТ для зоны  $r$  определяется как:

$$N_{2r} = \frac{1}{\alpha} \cdot B_r \cdot \frac{N_{1r}}{N_1}, \quad (4.116)$$

где  $N_{2r}$  – количество пользователей ОТ в зоне  $r$ ;  $N_{1r}$  – количество жителей в зоне  $r$ ;  $N_1$  – количество жителей в городе Перми;  $B$  – количество проданных за сутки билетов в Перми (по данным Департамента дорог и транспорта города Перми);  $\alpha$  – коэффициент пересадочности (по данным натуральных обследований и опросов населения, проведенных в 2009 г.).

Количество пользователей ИТ для зоны  $r$  определяется как:

$$N_{3r} = 0,5 \cdot 1,4 \cdot A_r, \quad (4.117)$$

где  $N_{3r}$  – количество пользователей ИТ в зоне  $r$ ;  $A_r$  – количество зарегистрированных в зоне  $r$  автомобилей; 0,5 – коэффициент использования автомобиля для Перми; 1,4 – средняя наполненность автомобиля для Перми.

Стоит отметить, что в общем случае  $N_2 + N_3 \neq N_1$ , так как одни и те же люди могут быть учтены и в  $N_2$ , и в  $N_3$ . Например, для Перми разность между  $(N_2 + N_3)$  и  $N_1$  составляет примерно 3%, т.е. 3% населения Перми регулярно пользуются и ОТ, и ИТ.

Полученное для города значение частотности возникновения ДТП на одного жителя составляет:

$$P = 0,0201889 \text{ ДТП/чел./год.}$$

Полученное для города Перми значение ущерба от всех произошедших за год ДТП на одного жителя города составляет:

$$U = 20598,47 \text{ руб./чел./год.}$$

Таким образом, ограничение по частотности возникновения ДТП и ущерба от них будет иметь вид:

$$0,0000025369 \cdot \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot 5 \cdot 1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1,4} \right) \leq 0,0201889, \quad (4.118)$$

$$0,484 \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot 5 \cdot 1} + 0,77 \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} + 3,3 \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1,4} \leq 20598,48 \quad (4.119)$$

#### 4.3.4. Оптимальная модель формирования эффективной транспортной системы города Перми

Для поставленной модели оптимизационной задачи распределения транспортного спроса невозможно найти аналитическое решение в общем виде. В связи с этим будем находить численное решение моде-



ли оптимизационной задачи для конкретных значений, характеризующих транспортную систему Перми.

Строить и решать оптимальную модель формирования эффективной транспортной системы крупного города в первом приближении будем для трех способов передвижений: пешком, на общественном транспорте, на индивидуальном транспорте.

Каждый из способов перемещений в каждой зоне будет рассматриваться в зависимости от типа перемещения: АВ – транзит, ВС – въезд в зону, CD – внутреннее движение в зоне.

В качестве набора ограничений, накладываемых на целевую функцию, будем использовать шесть типов ограничений:

- по протяженности существующей улично-дорожной сети;
- спросу на перемещение в исследуемых областях;
- выбросам загрязняющих веществ;
- рискам возникновения ДТП;
- имеющемуся подвижному составу;
- шумовому загрязнению.

Каждый тип ограничений представляет собой набор неравенств следующих видов.

*Ограничения по спросу на перемещение* в исследуемых областях будут иметь следующий вид:

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \geq G_{rs}, \quad (4.120)$$

где  $l_{rs}$  – средняя длина всех корреспонденций, проходящих через область исследования  $r$  по типу  $s$ , км;  $G_{rs}$  – транспортная зависимость области  $r$  по типу  $s$  (чел · км).

Значения параметров  $l_{rs}$  и  $G_{rs}$  для Перми представлены в табл. 4.2, 4.3 (см. выше).

Ограничения по загрязнению атмосферного воздуха, или *экологические ограничения на передвижения* по исследуемым областям, будут иметь следующий вид:

$$\frac{1}{N_r} (a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3}) \leq D, \quad (4.121)$$

где  $D$  – предельный суточный объем возможной утилизации энергии выбросов загрязняющих веществ на одного жителя города в сутки, Дж/чел.;  $a_1$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км пешком ( $a_1 = 0$ );  $a_2$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км на ОТ (Дж/км/чел.);  $a_3$  – ко-

личество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км на ИТ (Дж/км/чел.);  $N_r$  – количество жителей зоны  $r$ , чел.

Значения параметра  $D$  для города Перми представлены в п. «Ограничение по загрязнению атмосферного воздуха», а значения коэффициентов  $a_i$  – в пп. «Постановка ограничения по загрязнению атмосферного воздуха» (стр. 298).

*Ограничения по протяженности существующей улично-дорожной сети* для области исследования имеют вид:

$$\frac{1}{p_2 w_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{p_3 w_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad (4.122)$$

где  $L_r$  – суммарная длина проезжих частей дорог в области  $r$ ;  $p_2$  – плотность транспортного потока ОТ при скорости  $v_2$  (авт./км);  $p_3$  – плотность транспортного потока ИТ при скорости  $v_3$  (авт./км);  $w_2$  – среднее количество человек, перевозимых на одном транспортном средстве ОТ, иначе – средняя вместимость транспортного средства;  $w_3$  – среднее количество человек, перевозимых на одном транспортном средстве ИТ.

Значения параметра  $L_r$  для города Перми представлены в табл. 4.4, а коэффициентов  $p_i$  и  $w_i$  – в пункте «Особенности построения энергетических ограничений» (стр. 291).

*Ограничение по риску возникновения дорожно-транспортных происшествий:*

$$z \cdot \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \right) \leq P; \quad (4.123)$$

$$f_1 \cdot \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + f_2 \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + f_3 \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \leq U, \quad (4.124)$$

где  $P$  – частотность возникновения ДТП в расчете на одного жителя города, ДТП/чел./год;  $U$  – ущерб от ДТП в расчете на одного жителя города, руб./чел./год;  $X_{rsk}$  – количество корреспонденций, совершаемых через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$ , чел.;  $v_k$  – скорость движения транспортного средства типа  $k$ , км/ч;  $w_k$  – средняя вместимость транспортного средства типа  $k$ , чел/ТС;  $N_{1r}$  – количество жителей в зоне  $r$ , чел.;  $N_{2r}$  – количество пользователей ОТ в зоне  $r$ , чел.;  $N_{3r}$  – количе-

ство пользователей ИТ в зоне  $r$ , чел.;  $z$  – нормирующий коэффициент, характеризующий частотность возникновения ДТП в расчете на одно транспортное средство, км/ч/ТС;  $f_k$  – нормирующий коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП для корреспонденций, совершаемых на транспортном средстве типа  $k$ , в расчете на одно транспортное средство, руб. · км/ч/ТС;  $s$  – тип прохождения через зону: транзит, въезд, внутреннее движение,  $s = 1, 2, 3$ .

Ограничения по имеющемуся подвижному составу будут иметь вид:

$$\frac{1}{u_2 \cdot z_2 \cdot kl_2} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \leq OT; \tag{4.125}$$

$$\frac{1}{w_3 \cdot z_3} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq ИТ, \tag{4.126}$$

где  $OT$  – количество единиц подвижного состава общественного транспорта, который используется в единой маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования, авт.;  $ИТ$  – количество зарегистрированного в городе индивидуального транспорта, авт.;  $u_2$  – средний пассажирооборот единицы транспортного средства общественного транспорта за один оборотный рейс, чел./рейс;  $z_2$  – среднее количество оборотных рейсов на единицу подвижного состава общественного транспорта, рейс/авт.;  $kl_2$  – коэффициент выхода подвижного состава на линию;  $w_3$  – средняя вместимость транспортного средства ИТ, чел./авт.;  $z_3$  – среднее количество поездок на ИТ одного человека в сутки, рейс.

Значения параметров, используемых в данном ограничении, для города Перми представлены в пп. «Постановка ограничения по загрязнению атмосферного воздуха» (стр. 298).

Для удобства использования *ограничения по шумовому загрязнению* в постановке оптимизационной задачи было приведено к линейному виду:

$$\frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8.25}} \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \leq SR, \tag{4.127}$$

где  $SR$  – среднее значение шумовой энергии, приходящейся на одного жителя города в сутки, Вт/чел.;  $dh$  – коэффициент приведения от часа

пик к суткам;  $s_r$  – площадь территории, прилегающей к УДС в зоне и попадающей под шумовое загрязнение от транспортных потоков, м<sup>2</sup>;

$N_r$  – количество жителей зоны  $r$ , чел.

Значения параметров  $dh$  и  $s_r$  для города Перми приведены в пп. «Постановка шумового ограничения» (стр. 311).

Целевая функция будет иметь вид:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} \cdot \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs} + X_{rs2} \cdot \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs} + X_{rs3} \right) \rightarrow \min. \quad (4.128)$$

Описанные выше ограничения и целевая функция позволяют построить оптимальную модель формирования эффективной транспортной системы города. В общем виде модель имеет следующую запись:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} \cdot \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs} + X_{rs2} \cdot \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs} + X_{rs3} \right) \rightarrow \min; \quad (4.129.1)$$

$$\begin{aligned} l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} &\geq G_{rs}, \\ r &= 1, 2, \dots, E, s = 1, 2, 3; \end{aligned} \quad (4.129.2)$$

$$\frac{1}{N_r} \left( a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \leq D, \quad r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.129.3)$$

$$\frac{1}{p_2 w_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{p_3 w_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.129.4)$$

$$\begin{aligned} z \cdot \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \right) &\leq P, \\ r &= 1, 2, \dots, E; \end{aligned} \quad (4.129.5)$$

$$\begin{aligned} f_1 \cdot \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + f_2 \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + f_3 \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} &\leq U, \\ r &= 1, 2, \dots, E; \end{aligned} \quad (4.129.6)$$

$$\frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8.25}} \left( \frac{\sum_s X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum_s X_{rs3}}{w_3} \right) \leq SR, \quad r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.129.7)$$

$$\frac{1}{u_2 \cdot z_2 \cdot kl_2} \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \leq OT; \tag{4.129.8}$$

$$\frac{1}{w_3 \cdot z_3} \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq ИТ; \tag{4.129.9}$$

$$X_{rs1} \geq 0, X_{rs2} \geq 0, X_{rs3} \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3. \tag{4.129.10}$$

Количество переменных модели (4.129.1) – (4.129.10) –  $3 \cdot S \cdot E$ .

Количество ограничений типа (4.129.2) – (4.129.9) –  $S \cdot E + 3E$ .

Постановка задачи для города Перми с учетом рассчитанных значений параметров и коэффициентов имеет вид следующей математической модели:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{4} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} + \frac{1}{18} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs2} + \frac{1}{37,8} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \rightarrow \min. \tag{4.130.1}$$

$$\frac{1}{1596} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{112,28} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad r = \overline{1..10}; \tag{4.130.2}$$

$$\frac{1}{N_r} (0,08 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + 0,757 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3}) \leq 18,753, \\ r = \overline{1..10}; \tag{4.130.3}$$

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \geq G_{rs}, \\ r = \overline{1..10}, \quad s = 1, 2, 3; \tag{4.130.4}$$

$$0,0000025369 \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot 5 \cdot 1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1.4} \right) \leq 0,0201889 \tag{4.130.5}$$

$$0,484 \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot 5 \cdot 1} + 0,77 \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} + 3,3 \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1.4} \leq 20598,48 \\ r = \overline{1..10}; \tag{4.130.6}$$

$$\frac{s_r \cdot 0,1}{N_r \cdot 10^{8,25}} \left( \frac{\sum X_{rs2}}{40} + \frac{\sum X_{rs3}}{1,4} \right) \leq 0,001573346 ,$$

$$r = 1, 2, \dots E; \quad (4.130.7)$$

$$0,00042 \cdot \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \leq 1000; \quad (4.130.8)$$

$$0,2381 \cdot \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq 285000; \quad (4.130.9)$$

$$X_{rs1} \geq 0, X_{rs2} \geq 0, X_{rs3} \geq 0 \quad r = \overline{1..10}, s = 1, 2, 3. \quad (4.130.10)$$

Количество переменных модели для Перми – 90.

Количество ограничений для Перми – 72.

#### 4.4. Решение оптимальной модели

Решение оптимальной модели формирования эффективной транспортной системы Перми осуществлено с использованием надстройки Solver (Поиск решения) программы Excel компании Frontline System. При решении будем использовать нелинейный метод обобщенного понижающего градиента (ОПГ). Данный метод используется для гладких нелинейных задач. В нашем случае из-за существенной нелинейности в группе ограничений, связанных с ограничениями вероятности рисков ДТП, вся математическая модель является нелинейной.

Процедура поиска решения проводилась при следующих параметрах работы алгоритма поиска:

- предельное число итераций – 20000;
- относительная погрешность – 0,000001;
- допустимое отклонение – 0,005%;
- сходимость – 0,000001.

Решение оптимальной модели формирования эффективной транспортной системы Перми осуществлено с использованием алгоритма симплекс-метода.

Общий объем времени, необходимый для оптимального удовлетворения имеющихся в городе транспортных потребностей, для всех людей (значение целевой функции) составляет – 995 406 ч в суточном цикле транспортных потребностей, что на 35% меньше показателя существующего объема времени – 1 546 779 часов. Это достигается путем изменения сложившегося в Перми распределения транспортного спроса по различным способам перемещений, при сохранении существующего объема транспортного предложения и основных парамет-

Таблица 4.14

**Значения найденных переменных для зон 1–5**

Вид перемещений	Тип прохода зоны	Номер зоны				
		1	2	3	4	5
Пешеходы	AB	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0
	CD	0	0	0	0	0
ОТ	AB	0	0	0	0	4 168
	BC	304 225	500 514	212 630	325 132	189 739
	CD	87 462	0	0	49 526	31 161
ИТ	AB	77 513	87 545	23 672	39 098	42 037
	BC	88 732	17 589	67 898	0	0
	CD	0	257 686	54 378	54 748	0

Таблица 4.15

**Значения найденных переменных для зон 6–10**

Вид перемещений	Тип прохода зоны	Номер зоны				
		6	7	8	9	10
Пешеходы	AB	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0
	CD	0	0	0	0	0
ОТ	AB	7 600	0	0	76 541	78 941
	BC	0	64 363	23 863	48 227	40 219
	CD	19 156	0	0	944	1 619
ИТ	AB	8 503	8 040	0	0	23 025
	BC	173 376	79 036	2 628	19 061	0
	CD	115 181	198 931	0	0	0

тров среды обитания – уровня вреда от ДТП, загрязнения атмосферы и повышенного транспортного шума в пересчете на одного жителя города. Распределение найденных параметров распределения транспортного спроса в таблицах и на картограмме города по зонам представлено в табл. 4.14, 4.15, на рис. 4.27 и 4.28 (см. цветную вклейку).

#### 4.5. Анализ решения оптимальной модели

Общий объем времени, необходимый для оптимального удовлетворения имеющихся в городе транспортных потребностей для всех людей (значение целевой функции), составляет 956 751 час в суточном цикле.

Размещение на картограмме города найденных параметров распределения транспортного спроса по зонам представлено на рис. 4.27, 4.28 (см. цветную вклейку).

В поставленной оптимальной модели на конечный результат влияют не только такие ограничения, как предельная суточная эмиссия загрязняющих веществ в области исследования, ее транспортная зависимость и ограничения транспортного предложения, но и характеристики транспортных средств, участвующих в реализации транспортного спроса.

Варьируемыми исходными параметрами, кроме правых частей системы ограничений, являются такие характеристики транспортных средств, как: средняя вместимость транспортного средства –  $w_i$ , пробеговые выбросы транспортного средства –  $a_i$ , габариты и максимальная плотность потока, которые влияют как на целевую функцию, так и на ограничения.

Например, при изменении показателя средней вместимости транспортного средства изменятся и целевая функция, и ограничения, что приведет к поиску решения оптимальной модели с другими исходными данными. Моделирование позволяет при изменении исходных параметров оценить конечный результат распределения транспортного спроса, а также целевой показатель – максимальную суммарную скорость перемещения всех участников движения.

Используя в качестве целевой функции максимум средней скорости перемещений, можно решить задачу о том, как распределится транспортный спрос и изменится суммарная скорость перемещения всех участников движения при изменении подвижного состава транспорта, используемого при совершении транспортных корреспонденций.

Оригинальность подхода заключается в том, что можно менять расположение, размер и количество областей исследования (в зависимости от поставленной задачи) и каждый раз, строя и решая оптимальную модель, получать оптимальное распределение спроса по выбранным областям. При этом варьируемыми показателями, формирующими новое распределение транспортного спроса, являются: длина (площадь) проезжих частей дорог исследуемых областей, предельная экологическая нагрузка, спрос на передвижение.



Таблица 4.16

**Значения найденных переменных для зоны 1 при изменении протяженности УДС в зоне**

Вид перемещений	Тип прохождения зоны	Значения $X$ при протяженности УДС 301,5 км	Значения $X$ при протяженности УДС 30 км
Пешеходы	AB	0	0
	BC	0	0
	CD	0	54 651
ОТ	AB	0	77 513
	BC	304 225	392 956
	CD	87 462	32 811
ИТ	AB	77 513	0
	BC	88 731	0
	CD	0	0

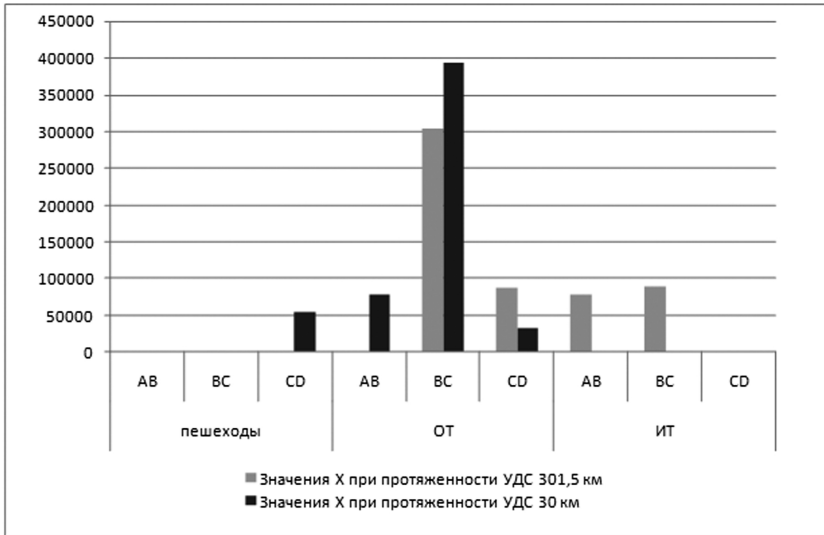
Ценность моделирования любой ситуации заключается в возможности варьирования (изменения) исходной информации и получения оценки влияния на конечный результат. В нашем случае, меняя длину проезжих частей дорог исследуемых областей, предельную экологическую нагрузку, спрос на передвижение, будем каждый раз получать новое распределение транспортного спроса.

Возможность исследования поведения транспортной системы города по предложенной модели представляет значительный интерес ввиду отсутствия необходимости детального представления структуры действующей УДС города и моделирования особенностей транспортного предложения.

В качестве примера рассмотрим на представленной модели, как отреагирует транспортная система Перми на уменьшение количества площади (протяженности) проезжих частей автомобильных дорог в центральной зоне.

Для этого в ограничении по протяженности существующей улично-дорожной сети для зоны номер 1 уменьшим в 10 раз значение правой части и снова проведем расчет оптимизационной задачи. В результате получим следующее решение (табл. 4.16 и рис. 4.29).

В результате изменения протяженности УДС в исследуемой зоне в 10 раз (с 301,5 до 30 км) произошло изменение баланса между используемыми для совершения корреспонденций видами транспорта. Значения переменных, связанных с индивидуальным транспортом, стали равны нулю. Так, для совершения внутризональных корреспонденций в



**Рис. 4.29.** Изменение найденных переменных  $X$  для зоны 1 при изменении протяженности УДС в зоне

зоне 1 баланс сместился к пешеходному движению. Корреспонденции въезда в зону 1 и транзитного движения сместились к общественному транспорту. Это связано с тем, что общественный транспорт использует площади проезжих частей эффективнее, чем индивидуальный.

Значительно увеличился объем пешеходного движения внутри исследуемой зоны (до  $\approx 54500$ ), так как совершение корреспонденции внутри зоны 1 пешком стало менее затратным по сравнению даже с общественным транспортом с точки зрения использования территории.

Таким образом, построенная оптимальная модель позволяет находить наиболее эффективные решения задачи формирования транспортной системы города.

Следующим этапом проводимых исследований является построение и решение двойственной задачи математического программирования к задаче формирования эффективной транспортной системы города. Результаты решения двойственной задачи, в свою очередь, позволяют исследователю ответить на вопросы о значимости тех или иных формализованных моделью ограничений развития транспортных систем. Анализ переменных двойственной задачи даст ответы на вопрос о необходимых объемах развития транспортной инфраструктуры при изменениях транспортного спроса, а также позволит оценить объемы необходимых мероприятий в области охраны окружающей среды и обеспечения безопасности дорожного движения при сохранении целевых показателей эффективности работы транспортной системы.

### 4.5.1. Оптимальная модель двойственной задачи

Полученная модель оптимизационной задачи имеет вид:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} \cdot \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs} + X_{rs2} \cdot \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs} + X_{rs3} \right) \rightarrow \min \quad (4.131.1)$$

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \geq G_{rs}, \\ r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3; \quad (4.131.2)$$

$$\frac{1}{N_r} \left( a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \leq D, \quad r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.131.3)$$

$$\frac{1}{p_2 w_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{p_3 w_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.131.4)$$

$$\frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8.25}} \left( \frac{\sum_s X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum_s X_{rs3}}{w_3} \right) \leq SR; \quad (4.131.5)$$

$$z \cdot \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \right) \leq P, \\ r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.131.6)$$

$$f_1 \cdot \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + f_2 \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + f_3 \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \leq U, \\ r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.131.7)$$

$$X_{rs1} \geq 0, \quad X_{rs2} \geq 0, \quad X_{rs3} \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3. \quad (4.131.8)$$

Таким образом, в постановке вида (4.129.1–4.129.8) оптимизационная задача является линейной и для нее может быть построена двойственная задача. Решив двойственную задачу, можно выявить закономерности влияния того или иного ограничения на значение целевой функции.

Переменные двойственной задачи обозначим как  $Y_k$ , где  $k$  – номер ограничения в постановке прямой задачи. Тогда постановка двойственной задачи примет вид:

$$\begin{aligned}
 F = \sum_{r=1}^E L_r Y_r + \sum_{r=1}^E D Y_{E+r} + \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 (-G_{rs} Y_{2E+3(r-1)+s}) + OT \cdot Y_{5E+1} + ИТ \cdot Y_{5E+2} \\
 + SR \cdot \sum_{r=1}^E Y_{5E+2+r} + \sum_{r=1}^E U Y_{6E+2+r} + \sum_{r=1}^E P Y_{7E+2+r} \rightarrow \max;
 \end{aligned}
 \tag{4.132.1}$$

$$\begin{aligned}
 -l_{rs} Y_{2E+3(r-1)+s} + \frac{z}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} \cdot Y_{r+6E+2} + \frac{f_1}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} \cdot Y_{r+7E+2} \geq \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs}, \\
 r = 1, 2, \dots, E, s = 1, 2, 3;
 \end{aligned}
 \tag{4.132.2}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{p_2 w_2} \cdot Y_r + \frac{1}{N_r} \cdot a_2 \cdot l_{rs} \cdot Y_{r+E} - l_{rs} \cdot Y_{r+2E} + \frac{1}{u_2 z_2 k l_2} Y_{5E} + \frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8.25}} \cdot \frac{1}{w_2} Y_{r+5E+2} + \\
 + \frac{z}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} \cdot Y_{r+6E+2} + \frac{f_2}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} \cdot Y_{r+7E+2} \geq \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs}; \\
 r = 1, 2, \dots, E, s = 1, 2, 3;
 \end{aligned}
 \tag{4.132.3}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{p_3 w_3} \cdot Y_r + \frac{1}{N_r} \cdot a_3 \cdot l_{rs} \cdot Y_{r+E} - l_{rs} \cdot Y_{r+2E} + \frac{1}{w_3 z_3} Y_{5E+1} + \frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8.25}} \cdot \frac{1}{w_3} Y_{r+5E+2} + \\
 + \frac{z}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \cdot Y_{r+6E+2} + \frac{f_3}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \cdot Y_{r+7E+2} \geq \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs}. \\
 r = 1, 2, \dots, E, s = 1, 2, 3;
 \end{aligned}
 \tag{4.132.4}$$

Для Перми математическая модель двойственной задачи примет вид:

$$\begin{aligned}
 F = \sum_{r=1}^E L_r Y_r + \sum_{r=1}^E 18,753 \cdot Y_{E+r} + \\
 + \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 (-G_{rs} Y_{2E+3(r-1)+s}) + 1000 \cdot Y_{5E+1} + \\
 + 285000 \cdot Y_{5E+2} + 0,001573346 \cdot \sum_{r=1}^E Y_{5E+2+r} + 0,0201889 \sum_{r=1}^E Y_{6E+2+r} + \\
 20598,48 \sum_{r=1}^E Y_{7E+2+r} \rightarrow \max;
 \end{aligned}
 \tag{4.132'.1}$$

$$-l_{rs} Y_{2E+3(r-1)+s} + \frac{0,0000025369}{N_{1r} \cdot 4 \cdot 1} \cdot Y_{r+6E+2} + \frac{0,484}{N_{1r} \cdot 4 \cdot 1} \cdot Y_{r+7E+2} \geq \frac{1}{4} \cdot l_{rs},$$

$$r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3; \quad (4.132'.2)$$

$$\frac{1}{1596} \cdot Y_r + \frac{1}{N_r} \cdot 0,08 \cdot l_{rs} \cdot Y_{r+E} - l_{rs} \cdot Y_{r+2E} + \frac{1}{0,00042} Y_{5E} +$$

$$+ \frac{s_r \cdot 0,1}{N_r \cdot 10^{8,25}} \cdot \frac{1}{40} Y_{r+5E+2} + \frac{0,0000025369}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} \cdot Y_{r+6E+2} +$$

$$+ \frac{0,484}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} \cdot Y_{r+7E+2} \geq \frac{1}{18} \cdot l_{rs}$$

$$r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3; \quad (4.132'.3)$$

$$\frac{1}{112,28} \cdot Y_r + \frac{1}{N_r} \cdot 0,757 \cdot l_{rs} \cdot Y_{r+E} - l_{rs} \cdot Y_{r+2E} + \frac{1}{0,2381} Y_{5E+1} + \frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8,25}} \cdot \frac{1}{1,45} Y_{r+5E+2} +$$

$$+ \frac{0,0000025369}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1,45} \cdot Y_{r+6E+2} + \frac{0,484}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1,45} \cdot Y_{r+7E+2} \geq \frac{1}{24} \cdot l_{rs}$$

$$r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3. \quad (4.132'.4)$$

### Решение двойственной задачи

Исключительное значение для решения оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города имеет самостоятельный анализ решения двойственной задачи (4.132.1)–(4.132.4). Рассмотрим некоторые особенности анализа ее решения подробнее.

Переменные  $Y_i$  при коэффициенте  $-G_{rs}$ , участвующие в целевой функции двойственной задачи со знаком «минус», соответствуют «верхним» ограничениям модели, ограничениям по транспортной зависимости территории. В двойственной задаче они оценивают влияние величины транспортной зависимости территории на целевую функцию (рис. 4.30, 4.31).

Физически это будет означать: если увеличится транспортная зависимость области  $r$  по одному из типов корреспонденций  $s$  ( $G_{rs}$ ) на



Рис. 4.30. Влияние ограничения по спросу на перемещение на целевую функцию



Рис. 4.31. Анализ устойчивости решения по спросу на перемещение

единицу, то на величину соответствующих переменных  $Y_i$  увеличится суммарное время совершения корреспонденций всех участников движения в транспортной системе. Транспортная зависимость есть показатель, напрямую формирующий объем транспортного движения на исследуемой территории, и в общем случае именно она определяет итоговое перераспределение транспортных потоков по УДС. Можно сказать, что  $Y_i$  оценивает влияние спроса на суммарное время осуществления транспортных корреспонденций.

Особое внимание следует уделить тем областям  $r$ , где двойственные оценки  $Y_i$  наибольшие. Это самые загруженные территории, увеличение спроса в этих областях существенно повлияет на увеличение суммарного времени совершения корреспонденций. Там же, где двой-

ственные оценки  $Y_i$  минимальны, есть резервы увеличения транспортного спроса, то есть в этих областях транспортное предложение превышает транспортный спрос.

Переменные  $Y_i$  при коэффициенте  $D_r$ , участвующие в целевой функции двойственной задачи со знаком «плюс», соответствуют «нижним» ограничениям модели, ограничениям по загрязнению атмосферного воздуха в области  $r$ , они оценивают влияние величины предельной экологической нагрузки на целевую функцию. Например, если удастся увеличить (уменьшить) предельную экологическую нагрузку области  $r$  ( $D_r$ ) на единицу, то на величину  $Y_i$  уменьшится (увеличится) суммарное время совершения корреспонденций всех участников движения за счет перераспределения транспортных потоков.

Такой анализ интересен, например, при проведении мероприятий по нормированию объемов выбросов загрязняющих веществ предприятиями, расположенными в черте города. Конечно, в идеале следует рассматривать вариант уменьшения предельной экологической нагрузки на каждую территорию, но очевидно, что вследствие этого суммарное время совершения транспортных корреспонденций увеличится.

Для областей  $r$ , где двойственная оценка  $Y_i > 0$ , экологическая составляющая достигает предельного значения  $D_r$ . Эти области экологически наиболее уязвимы. Для тех областей  $r$ , где двойственная оценка  $Y_i = 0$ , экологическая составляющая в норме, загрязнение атмосферного воздуха выбросами автомобильного транспорта не достигает предельного значения.

Переменные  $Y_i$  при коэффициенте  $L_r$  также участвуют в целевой функции со знаком «плюс» и соответствуют «нижним» ограничениям модели, ограничениям по длине проезжих частей автомобильных дорог (см. рис. 4.35 ниже). Они оценивают влияние длины проезжих частей дорог исследуемой области на целевую функцию.

Например, если в области  $r$  увеличить длину проезжих частей улиц и дорог ( $L_r$ ) на единицу (на 1 км), то на величину  $Y_i$  уменьшится суммарное время совершения всех транспортных корреспонденций во всем городе. Если переменные  $Y_i = 0$ , то в соответствующей области  $r$  есть резервы пропускной способности УДС, и строить новые участки автомобильных дорог в исследуемой области нецелесообразно.

Если  $Y_i > 0$ , то в соответствующей области  $r$  автомобильные дороги используются полностью, и для уменьшения суммарного времени со-

вершения всех транспортных корреспонденций во всем городе необходимо вводить в эксплуатацию дополнительные элементы УДС именно в этой зоне. Очевидно, что в первую очередь ввод дополнительных провозных мощностей автомобильных дорог и проезжих частей улиц необходим в тех областях  $r$ , которым соответствует наибольшее значение двойственной оценки  $Y_i$ .

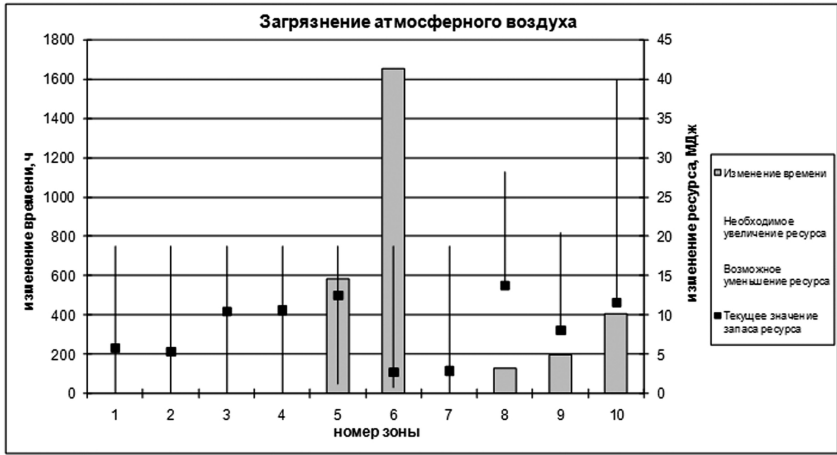


Рис. 4.32. Влияние ограничения по загрязнению атмосферного воздуха на целевую функцию



Рис. 4.33. Анализ устойчивости решения по загрязнению атмосферного воздуха



Решение двойственной задачи имеет прикладное значение, так как определяет ценность каждого из потребляемых транспортной системой ресурсов с точки зрения ее целевой функции. Представим результаты решения двойственной задачи в виде так называемых биржевых диаграмм с ненулевым влиянием на целевую функцию (рис. 4.32–4.39).

Каждая из диаграмм оценивает определенную группу потребляемых ресурсов. Проиллюстрируем прикладной смысл решения двойственной модели на ресурсе «территория» (рис. 4.35). Черные точки обозначают имеющийся запас ресурса, то есть в нашем случае протяженности УДС в каждой транспортной зоне. Столбцы показывают значение соответствующей переменной двойственной задачи, это «теневая цена» ресурса, выраженная в единицах измерения целевой функции и показывающая, насколько изменится целевая функция

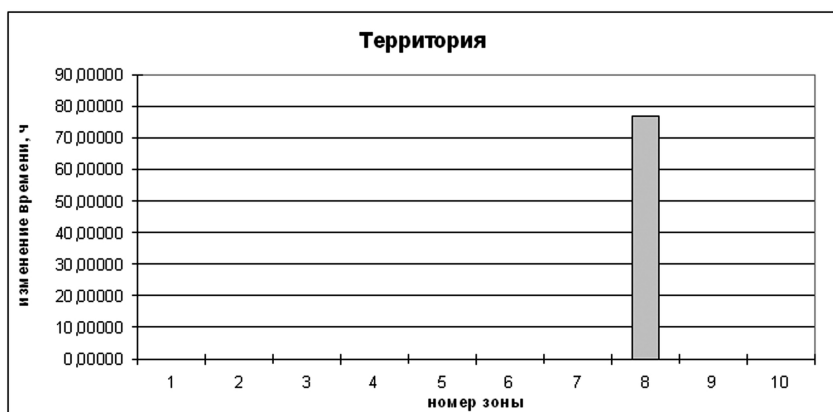


Рис. 4.34. Влияние ограничения по территории на целевую функцию

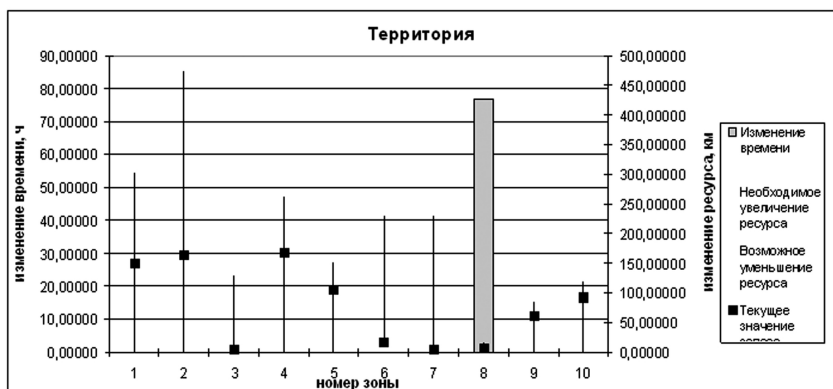


Рис. 4.35. Анализ устойчивости решения по территории

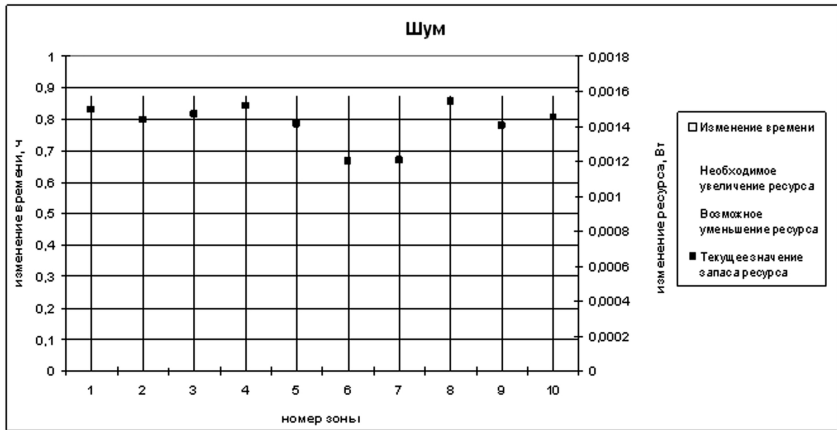


Рис. 4.36. Анализ устойчивости решения по шуму

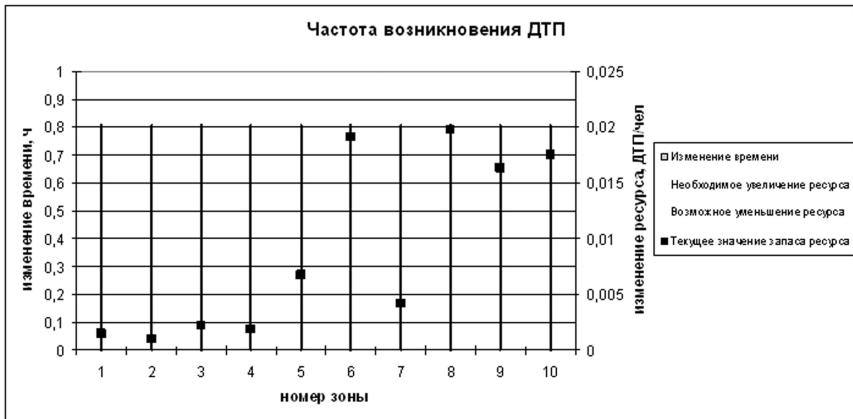


Рис. 4.37. Анализ устойчивости решения по частотности возникновения ДТП

при изменении запаса соответствующего ресурса на единицу. Тонкие черные линии показывают диапазоны устойчивости решения, в нашем случае – изменения запаса ресурса (протяженности УДС в зоне).

Решение двойственной модели для Перми показало, что наиболее эффективными с точки зрения сокращения суммарного времени реализации транспортных корреспонденций будут мероприятия по развитию УДС в 4-й зоне. Каждый новый километр, введенный здесь в эксплуатацию, сократит суммарное суточное время реализации корреспонденций в городе на 110 часов, а предельный объем ввода новых дорог в этой зоне не должен превышать 50 км (стоимость 4-полосной дороги составляет 100 млн руб., стоимость рабочего часа – 200 руб., экономия – 44 тыс. руб. в день, окупаемость – 568 дней).

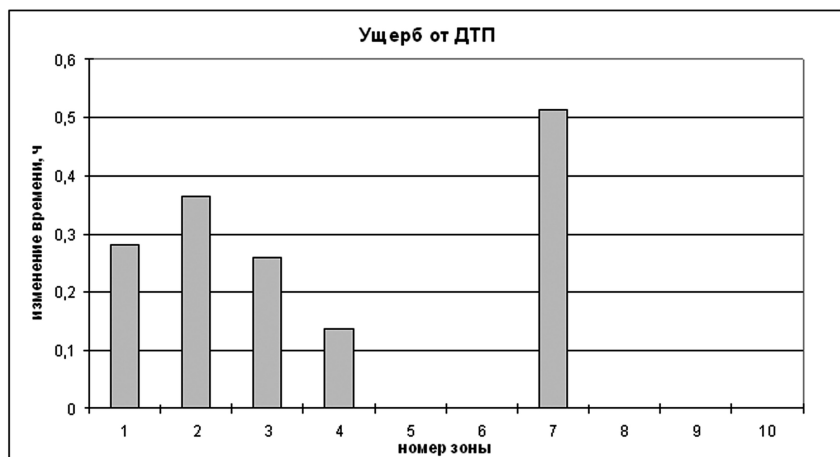


Рис. 4.38. Влияние ограничения по ущербу от ДТП на целевую функцию

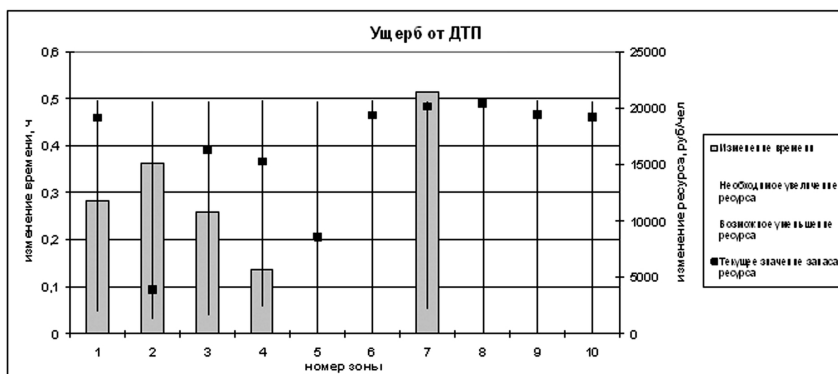


Рис. 4.39. Анализ устойчивости решения по ущербу от ДТП

В итоге, зная подобные оценки каждого из потребляемых ресурсов, а также объемы имеющихся в распоряжении сообщества финансовых ресурсов, можно сформировать экономически обоснованную программу мероприятий по повышению эффективности функционирования городской транспортной системы.

Двойственные оценки представляют собой уникальный инструмент для принятия обоснованных управленческих решений в области транспортного планирования и организации дорожного движения в городе.

На основе анализа их значений в представленных моделях можно принимать обоснованные решения о строительстве или ограничении движения на отдельных участках УДС города в той или иной области, точно представляя при этом, как изменение транспортных потоков по-

влияет на исследуемый показатель – суммарную скорость движения транспортных потоков.

В итоге, зная подобные оценки каждого из потребляемых ресурсов, а также объемы имеющихся в распоряжении сообщества финансов, можно сформировать экономически обоснованную программу мероприятий по повышению эффективности функционирования городской транспортной системы.

#### 4.6. Решение оптимизационных задач в альтернативной постановке

В разделе 4.5 приведен пример иллюстрации адекватности предлагаемой модели на примере инфраструктурных ограничений. Показано, как изменятся основные параметры функционирования транспортной системы города при изменениях в объеме городской транспортной инфраструктуры. Не нарушая общности подхода, можно отметить, что точно такой же ресурсный подход следует применить при постановке задачи поиска оптимального распределения транспортного спроса при ужесточении других введенных в модель ограничений, в частности нематериальных.

Приведем пример решения задачи по формированию эффективной транспортной системы города при ужесточении требований к качеству среды обитания, в частности к объему шумового воздействия на человека в течение суток. Правая часть шестого ограничения оптимальной модели уменьшена в 20 раз. В систему ограничений вместо неравенства (4.129.7) введем следующее соотношение:

$$\frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8.25}} \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \leq SR / 20. \quad (4.133)$$

После этого решим прямую задачу. Решение представлено по зонам (рис. 4.40).

В табл. 4.17, 4.18 представлены численные значения найденных неизвестных прямой задачи.

Как видно из табл. 4.17, 4.18 и рис. 4.41 (см. цветную вклейку), при ужесточении одного из параметрических ограничений оптимальным будет режим функционирования транспортной системы города, в которой часть внутренних перемещений в отдельных зонах реализуется пешком.

Вследствие этого вполне разумно ожидать увеличения суммарного времени реализации транспортных корреспонденций в транспортной системе города. При ужесточении нормы шума на одного жителя в

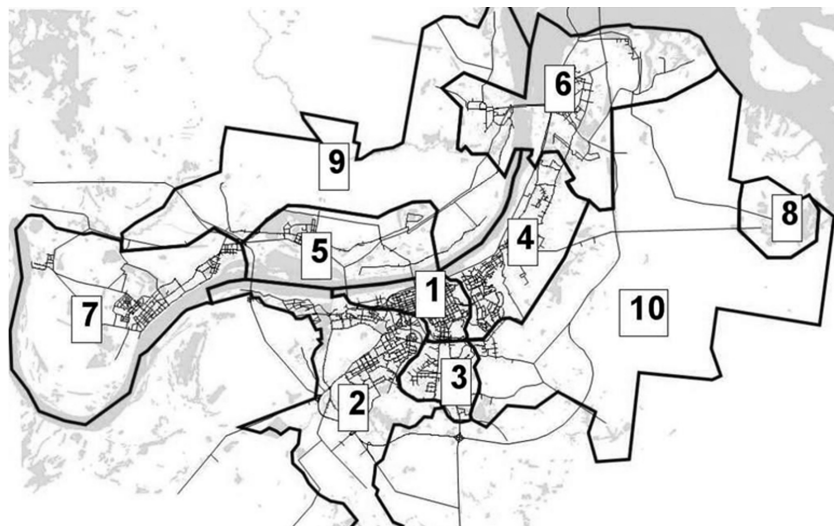


Рис. 4.40. Деление города Перми на зоны исследования

Таблица 4.17

**Значения найденных переменных в альтернативной постановке задачи для зон 1–5**

Вид перемещений	Тип прохода зоны	Номер зоны				
		1	2	3	4	5
Пешеходы	AB	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0
	CD	87 462	0	54 378	31 740	0
ОТ	AB	0	0	0	0	30 707
	BC	399 027	411 099	192 526	217 654	189 739
	CD	0	257 686	0	72 533	31 161
ИТ	AB	77 513	87 545	23 672	39 098	15 499
	BC	93 930	107 004	88 002	107 478	0
	CD	0	0	0	0	0

20 раз – до 0,0000787 Вт · ч/чел. значение целевой функции составит 1 167 543 часа в суточном цикле транспортных потребностей, что, тем не менее, на 25% меньше показателя существующего объема времени – 1 546 779 часов.

Следовательно, и далее при таком изменении исходных параметров работы транспортной системы потребуются решение двойственной задачи и анализ ее устойчивости с целью определения ценности каждого

Таблица 4.18

**Значения найденных переменных в альтернативной постановке задачи  
для зон 6–10**

Вид пере- мещений	Тип про- хождения зоны	Номер зоны				
		6	7	8	9	10
Пешеходы	AB	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0
	CD	0	0	0	0	0
ОТ	AB	0	0	0	70 493	88 987
	BC	136 096	100 739	18 214	67 289	40 219
	CD	134 337	198 931	0	944	1 619
ИТ	AB	16 103	8 040	0	6 048	12 979
	BC	37 280	42 660	8 277	0	0
	CD	0	0	0	0	0

потребляемого транспортной системой ресурса и выработки программы ее развития.

Истинная ценность представленного подхода к формированию эффективной транспортной системы города на основе этого класса моделей заключается в первую очередь в вариабельности постановки задачи в зависимости от целей исследования.

На время забудем о представленных в предыдущих главах логических построениях к обоснованию эффективности транспортных систем как отношения времени людей к потребленным системой ресурсам. Поменяем местами целевую функцию оптимальной модели и одно из ограничений, в частности ограничение по выбросам ЗВ в атмосферу. Получим математическую модель формирования экологически чистой транспортной системы крупного города при неухудшении всех остальных ее характеристик, в том числе общего времени реализации корреспонденций. Такая модель приведена в следующих соотношениях:

$$a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \rightarrow \min; \quad (4.134.1)$$

$$\sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} + \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs2} + \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \leq TSYS \quad (4.134.2)$$

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \geq G_{rs},$$

$$r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3; \quad (4.134.3)$$

$$\frac{1}{p_2 w_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{p_3 w_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.134.4)$$

$$z \cdot \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \right) \leq P,$$

$$r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.134.5)$$

$$f_1 \cdot \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + f_2 \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + f_3 \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \leq U,$$

$$r = 1, 2, \dots, E; \quad (4.134.6)$$

$$\frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8.25}} \left( \frac{\sum_s X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum_s X_{rs3}}{w_3} \right) \leq SR; \quad (4.134.7)$$

$$\frac{1}{u_2 \cdot z_2 \cdot kl_2} \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \leq OT; \quad (4.134.8)$$

$$\frac{1}{w_3 \cdot z_3} \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq IT; \quad (4.134.9)$$

$$X_{rs1} \geq 0, \quad X_{rs2} \geq 0, \quad X_{rs3} \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3. \quad (4.134.10)$$

В приведенных соотношениях заменена целевая функция, вследствие чего полученную к решению задачу можно сформулировать как задачу минимизации выбросов парниковых газов, в которой объем выбросов загрязняющих веществ – цель, а время реализации транспортных корреспонденций – ограничение.

Для Перми новая целевая функция и новое ограничение будут выглядеть следующим образом.

$$0,08 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + 0,757 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \rightarrow \min; \quad (4.134'.1)$$

$$\sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{4} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} + \frac{1}{18} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs2} + \frac{1}{37,8} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \leq 1\,546\,779; \quad (4.134'.2)$$

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \geq G_{rs},$$

$$r = \overline{1..10}, \quad s = 1, 2, 3; \quad (4.134'.3)$$

$$\frac{1}{1596} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{112,28} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad r = \overline{1..10}; \quad (4.134'.4)$$

$$0,000002569 \cdot \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot 5 \cdot 1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1,4} \right) \leq 0,0201889,$$

$$r = \overline{1..10}; \quad (4.134'.5)$$

$$0,484 \cdot \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot 5 \cdot 1} + f_2 \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} + f_3 \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1,4} \leq 20598,48,$$

$$r = \overline{1..10}; \quad (4.134'.6)$$

$$\frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8,25}} \left( \sum_s \frac{X_{rs2}}{40} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{1,4} \right) \leq 0,001573346, \quad r = \overline{1..10}; \quad (4.134'.7)$$

$$0,00042 \cdot \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \leq 1000; \quad (4.134'.8)$$

$$0,2381 \cdot \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq 285000; \quad (4.134'.9)$$

$$X_{rs1} \geq 0, \quad X_{rs2} \geq 0, \quad X_{rs3} \geq 0, \quad r = \overline{1..10}, \quad s = 1, 2, 3. \quad (4.134'.10)$$

Решение – это также набор значений «икс» – способов перемещений, естественно, совсем других, отличных от предыдущей задачи.



В табл. 4.19, 4.20 представлены численные значения найденных неизвестных прямой задачи. Распределение на картограмме города найденных неизвестных по зонам представлено на рис. 4.42–4.44 (см. цветную вклейку).

Таблица 4.19

**Значения найденных переменных в альтернативной постановке задачи  
для зон 1–5**

Вид перемещений	Тип прохождения зоны	Номер зоны				
		1	2	3	4	5
Пешеходы	AB	0	0	0	0	0
	BC	74 862	0	0	0	0
	CD	87 462	187 573	0	104 274	31 161
ОТ	AB	77 513	87 545	23 672	39 098	46 206
	BC	318 094	518 103	280 528	325 132	189 739
	CD	0	0	0	0	0
ИТ	AB	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0
	CD	0	70 112	54 378	0	0

Таблица 4.20

**Значения найденных переменных в альтернативной постановке задачи  
для зон 6–10**

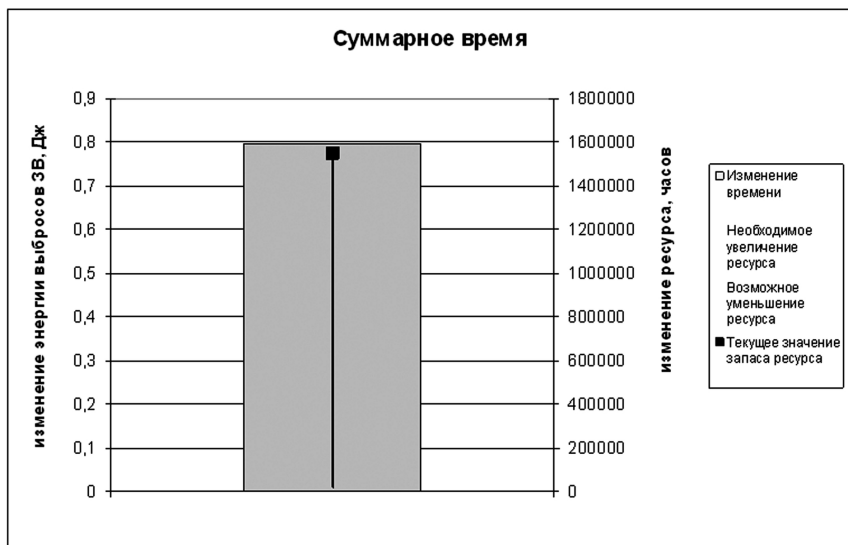
Вид перемещений	Тип прохождения зоны	Номер зоны				
		6	7	8	9	10
Пешеходы	AB	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0
	CD	112 167	0	0	0	0
ОТ	AB	16 103	8 040	0	76 541	101 966
	BC	173 376	143 399	26 491	67 289	40 219
	CD	0	0	0	944	0
ИТ	AB	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0
	CD	22 169	198 931	0	0	1 619

Как видно из приведенных таблиц и картограмм, при постановке оптимизационной задачи как задачи минимизации выбросов парниковых газов оптимальным является режим функционирования транспортной системы города, в которой часть внутренних перемещений в отдельных зонах реализуется пешком. В некоторых зонах (1, 4, 5) все внутренние корреспонденции совершаются пешком. Кроме того, в зоне 1 часть пограничных корреспонденций совершается пешком, при этом на индивидуальном транспорте в зоне 1 не совершается ни одной корреспонденции.

На рис. 4.45 и 4.46 приведены результаты решения двойственной задачи минимизации выбросов парниковых газов в виде «биржевых» диаграмм.

Построение и решение двойственной модели к задаче формирования экологически чистой транспортной системы позволяет определить ограничения и их вес при стремлении минимизировать нагрузку на окружающую среду. В данном случае ограничителем является наличие подвижного состава ОТ.

Введение в транспортную систему города дополнительно одной единицы подвижного состава общественного транспорта позволяет сократить на 1 509 кг суточную массу выбросов парниковых газов при сохранении существующего времени реализации транспортных корреспонденций.



**Рис. 4.45.** Влияние ограничения по суммарному времени реализации транспортных корреспонденций на целевую функцию



Рис. 4.46. Влияние ограничения по подвижному составу ОТ на целевую функцию

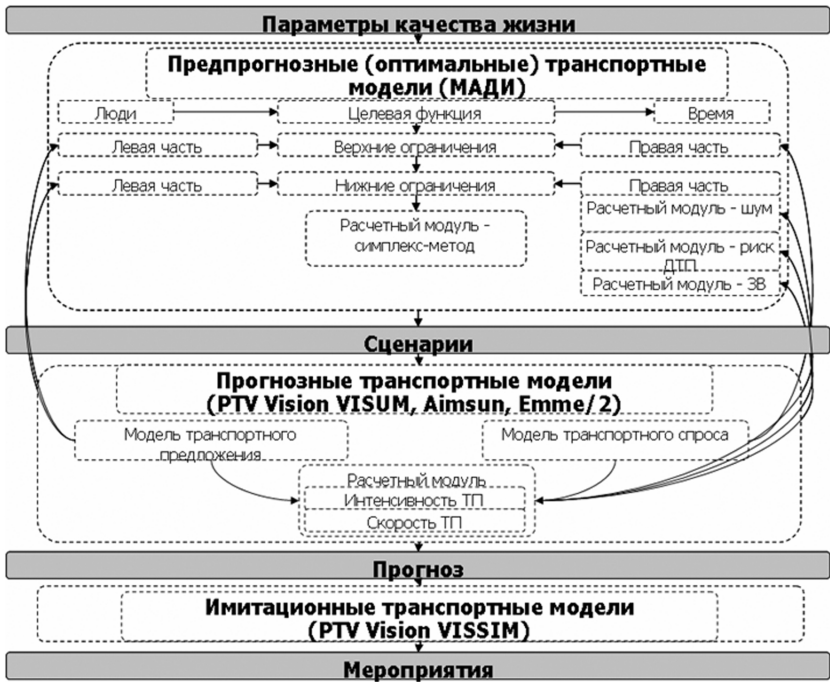
### Формирование системы транспортного моделирования городов

Предложенные прямая и двойственная модели решения оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города представляют новый класс транспортных моделей. По отношению к прогнозным и имитационным транспортным моделям они являются моделями более высокого уровня – предпрогнозными (рис. 4.47). Основная цель их создания – выработка сценариев развития ТС и подготовка этих сценариев для дальнейшего прогнозирования. Предполагаемая связь моделей различного назначения представлена на рис. 4.47 на примере известных классов моделей.

В представленных моделях удалось применить широко используемые в логистике (в технических системах) методы постановки оптимизационных (транспортных) задач к исследованию природно-технических систем, к которым относится транспортная система крупного города.

Терминологически можно проследить параллели в структуре и постановке задач логистики и задачи формирования эффективной транспортной системы (рис. 4.48).

Применение предпрогнозных (оптимальных) моделей связано с ценностями решений как прямой, так и двойственной задачи. В обоих случаях результаты решения представляют собой возможные сценарии.



**Рис. 4.47.** Взаимосвязь трехуровневой классификации транспортных моделей городов

В первом случае – сценарии изменения организации дорожного движения: пешеходные улицы; улицы для движения общественного транспорта; специализация полос движения.

Во втором случае – сценарии в транспортном планировании: формирование транспортного спроса; планирование развития инфраструктуры; планирование природоохранных мероприятий.

Оптимальные модели имеют обратные связи с отдельными компонентами прогнозных транспортных моделей. Прогнозная модель является генератором ограничений (правых частей ограничений) для постановки оптимальной модели. В представленной работе это осуществлено через дополнительные модули, такие как стандартный модуль – emission of air pollution, и вновь разработанные модули расчета рисков ДТП и шумового загрязнения территории.

В свою очередь, результаты решения предпрогнозных моделей определяют оптимальные сценарии развития всей транспортной системы города. Решение прямой и затем двойственной задачи линейного программирования при помощи расчетного модуля simplex method позволяет оценивать запасы ресурсов и получать наборы сценариев развития транспортной системы. Далее в автоматическом режиме эти



Рис. 4.48. Схема структурного и терминологического соответствия оптимальных моделей в задачах оптимизации технических и природно-технических систем

сценарии можно вводить как изменения в прогнозную модель, вносить соответствующие изменения в модель транспортного спроса и вновь искать сценарии его оптимального удовлетворения.

Имея в распоряжении трехуровневую систему транспортных моделей (предпрогнозная, прогнозная, имитационная), можно сформировать единую систему выработки и принятия решений, направленных на эффективное, с точки зрения качества жизни, функционирование и развитие транспортной системы крупного города, в идеале строго формализованную и отвлеченную от субъективного воздействия и влияния человека на принятие решений.

## Выводы

Установленная в предыдущих главах логическая связь качества жизни на территории и эффективности функционирования транспортной системы позволила в данной главе при формализации оптимизационной задачи аналогичным образом сформировать основные составляющие оптимальной модели – целевую функцию и систему ограничений.

В соответствии с логико-графической моделью формирования эффективной транспортной системы крупного города математическая модель также есть результат сопоставления целей – времени реализации транспортных корреспонденций и ресурсов, затрачиваемых на достижение этих целей.

Для решения оптимизационной задачи была построена оптимальная модель математического программирования (линейного). Использование теории и инструментов математического программирования, в частности линейного программирования, широко применяется в решении различных задач транспортной отрасли, в которую эти задачи перешли из области промышленного производства, планирования и управления. В транспортной сфере наиболее распространены модели в виде транспортной задачи. Использование этих моделей решает большой класс задач логистики и оптимизации перевозочного процесса в отраслях производства и на предприятиях, в том числе на отдельных предприятиях пассажирского транспорта.

В данном исследовании впервые предложено использовать теорию и инструменты постановки и решения оптимизационных задач линейного программирования для решения задачи транспортной системы в целом, в частности задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города. Постановка такой задачи и последующее формирование модели для ее решения стали возможными благодаря приведенной в предыдущих главах строгой формализации назначения транспортной системы города в виде построенной модели транспортного спроса.

Найденный транспортный спрос позволил сформировать «верхние» ограничения оптимизационной задачи. Поставленные в этой главе и введенные в оптимальную модель «нижние» ограничения могут быть существенно дополнены заданием дополнительных (пользовательских) требований к функционированию транспортной системы города.

Главное достоинство математических моделей оптимального планирования заключается в строгости теоретических положений их решения и анализа. Приведенное оптимальное решение формирования эффективной транспортной системы города Перми в этом плане – лучшее решение модели, причем не абсолютно, а относительно приня-

тых степеней свободы и ограничений задачи. Кроме того, определяющее значение имеет выбранный на этапе постановки задачи критерий оптимальности.

При построении математической модели число степеней свободы задачи определено в зависимости от зоны (территории города), в которой совершается корреспонденция; способа и типа реализации корреспонденции.

Представленная модель, ее решение и анализ решения двойственной задачи проведены в 90-мерном линейном пространстве возможных решений. Найденное в этом пространстве оптимальное решение представляет собой эффективную транспортную систему.

Ценность моделирования при поиске эффективности транспортной системы заключается в возможности изменения параметров функционирования системы и оценки влияния этого изменения на конечный результат. В представленной модели города Перми, меняя длину проезжих частей дорог исследуемых областей, предельную экологическую нагрузку, спрос на передвижение, характеристики подвижного состава и степень их использования, в результате моделирования будем получать новое оптимальное распределение транспортного спроса. Это позволит находить наиболее эффективные решения задачи формирования транспортной системы города в условиях любых ограничений, как территориальных, так и финансовых.

В практическом плане интерес вызывает решение соответствующей двойственной задачи линейного программирования. Впервые создан инструмент, позволяющий оценить имеющиеся в распоряжении сообщества различные ресурсы с точки зрения их запасов и вклада (влияния) на эффективность транспортной системы города, а следовательно, и на качество жизни. Этими ресурсами являются входящие в оптимизационную задачу ограничения развития транспортных систем: объемы инфраструктуры различных систем транспорта, предельные уровни загрязнения атмосферы и шумового загрязнения территории.

В конечном итоге именно управление имеющимися ресурсами есть единственный инструмент улучшения как качества жизни на территории, так и качества функционирования действующей на территории транспортной системы.

Созданию системы эффективного управления транспортной системой крупного города в условиях действующих ограничений по потребляемым ресурсам посвящена следующая глава.

## Глава 5

# ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМОЙ КРУПНОГО ГОРОДА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

### 5.1. Основы теории управления природно-техническими системами

В мире существуют опробованные и доказанные временем основные направления повышения эффективности функционирования транспортных систем в городах и общего повышения качества жизни [13]. С большой долей вероятности можно сказать, что реализация любого из них позволит улучшить основные качественные показатели функционирования городской транспортной системы. При их реализации можно вообще не проводить научные исследования, не строить прогнозные и оптимизационные модели, а лишь следовать опыту европейских городов, которые прошли свой путь автомобилизации чуть раньше, чем города России.

Однако путь имплементации зарубежных организационно-технических решений в области транспортного планирования и организации дорожного движения не всегда венчается успехом по причине несовершенства инструментов и технологий реализации управленческих решений. В отличие от вопроса «что делать?», на вопрос «как делать?» в вузе не дают ответа, а обучение на своих ошибках обходится слишком дорого. Мало принять закон или распоряжение – необходимо предусмотреть механизмы их реализации.

Транспортная система крупного города, включающая в себя дорожно-транспортный комплекс, участников дорожного движения и окружающую среду, как отмечалось выше, является сложной природно-технической системой. Участники дорожного движения в процессе



взаимодействия друг с другом образуют социальную систему, выступая при этом (в терминах теории управления) агентами.

Организация дорожного движения, как и транспортного обслуживания населения и дорожное строительство, осуществляемые в соответствии с законом органами местного самоуправления, представляет собой организационную систему (ОС), состоящую (в терминах теории управления) из управляющего центра и агентов (субъектов управления). Она представляет собой объединение людей, совместно реализующих некоторую цель и действующих на основе определенных процедур и правил (федеральных, региональных и местных законодательных актов, ПДД и т.п.), что отличает эту организационную систему от коллектива или группы людей, не имеющих одной четкой цели и свода процедур и правил [149,150].

Применительно к организационным системам, подобным транспортной, *механизм функционирования* – это совокупность правил, законов и процедур, регламентирующих взаимодействие участников организационной системы; *механизм управления* – совокупность процедур принятия управленческих решений [151–154].

В теории управления объектом исследования являются организационные системы, предметом – механизмы управления организационными системами, а основным методом исследования – математическое моделирование.

Методы исследования механизма управления основываются на *оптимизационных* [155] и *теоретико-игровых моделях* [156]. Механизмы, основывающиеся на оптимизационных моделях, в свою очередь, подразделяются на механизмы, использующие аппарат: теории вероятностей (в том числе теорию надежности, теорию массового обслуживания, теорию статистических решений), теории оптимизации – линейное и нелинейное (а также стохастическое, целочисленное, динамическое и др.) программирование, дифференциальных уравнений, оптимального управления; дискретной математики – в основном теорию графов (транспортная задача, задача о назначении и выборе кратчайшего пути, календарно-сетевое планирование и управление, задачи о размещении, распределении ресурсов на сетях и т.д.).

Сформулированные в предыдущих главах подходы, алгоритмы и технологии решения задачи построения эффективной транспортной системы крупного города в итоге решают управленческую задачу методом математического моделирования, сводящегося на конечном этапе к решению оптимальной модели задачи линейного программирования.

Управление ОС представляет собой воздействие на управляемую систему с целью обеспечения требуемого ее поведения. Процесс управ-

ления ОС воздействует на разные предметы и компоненты управления, из которых можно выделить:

- управление составом [157–159];
- управление структурой [160];
- институциональное управление (управление ограничениями и нормами деятельности) [159,160];
- мотивационное управление [153,160] (управление предпочтениями и интересами);
- *информационное управление* (управление информацией, которой обладают участники ОС на момент принятия решений);
- *управление порядком функционирования* (управление последовательностью получения информации и выбора стратегий участниками ОС) [158].

Кроме того, транспортная система крупного города как организационная система предполагает наличие нескольких уровней управления, отличающихся временем отклика системы на управляющее воздействие: стратегическое управление, тактическое и оперативное управление.

На каждом уровне управления можно выделить два способа, с помощью которых оно осуществляется: процессное и проектное управление (табл. 5.1).

Таблица 5.1

#### Различные способы управления организационными системами

Способы управления	Компоненты и инструменты управления			
Процессное управление	Планирование процесса	Организация процесса	Стимулирование процесса	Контроль над процессом
Проектное управление	Концепция	Стратегия	План	Программа

В настоящей главе сформулируем принципы построения системы управления транспортной системой города, классифицируемые по четырем основным признакам, определяющим задачи исследования:

1. *Предмет управления:*
  - 1.1. Состав ОС (управление составом).
  - 1.2. Структура ОС (управление структурой).
  - 1.3. Ограничения и нормы деятельности (институциональное управление).
  - 1.4. Предпочтения (мотивационное управление).
  - 1.5. Информированность (информационное управление).

## 2. Функция управления:

- 2.1. Планирование.
- 2.2. Организация.
- 2.3. Стимулирование.
- 2.4. Контроль.

## 3. Масштаб реальных систем:

- 3.1. Город.

## 4. Отраслевая специфика:

- 4.1. Муниципальное управление.

Процесс формирования эффективной транспортной системы в крупном городе изначально возможен при условии существования в нем эффективной системы управления городским хозяйством. Достижение качества функционирования транспортной системы города предполагает наличие эффективной системы управления его дорожно-транспортным комплексом. Однако эффективное функционирование транспортной системы, понятие о котором дано в предыдущих главах, предполагает наличие качественной системы управления различными сферами жизни современного города.

Объекты влияния, управление которыми согласно Федеральному закону от 6 октября 2003 г. № 131-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» (далее – Федеральный закон № 131-ФЗ) относится к вопросам местного значения городского округа, могут находиться в различных функциональных блоках в системе городского хозяйства и управления в соответствии с подп. 2, 3, 5, 7, 15, 25 и 26 ст. 16 этого Закона, определяющими полномочия и зоны ответственности органов местного самоуправления на своих территориях.

Можно указать на соответствие между введенными в математическую модель оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города видами ограничений и предметами управления, относящимися к вопросам местного самоуправления согласно Федеральному закону № 131-ФЗ (табл. 5.2) [161].

Выбранный в качестве ограничений функционирования транспортной системы набор представляет собой систему неравенств, каждое из которых определяет ту или иную сферу воздействия на режим функционирования транспортной системы. Комплекс (сочетание) этих воздействий определяет текущую предельную эффективность действующей транспортной системы.

Дальнейшее развитие транспортной системы предполагает выработку управленческих решений и осуществление воздействий на систему ограничений оптимальной модели формирования эффективной транспортной системы крупного города. Например, введенные в модель группы ограничений по транспортному предложению, различного вида загрязнениям городской среды, рискам вреда от ДТП в реше-

Таблица 5.2

**Соответствие управляющих воздействий, введенных  
в оптимальную модель в виде ограничений и полномочий  
органов местного самоуправления, определенных законом**

<p>Предметы управления, введенные в оптимальную модель задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города в виде ограничений</p>	<p>Вопросы местного значения согласно Федеральному закону № 131-ФЗ</p>
<p><i>Протяженность улично-дорожной сети города</i> <i>Протяженность выделенных линий для движения маршрутных транспортных средств в системе улично-дорожной сети города</i></p>	<p><i>Статья 16</i> <i>...3) владение, пользование и распоряжение имуществом, находящимся в муниципальной собственности городского округа...</i> <i>5) содержание и строительство автомобильных дорог общего пользования, мостов и иных транспортных инженерных сооружений в границах городского округа, за исключением автомобильных дорог общего пользования, мостов и иных транспортных инженерных сооружений федерального и регионального значения</i></p>
<p><i>Количество подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования</i></p>	<p><i>Статья 16</i> <i>... 7) создание условий для предоставления транспортных услуг населению и организация транспортного обслуживания населения в границах городского округа</i></p>
<p><i>Уровень загрязнения городской атмосферы отработанными газами автотранспортных средств</i> <i>Уровень шумового загрязнения территории города</i></p>	<p><i>Статья 16</i> <i>...11) организация мероприятий по охране окружающей среды в границах городского округа;</i> <i>12) организация и осуществление экологического контроля объектов производственного и социального назначения на территории городского округа, за исключением объектов, экологический контроль которых осуществляют федеральные органы государственной власти...</i> <i>25) организация благоустройства и озеленения территории городского округа, использования и охраны городских лесов, расположенных в границах городского округа</i></p>
<p><i>Уровень риска ДТП на улично-дорожной сети города</i></p>	<p><i>Нет полномочий</i></p>

нии двойственной задачи покажут целесообразность принятия тех или иных управленческих воздействий, направленных на изменения показателей каждого из введенных ограничений на территории города.

Некоторые из этих управленческих решений относятся функционально к сферам управления, напрямую не затрагивающим вопросы транспортного обслуживания населения и дорожной деятельности. Однако наличие в оптимальной модели системной связи ограничений с целевой функцией функционирования транспортной системы не позволит повышать ее качественные показатели, осуществляя управленческие воздействия на изменения только одной группы ограничений в модели (например, в области транспортного предложения), бесконечно увеличивая объемы ввода в эксплуатацию объектов транспортной инфраструктуры (дорог).

Своих воздействий потребуют другие сферы управления, затрагивающие введенные в модель типы ограничений. Это, в свою очередь, потребует качественной системы управления не только дорожно-транспортным комплексом города, но и всей сферой городского управления.

## **5.2. Субъективные и объективные проблемы управления. Несовершенство существующей системы управления**

### **5.2.1. Объективные проблемы развития транспортных систем городов**

Можно выделить целый комплекс объективно существующих внешних и наследуемых внутренних факторов, являющихся первопричинами существования проблем в развитии транспортных систем городов. К ним следует отнести:

- рост уровня автомобилизации населения;
- увеличение потребности жителей города в перемещениях;
- снижение доли общественного транспорта в пассажирских перевозках;
- увеличение интенсивности использования индивидуального транспорта;
- диспропорцию между автомобилизацией и темпами дорожного строительства;
- градостроительно-планировочные проблемы развития городской территории.

### **5.2.2. Субъективные проблемы управления развитием транспортных систем городов**

Следует дать оценку существующим субъективным проблемам развития транспортных систем городов, которые, как и все субъективные

проблемы, находятся в зависимости от качества существующей в этой сфере системы управления. Следовательно, можно характеризовать все субъективные проблемы в развитии транспорта в крупных городах как проблемы управления. Зафиксируем это и остановимся подробнее на каждом из субъективных факторов.

### **Несовершенство системы организации и управления развитием дорожно-транспортного комплекса**

Практически все российские регионы и города в настоящий момент стоят на пороге переосмысления общих подходов к развитию дорожно-транспортного комплекса своих регионов. Каждый регион (муниципальное образование) идет своим путем, применяя самые разнообразные формы и методы организации системы управления в сфере как организации дорожного движения, так и дорожного строительства, содержания и благоустройства – комитеты, департаменты, отделы, государственные и муниципальные учреждения и предприятия.

Все чаще монопольными субъектами принятия решений по развитию транспортной системы города становятся первые лица городской и краевой власти, а также строительное лобби. В этих условиях системные ошибки, в том числе носящие необратимый характер, становятся практически неизбежными.

К сожалению, представители органов местного самоуправления из соседних регионов не контактируют между собой. Хотя обмен опытом с другими крупными городами России пригодился бы: нет необходимости заключать партнерские отношения с зарубежными городами, тратить деньги на заграничные командировки, достаточно посетить соседние российские города и обменяться опытом в вопросах транспортного планирования и организации дорожного движения.

Даже бытовой опыт подсказывает: умея управлять, можно использовать по назначению и систему с плохой материальной основой или базисом. Современный акцент на совершенствовании базиса системы необходим, но не первичен. Мероприятия по организации дорожного движения, как правило, локальны, плохо связаны и не сведены в единую городскую систему управления. Подразделения, службы, органы управления и власти не всегда представляют для себя цели управления дорожным движением и, вследствие этого, не понимают, чем управлять и для чего управлять. В результате сегодня можно констатировать, что серьезные вливания (материальные и финансовые) в дорожно-транспортную систему в течение последних пяти лет не дали положительного эффекта.

Все принимаемые в настоящий момент управленческие решения в области развития дорожной сети и организации дорожного движения носят волевой характер, нередко зависят от мнения одного человека и

поэтому в лучшем случае решают задачу устранения дефектов, видимых на глаз.

Несмотря на кажущуюся очевидность, решение проблемы улучшения условий движения на УДС путем выделения основных капиталовложений в развитие улично-дорожной сети в условиях крупного города совершенно ошибочно. Улучшение транспортного обслуживания, осуществляемое путем направления бюджетных средств на строительство дорогостоящих магистралей и преждевременных многоуровневых пересечений, еще более усугубит транспортную обстановку, поскольку уже сегодня разрыв между количеством автомобилей, находящихся в собственности жителей крупных городов, и приростом пропускной способностей УДС чрезвычайно велик.

Во многих крупных российских городах *отсутствует единый постоянно действующий орган управления*, ответственный за координацию работы различных организаций, деятельность которых непосредственно связана с обеспечением надлежащих условий движения и состояния дорожной сети.

На сегодняшний день *не реализован механизм участия граждан* в организации и управлении развитием дорожно-транспортного комплекса. Нет ответственного лица, к которому попадают письма граждан с жалобами на качество сети и вопросами об организации дорожного движения, а главное – лица, защищающего интересы заказчика – участника дорожного движения (пешехода, водителя).

В Российской Федерации действует единственный закон, непосредственно касающийся вопросов организации дорожного движения, – Федеральный закон от 10 декабря 1995 г. № 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения» (далее – Федеральный закон № 196-ФЗ), статья 21 которого гласит: «Мероприятия по организации дорожного движения осуществляются в целях повышения его безопасности и пропускной способности дорог федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации и органами местного самоуправления, юридическими и физическими лицами, в ведении которых находятся автомобильные дороги». В большинстве крупных российских городов эта норма закона не выполняется.

*Отсутствие в структуре муниципального управления подразделений*, ответственных за состояние, эффективность функционирования и развитие улично-дорожной сети, не только приносит прямые убытки городскому бюджету, но и все больше перекладывает решение чисто городских вопросов на плечи региональной власти. В конечном счете это приводит к размыванию ответственности за результаты осуществляемых (или не осуществляемых) мероприятий в названной сфере.

Более *серьезными последствиями отсутствия единого заказчика*, учитывающего как общие экономические интересы развития инфра-

структуры, так и интересы непосредственных участников дорожного движения – водителей, пассажиров, пешеходов, являются:

- отсутствие единых критериев оценки деятельности по транспортному планированию и организации дорожного движения;
- неэффективное использование возможностей существующей УДС;
- неэффективное использование материальных средств в строительстве, реконструкции и ремонте УДС;
- отсутствие взаимоувязанной схемы финансирования развития и содержания УДС;
- убытки и упущенная выгода автоперевозчиков;
- повышенная экологическая опасность дорожно-транспортного комплекса и риски возникновения ДТП.

Кроме отсутствия единого заказчика, существует недостаток квалифицированных кадров в отрасли. В России нет учебных заведений по подготовке специалистов в области транспортного планирования и организации дорожного движения. Люди, принимающие решения в этой сфере деятельности, имеют чаще дорожное или общестроительное образование. Стратегическое (уровня генерального плана) транспортное планирование отдано на откуп иностранным специалистам, и это представляется вполне разумным и оправданным.

Кроме того, решения в области среднесрочного, краткосрочного планирования и оперативного управления должны обязательно приниматься, что называется, на местах. Много еще крупных российских городов, в которых вопросами разработки генеральных планов и документов в их развитие традиционно занимались извне, что само по себе именно в дорожно-транспортной сфере недопустимо.

Затрачиваемые в последнее время бюджетные ресурсы, направленные на автоматизацию процессов организации дорожного движения, не есть панацея от бед. В первом приближении необходимо знать до тонкостей весь алгоритм «ручного» процесса управления предметной областью, что в отсутствие специализированных знаний и необходимой информации вынуждает использовать интуитивные подходы к решению формальных инженерных задач.

Без четко прописанных и алгоритмизированных «ручных» процедур принятия решений в области организации дорожного движения попытки автоматизировать этот процесс обречены на неудачу (нечего автоматизировать).

В области управления дорожно-транспортным комплексом города, как и в других вопросах развития экономики и повышения качества жизни, до конца не ясна функция государства. Призывы к наращиванию функций государственного управления в сфере транспортных систем городов не кажутся обоснованными. Даже роль муниципалитетов городов представляется вполне соответствующей по объемам, рыча-



гам и возможностям в деле создания эффективных способов удовлетворения потребностей горожан, в том числе транспортных. Уже сейчас представляется возможным в действующем правовом поле уверенно проводить на муниципальном и государственном уровне политику поддержания баланса интересов всех участников функционирования системы городского транспорта.

Именно поддержанием баланса интересов различных по объемам потребляемых ресурсов участников дорожного движения продиктованы в своем большинстве бюджетные решения представительных органов власти городов. Например, чтобы муниципалитет принял решение вкладывать в строительство автомобильных стоянок собственные средства, от него требуется серьезная политическая воля.

В этом контексте автостоянки представляются такими же объектами дорожного сервиса, как и автозаправочные станции (АЗС) и станции техобслуживания (СТО). При таком их позиционировании очевидно, что депутаты любой городской Думы никогда не проголосуют за то, чтобы строить АЗС за муниципальные деньги. Представляется, что и автостоянки – объекты из того же ряда, следовательно, они должны возводиться на основе открытой свободной конкуренции и рынка. При этом надо понимать, что затраты в итоге все равно оплатят автовладельцы, хотя они пока представляют меньшинство городского населения, а это значит, что общественный ресурс в виде автостоянок, построенных на общественные деньги, используется не в интересах большинства.

Гораздо более интересным в этом отношении представляется вариант государственно-частного партнерства, когда инвестиционную составляющую выбирает частный инвестор, а муниципалитет, государство, если речь об участии региональных бюджетов, вкладывается в это гарантиями перед банками, как при концессии в дорожном строительстве, или посредством информационной и административной поддержки. Например, заранее доводя до сведения автовладельцев, что в таком-то квартале, например при долевом участии, будет построена автопарковка, а все другие бесплатные парковки на территориях общего пользования в данном районе будут закрыты.

Конечные формы управления муниципальным имуществом могут быть разными (например, передача в доверительное управление коммерческим структурам построенных муниципальных объектов).

С ростом общей автомобилизации населения в городах становится очевидным, что всем автовладельцам нужно готовиться к существенному увеличению своей доли ответственности за содержание и развитие дорожно-транспортного комплекса по сравнению с другими горожанами, не имеющими в собственности автомобилей.

В современном городе должна закрепиться общественная парадигма: если ты обладаешь личным автомобилем, то в городе он не средство

передвижения, а роскошь. Со временем финансовая нагрузка на содержание и эксплуатацию автомобиля будет расти все больше и больше: бензин, техобслуживание, платные стоянки, парковки и прочее, и к этому нужно быть готовым. Муниципалитет брать на себя такое бремя за счет неавтомобилистов, которых – большинство, не может.

Отчасти иждивенческая позиция автовладельцев в смысле ожидания завышенных объемов предоставления им гарантированных услуг по содержанию и эксплуатации их движимого имущества, по меньшей мере, не обоснована. Следует не забывать, что все современные блага в виде индивидуальной мобильности создаются всеми жителями города, а вот объемы потребления этих благ существенно различаются, и значительную долю этого объема потребляют именно автовладельцы, составляющие только 20% российского населения.

### **Недостаточная законодательная база в области управления транспортной системой города**

Конституция Российской Федерации устанавливает основные принципы построения системы органов государственной власти, определяет их правовой статус, разграничивает предметы ведения Федерации и ее субъектов, провозглашает права и свободы человека и гражданина, гарантирует их государственную защиту, содержит иные важнейшие положения, касающиеся функционирования демократического правового государства. При этом слово «транспорт» употребляется в основном документе только один раз. Даже обеспечение безопасности дорожного движения как самостоятельное направление деятельности, составляющим элементом которого является организация дорожного движения, не отражено в положениях Конституции Российской Федерации.

Опосредованное отношение к транспортным системам имеет лишь деятельность по обеспечению безопасности дорожного движения, которая охватывается понятием «общественная безопасность» и которую ст. 72 Конституции Российской Федерации относит к совместному ведению Федерации и ее субъектов. Это положение получило дальнейшее развитие в нормах федеральных законов, указах Президента Российской Федерации, постановлениях Правительства Российской Федерации, правовых актах федеральных органов исполнительной власти, а также в нормах законов и иных нормативных правовых актов субъектов Российской Федерации.

Следует отметить, что все проблемы, связанные с развитием дорожно-транспортного комплекса и управления транспортной системой города, имеют корни в федеральном законодательстве, так как нормативная база отстает от требований времени.

В сфере градостроительства и транспортного планирования действует Градостроительный кодекс Российской Федерации, а также рассмотренный выше Федеральный закон № 131-ФЗ, в ст. 16 которого затронуты вопросы полномочий органов управления городов:

«Статья 16. Вопросы местного значения городского округа:

...5) дорожная деятельность в отношении автомобильных дорог местного значения в границах городского округа, включая создание и обеспечение функционирования парковок (парковочных мест), а также осуществление иных полномочий в области использования автомобильных дорог и осуществления дорожной деятельности в соответствии с законодательством Российской Федерации;

...7) создание условий для предоставления транспортных услуг населению и организация транспортного обслуживания населения в границах городского округа» [161].

Непосредственно затрагивает область дорожного движения единственный закон – № 196-ФЗ, статья 6 которого весьма пространно трактует полномочия федеральной, региональной и местной власти в указанной области. Многие субъекты Федерации, понимая это, пытаются самостоятельно выстраивать политику отношений и устанавливать свои правила игры: они разрабатывают концепции развития автотранспортного комплекса регионов, на региональном и местном уровне заново определяют сферы компетенции и ответственности различных служб, связанных с развитием дорожно-транспортного комплекса региона, механизмы их взаимодействия координации и обмена информацией.

В области *транспортного планирования* в долгосрочной перспективе на территории крупных городов действуют положения генерального плана, в котором определены долгосрочные цели и этапы развития УДС города.

В области формирования *парковочной политики* нет целого ряда законодательных актов, регламентирующих принятые ранее постановления в сфере предоставления платных услуг, а также задержания транспортных средств и иных мер наказания их собственников. Не разработаны нормативы градостроительного регулирования в части градостроительной деятельности на территориях города, находящихся в непосредственной близости от городских магистральных улиц. Не утверждены градостроительные регламенты и предельные параметры в части обеспеченности объектов нового строительства и реконструкции местами для паркования автотранспорта.

Законодательно не зафиксированы размеры штрафных санкций к предприятиям и организациям, хозяйственная деятельность которых связана с ограничениями (закрытием) движения автомобильного транспорта и пешеходов на существующей УДС города, не определен порядок принятия решения о таких ограничениях. Не разработаны ме-

ханизмы по упорядочению выдачи согласований проектной документации и условий производства работ в границах красных линий дорог и дорожных сооружений.

Принимаемые законодательные акты, нацеленные на совершенствование государственного управления в области дорожной деятельности («Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта», Федеральный закон «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и принятый в первом чтении проект Федерального закона «Об общих принципах организации транспортного обслуживания населения на маршрутах регулярного сообщения в Российской Федерации»), не только не уделяют должного внимания вопросам функционирования и развития транспортных систем, но даже не формулируют само понятие – «транспортная система».

Качество организации дорожного движения в российских городах отстает от общеевропейского. Это отставание объясняется как неудовлетворительной практикой внедрения средств организации дорожного движения, так и отсутствием системного подхода к их назначению и проектированию. В России на всех уровнях власти не создано органа, отвечающего за организацию дорожного движения, нет соответствующей нормативно-правовой базы.

Вопросы транспортного планирования, организации и обеспечения безопасности дорожного движения не отражены в системе градостроительной документации. Отсутствие в Градостроительном кодексе Российской Федерации требований по опережающим все этапы и основополагающим принципам транспортного подхода к выбору места строительства не позволяет делать вывод о том, насколько территориально целесообразно строительство различных объектов.

Следует отметить, что предыдущая редакция градостроительного кодекса РФ уделяла вопросам развития транспортных систем городов несколько большее внимание. Терминологически были закреплены такие определения, как:

«Концепция развития» (только для крупнейших городов и агломераций); «Транспортный раздел генплана» (или его корректура); «Комплексная транспортная схема» (КТС); «Комплексная схема организации городского движения» (КСОДД) или комбинация двух последних документов – «Проект организации дорожного движения» (ПОД).

В современной редакции Градостроительного кодекса [3] большинство этих терминов отсутствуют, как и регламент их применения в подготовке градостроительной документации.

В условиях роста автомобилизации особую роль приобретает изменение отношения к государственной политике в области организации

дорожного движения как наиболее выгодной деятельности по сравнению с дорожным строительством в связи с низкими экономическими затратами.

Ведущая роль в регламентации общественных отношений в области обеспечения безопасности и организации дорожного движения принадлежит Федеральному закону от 10 декабря 1995 г. № 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения» [162], который, по существу, служит базой для рассматриваемой сферы общественных отношений. В соответствии со ст. 21 Закона мероприятия по организации дорожного движения проводятся в целях повышения его безопасности и пропускной способности дорог федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации и органами местного самоуправления, юридическими и физическими лицами, в ведении которых находятся автомобильные дороги.

Разработка и проведение указанных мероприятий должны осуществляться согласно нормативным правовым актам Российской Федерации и нормативным правовым актам ее субъектов на основе проектов, схем и иной документации, утверждаемых в установленном порядке. Вместе с тем можно констатировать, что в настоящее время в стране фактически отсутствуют нормативно установленная единая система и структура управления организацией дорожного движения [163].

Существующие нормативные правовые акты, в том числе Федеральный закон «Об общих принципах организации местного самоуправления в России», Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях, Градостроительный кодекс и Земельный кодекс Российской Федерации [13, 15] не позволяют четко распределить обязанности и ответственность субъектов за организацию дорожного движения на всех уровнях, установить их функциональные связи и координировать деятельность, рационально планировать осуществление первоочередных комплексных мероприятий.

Вопросы организации дорожного движения не нашли достаточного отражения в Федеральном законе № 131-ФЗ [129], статья 6 которого относит к ведению муниципальных образований лишь муниципальное дорожное строительство и содержание дорог местного значения, мостов и иных транспортных сооружений. Постановлением Правительства Российской Федерации от 23 октября 1993 г. № 1090 «О Правилах дорожного движения» [164] утверждены Правила дорожного движения Российской Федерации, которыми устанавливается единый порядок дорожного движения на всей территории страны, закрепляются права и обязанности всех категорий участников дорожного движения.

В то же время отдельные положения этих Правил [164], регламентирующие вопросы организации дорожного движения, нуждаются в корректировке. Так, в частности, дорога как инженерное сооружение (включающее в себя тротуары, обочины и т.д.) используется и приспособлена для движения не только транспортных средств, но и пешеходов, однако в определении термина «дорога» речь идет о ее использовании только транспортными средствами.

Отдельные государственные функции по организации дорожного движения отражены в Указе Президента Российской Федерации от 15 июня 1998 г. № 711, утвердившем Положение о Государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации [111].

### **Недостаточная информационная составляющая при принятии управленческих решений**

То, что было только моделью, не всегда воплощается в реальности. Но то, что все же воплотилось, изначально было последовательно идеей, моделью, потом проектом. Можно отметить, что, к глубокому сожалению, после реализации какого-либо проекта в области развития дорожно-транспортного комплекса любого без исключения российского города мало кто об этом вспоминает, не предпринимаются попытки подтвердить или опровергнуть прогнозы модели на основе наблюдений за реальным объектом: участком улично-дорожной сети или новой схемы организации дорожного движения.

Эффективное управление такими сложными организационно-техническими системами, как транспортный комплекс города, возможно лишь в тех городах, где внедрена система количественных оценок принимаемых управленческих решений.

Существенное увеличение объемов транспортного движения требует принятия обоснованных решений по развитию дорожной сети и организации дорожного движения на базе своевременной, полной и достоверной информации о параметрах транспортных потоков на дорожной сети городов и регионов. Получаемая в настоящее время информация является недостаточной, разрозненной и не систематизируется. Организации, нуждающиеся в ней, не получают ее вовремя и не имеют автоматизированных рабочих мест для ее обработки, номенклатура показателей ограничена, что не позволяет принимать эффективные управленческие решения. Кроме того, транспортная система является весьма сложным объектом в плане ведения учета и контроля его состояния.

В вопросах содержания объектов транспортной инфраструктуры и средств регулирования дорожного движения первоочередной можно

назвать задачу паспортизации, учета и контроля функционирования объектов. Приведем примеры:

- орган администрации города, уполномоченный действовать в области содержания и строительства автомобильных дорог, организации транспортного обслуживания населения, не всегда владеет информацией о технических характеристиках принадлежащих ему дорог (протяженность, ширина проезжей части, количество полос движения и т.д.) и, как следствие, испытывает трудности при планировании работ;

- отсутствие схем дорожной разметки, утвержденных ГИБДД, ведет к невозможности проведения тендера на эти работы;

- отсутствие полной дислокации дорожных знаков в городе значительно затрудняет оперативное управление дорожным движением, позволяет бесконтрольно использовать бюджетные деньги на их обслуживание;

- отсутствие учета мест установки пешеходных ограждений, их собственников и информации о закреплении их содержания за конкретными организациями приводит к бесхозности этого элемента организации дорожного движения и в результате к неприглядному виду городских улиц;

- судебные органы, органы ГИБДД, страховые компании не могут своевременно получить необходимые и достоверные сведения для рассмотрения дел по автодорожным происшествиям.

В крупных городах Российской Федерации в последние десятилетия сложилась уникальная система двойного (а если принимать во внимание полномочия ГИБДД, Федеральной службы по надзору в сфере транспорта, Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, различных межведомственных комиссий и так далее, – тройного и более высокого порядка кратности) контроля в отношении городской транспортной системы.

На разных уровнях системы управления дорожно-транспортным комплексом ведутся различные базы данных по учету технического состояния объектов транспортной инфраструктуры и безопасности дорожного движения. Пользование такого рода информацией в табличной форме требует хорошего абстрактного мышления и знания территории. Если этого нет, то получить четкую картину о состоянии функционирования городской транспортной системы, а тем более о сложном рисунке ее взаимосвязей с общей эколого-экономической ситуацией на территории города достаточно трудно.

Кроме того, транспорт относится к самым динамичным сферам, изменения в которых требуют постоянной актуализации информации в разрозненных базах данных и устаревающих паспортах.

Возникают серьезные вопросы в следующих областях:

**контроль:**

- расходование бюджетных средств, направляемых на строительство новых объектов транспортной инфраструктуры, и содержание дорожных объектов и объектов благоустройства;
- сроки службы покрытий и выполнения работ, а также качество работы подрядных организаций;
- состояние безопасности дорожного движения;
- экологическая ситуация, связанная с развитием дорожно-транспортного комплекса;

**учет:**

- инвентаризация и паспортизация автомобильных дорог, УДС городов, объектов благоустройства;
- учет аварийности и травматизма на автомобильных дорогах и т.д.;
- учет влияния автомобильного транспорта при проведении сводных расчетов загрязнения окружающей среды для целей нормирования выбросов предприятий;

**планирование:**

- определение стоимости строительства и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры;
- планирование ремонтных работ на длительный срок и автоматизированная корректировка планов при изменении дорожно-транспортной обстановки;
- составление маршрутов движения личного и общественного транспорта в условиях быстро изменяющихся пассажиропотоков;
- разработка современных систем управления дорожным движением и мероприятий по повышению безопасности дорожного движения;
- разработка мероприятий по снижению экологической нагрузки от автотранспорта;

**прогнозирование:**

- разработка перспективных комплексных транспортных схем для территорий области;
- прогнозирование работы дорожно-транспортного комплекса на перспективу и в условиях чрезвычайных ситуаций.

Разрешение этих и других вопросов позволит максимально быстро и своевременно принимать эффективные управленческие решения, снизить затраты на содержание УДС и ее ремонт, улучшить экологическую обстановку, увеличить эффективность функционирования транспортной системы города в целом.

Дорожно-транспортный комплекс города, как и любой другой элемент природно-технической системы, может:

*работать* – иметь набор потребительских и эксплуатационных свойств, заложенных в него при его создании;



*не работать* – не соответствовать тем потребительским и эксплуатационным свойствам, которые были заложены в него при его создании (разрушение дорожной одежды, нарушение работоспособности технических средств организации движения). При этом требуется ремонт вышедших из строя элементов дорожно-транспортного комплекса города с целью доведения его потребительских и эксплуатационных свойств до значений, заложенных при его создании;

*морально устареть* – при поддержании дорожно-транспортного комплекса города в заданных на период его создания параметрах потребительских и эксплуатационных свойств он не удовлетворяет возрастающим потребностям потребителей. Требуется реконструкция элементов дорожно-транспортного комплекса для изменения его потребительских и эксплуатационных свойств.

Основной тезис в такой декомпозиции можно сформулировать следующим образом: нельзя подвергать реконструкции дорожно-транспортный комплекс города, находящийся в неработающем состоянии.

Серьезной проблемой в развитии дорожно-транспортного комплекса города является отсутствие информации о существующем состоянии транспортной системы и системы работы с этой информацией, а не проблема нехватки финансирования, как это часто принято считать.

Хорошей иллюстрацией этого утверждения может служить анализ опыта развитых европейских стран в вопросах развития дорожно-транспортного комплекса. Имея существенно большие финансовые возможности в реализации различных проектов в области дорожного строительства и организации движения, ни один европейский город не смог решить проблему обеспечения транспортных потребностей населения при помощи простого финансового вливания.

Проблема развития дорожно-транспортного комплекса в городах России еще не стала достаточно острой, так как большинство участников дорожного движения не осознают свои права в данном вопросе. Приобретая товар или услугу, они понимают, что вовлечены в товарно-денежные отношения. Находясь в пробках на дорогах города, большинство водителей (владельцев транспортных средств) забывают, а может, не задаются вопросом о том, почему, заплатив дорожный налог, они должны терять время. Рано или поздно ситуация изменится, и будет невозможно избежать исков и судебных разбирательств, исход которых будет в первую очередь зависеть от аргументации и информационной основы на этапе принятия различных управленческих решений в области развития дорожной сети и организации дорожного движения.

Дорожно-транспортная отрасль в городе остается единственной хозяйственной сферой, в которой управление огромными финансовыми

потоками (чаще всего бюджетных денег) происходит на основе весьма скудного объема информации. Налицо отсутствие единого информационного пространства в работе различных служб и комитетов администраций городов.

Использование на этапе принятия управленческих решений единой и качественной информационной основы, современных методов обработки и анализа информации в сочетании с созданием высокоэффективных механизмов управления в отрасли является основным стратегическим направлением в решении задач по повышению эффективности функционирования транспортной системы крупного города.

### **Недостатки финансирования развития средств организации и управления движением**

Отсутствует единая схема финансирования как мероприятий по развитию сети, ее реконструкции и ремонту, так и организационных мероприятий в области транспортного планирования и дорожного движения. Не решены вопросы взаимодействия и межбюджетных отношений между органами федеральной, региональной и муниципальной власти в сфере финансирования и принятия решений, касающихся развития дорожно-транспортного комплекса.

В бюджетах всех уровней средств на мероприятия по организации дорожного движения не предусматривается, хотя мероприятия, направленные на совершенствование организации дорожного движения, всегда экономически более эффективны по сравнению с новым дорожным строительством.

Не определены механизмы привлечения внебюджетных средств в развитие УДС, мероприятия по организации дорожного движения, совершенствованию технических средств организации дорожного движения и их содержанию.

### **Нерешенность имущественных вопросов и вопросов разграничения прав собственности и управления объектами транспортной инфраструктуры**

Неопределенность имущественных вопросов касается в первую очередь средств организации дорожного движения. В последние годы наблюдается перекрестное финансирование процессов установки, содержания и ремонта технических средств в этой сфере. Финансирование проводится из бюджетов субъектов Федерации и муниципальных образований по различным целевым программам, а чаще по остаточному принципу. В связи с этим возникают объективные трудности не только на этапе контроля расходования этих средств, но и при инвентаризации и учете средств регулирования движения (дорожных зна-

ков и светофоров). Основная часть городских светофоров находится на балансе специализированных предприятий при ГУВД МВД (например, СМЭУ ГУВД), некоторые никому не принадлежат, а дорожные знаки чаще ни на каком балансе не числятся.

Инфраструктурные элементы маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования также не являются самостоятельными объектами управления, а значит, не имеют самостоятельного закрепления за каким-либо функциональным блоком или органом администрации города.

Отсутствие объекта и предмета управления в этой части делает невозможным рациональное использование имеющихся по факту в муниципальном образовании ресурсов в виде пропускных способностей остановочных пунктов, разворотных площадок и площадок отстоя, а также выделенных полос движения маршрутных транспортных средств.

Такая ситуация делает трудновыполнимой задачу обеспечения эффективности и безопасности дорожного движения на городской УДС.

### **Негативное влияние человеческого фактора**

Определение слова «дорога» в Правилах дорожного движения дословно звучит как «участок земли, приспособленной и используемой для движения транспортных средств». Исходя из этого дорогами иногда называют все, что угодно, что в других государствах даже не ассоциируется с дорогой. В развитых странах уже давно решают проблему снижения транспортных издержек, а в России еще не решена проблема транспортной доступности для огромного количества людей.

Дорога в общемировом понимании – совсем не то, что принято называть этим словом в России, это сложное инженерно-техническое сооружение, которое требует ухода и бережного отношения к себе.

Автомобильная общественность не консолидирована и сосредоточена на консервации так называемых обычных прав автовладельцев или псевдоправ, сложившихся в дореформенные времена. Например, «обычное право» стоянки автомобиля на проезжей части по месту назначения поездки (у дома или места работы), приводящее к потере 20% суммарного ресурса улично-дорожной сети, и столь же «обычное право» бесплатного и неупорядоченного пользования другой городской территорией.

Нерешенность многих вопросов, связанных с дорожным движением, и недостаточно грамотная ее организация формируют у участников дорожного движения пренебрежительное отношение как к его правилам, так и в целом к выполнению ими своих обязанностей как участников этого процесса. Гораздо в большей степени выраженное

расслоение общества в среде водителей и владельцев автомобилей не способствует утверждению принципа равенства всех перед законом. Этому способствует бездействие контролирующих органов (ГИБДД, ДПС) в отношении систематических нарушений водителями ПДД (правила остановки и стоянки, предоставления приоритетов пешеходам, правил проезда перекрестков, обязанностей водителей и др.). Основной (если не единственной) функцией подразделений ГИБДД на ближайшее время должен стать контроль неукоснительного соблюдения ПДД всеми участниками дорожного движения.

### 5.2.3. Прогноз ситуации

Реализуемые в последние годы мероприятия по улучшению дорожно-транспортной ситуации ведутся по двум направлениям:

- реконструкция существующих и строительство новых дорог;
- повышение пропускной способности действующей УДС за счет таких мероприятий по организации движения, как изменение схем и режимов светофорного регулирования, организация одностороннего движения, расширение подходов к перекресткам и пр.

Однако прогнозы сохранения высоких темпов автомобилизации и ограниченности бюджетных возможностей говорят о том, что принимаемые меры не могут обеспечить устойчивый и долговременный положительный эффект, поэтому необходимо применение целого комплекса мер, доказавших свою результативность в других странах, переживших аналогичный критический период автомобилизации раньше России. В противном случае дорожно-транспортная ситуация в стране будет ухудшаться с каждым годом, что неминуемо приведет к замедлению темпов социально-экономического развития, потере инвестиционной привлекательности городов и ухудшению условий проживания в них.

Последствия нерешенной проблемы:

- увеличение перегруженности улично-дорожной сети и издержек городского сообщества из-за потерь времени;
- рост количества дорожно-транспортных происшествий и издержек, связанных с гибелью, увечьями людей и материальным ущербом;
- замедление пропуска транзита и снижение возможности многих крупных городов реализовать потенциальные выгоды от транзитного положения;
- рост транспортной составляющей в составе цен на товары и услуги и снижение конкурентоспособности местных производителей на внешних рынках;
- ухудшение качества окружающей среды и здоровья населения;
- снижение качества жизни населения в крупных городах.

### **5.3. Принципы формирования системы государственного и муниципального управления транспортом крупного города**

Предлагается решить поставленную задачу с учетом названных проблем и существующих противоречий, принимая их в качестве постоянно действующих ограничений – точно таких же, как существующие финансовые ограничения бюджетных ассигнований, направляемых на создание условий для удовлетворения транспортных потребностей населения. Тот же подход предлагается распространить и на формирование системы управления транспортной системой города.

Обратим внимание на проблемы функционирования транспортных систем современных городов, лежащие в сфере социально-экономических взаимоотношений субъектов, вовлеченных в систему транспортных взаимоотношений:

- реформируется сознание людей по отношению к новой экономической реальности, не реформируется – к назначению и функционированию дорожно-транспортной сферы и связанных с этим общественных отношений;

- изменяется отношение людей ко всем уровням власти в стране; нет понимания назначения и роли власти (государства и местных органов власти) в решении вопросов удовлетворения транспортных потребностей населения;

- изменяется отношение власти к новым вызовам цивилизации; нет понимания об угрозах в настоящем и будущем, стоящих перед обществом и окружающей средой от бурно развивающейся транспортной отрасли;

- активно трансформируются, постоянно изменяются и совершенствуются системы управления всеми отраслями промышленности; не существует системы управления в транспортной отрасли; не ясны объекты управления и механизмы их управления;

- во многих сферах управления появляются новые амбициозные цели и задачи; в транспортной отрасли не ясны цели этого управления и способы достижения этих целей.

Вследствие нерешенности перечисленных проблем наблюдается:

- снижение эффективности функционирования действующих транспортных систем городов;

- замедление социально-экономического развития городов;

- отсутствие инструментов планирования и развития территории и бизнеса, хаотичное развитие городов и регионов.

Происходит снижение эффективности функционирования действующей транспортной системы города, обусловленное возрастанием транспортных издержек, с одной стороны, с одновременным значительным увеличением ресурсного потребления – с другой.

Это приводит к возникновению социального и природного дисбаланса функционирования транспортной системы на урбанизированных территориях, который, в свою очередь, служит естественным ограничителем развития всех несбалансированных систем.

Именно взаимоотношения различных субъектов, вовлеченных в транспортные процессы, являются определяющими в вопросах эффективного и устойчивого развития транспортных систем городов. Ключевая задача современного этапа в формировании эффективной транспортной системы любого города – формирование эффективной системы управления городским транспортом. Прежде всего это относится к разграничению полномочий в сфере управления развитием транспортных систем городов между ГИБДД, правительствами регионов и администрациями городов. Подробнее остановимся на вопросах формирования эффективных систем управления в муниципалитетах крупных городов.

Цель любого управления – ликвидация разницы между желаемым и достигнутым результатом. Она может быть достигнута при помощи современных инструментов планирования и оценки последствий принимаемых решений. Это относится ко всем сферам управления, но более всего – к управлению городским хозяйством, в том числе дорожно-транспортным комплексом.

Анализ существующих систем управления в муниципалитетах крупных городов позволяет сделать некоторые выводы, которые, на наш взгляд, иллюстрируют причины неэффективности не только системы муниципального управления, но и функционирования элементов городской инфраструктуры, в частности действующих транспортных систем.

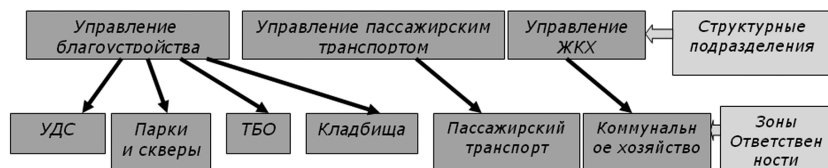
Основной вывод относится к принципам формирования органов управления администрациями крупных городов, хотя подавляющее большинство исполнительных органов муниципальной власти (администрации городов) сформированы по технологическому признаку. Это означает, что закрепление муниципальных функций управления городским хозяйством происходит на технологическом уровне. Каждый функциональный блок призван не добиваться улучшения каких-либо качественных показателей функционирования систем городского хозяйства, а хорошо выполнять некую определенную технологию работ. Это сразу становится заметно по профессиональному составу кадровой обеспеченности каждого функционального блока, формируемого по некой технологической общности.

Технологическая общность распространяется на следующие показатели:

- квалификация специалистов (чиновников функционального блока);

- квалификация подрядчиков (выполняющих заказы данного функционального блока);
- материалы и технологии работ.

Эта же особенность деления распространяется и на внутреннее деление зон ответственности отдельных структурных подразделений (управлений и отделов) внутри каждого функционального блока. В качестве примера уместно привести существовавшую до недавнего времени структуру одного из функциональных блоков администрации Перми. Схема зон ответственности некоторых структурных подразделений функционального блока «городское хозяйство» в городе Перми представлена на рис. 5.1.



**Рис. 5.1.** Схема зон ответственности некоторых структурных подразделений функционального блока «городское хозяйство» в городе Перми

Рассмотрим деятельность управления благоустройства, зона ответственности которого – все, что касается чистоты и создания здоровых, удобных и культурных условий жизни населения на территории общего пользования. Уборка улиц, вывоз бытовых отходов, ремонт тротуаров и проезжей части дорог, создание городских парков и скверов и уход за ними, капитальный ремонт и реконструкция элементов улично-дорожной сети, поддержание в порядке городских кладбищ и т.п.

В составе подразделения специалисты – инженеры в области дорожного хозяйства, дорожной, строительной и уборочной техники. Это типичный пример структурного подразделения, сформированного по технологическому признаку.

Структурные подразделения гораздо четче поделены в своих зонах ответственности технологически, чем функционально. Все, что связано с земельными работами, технологиями их проведения, а также специфическими материалами (грунты, асфальты), отнесено к ведению управления благоустройства.

Такой подход к разделению полномочий и зон ответственности имеет свои преимущества, самое основное из которых – возможность проведения качественного контроля над подрядчиками на всех этапах работ – от проектирования до последующего содержания объектов городского хозяйства, находящихся в зоне ответственности управления.

Этот подход оправдан, в первую очередь, потому, что в данном случае и заказчики (муниципальные чиновники), и исполнители (руководители подрядных организаций) являются коллегами и хорошо ориентируются в предметной области (технологиях, материалах, стоимости и сроках проведения работ).

Рассмотренный подход в организационной структуре деятельности администрации города оправдывает себя при решении задач содержания и текущего ремонта любых муниципальных объектов, например УДС города.

Однако при рассмотрении системных вопросов, например развития того или иного инфраструктурного блока, или принятия решений по реконструкции или техническому перевооружению одной или нескольких систем городского хозяйства возникают серьезные проблемы. Главная из них заключается в том, что технологические навыки и знания работников одного структурного подразделения не предполагают наличия знаний в области назначения и законов функционирования той или иной системы городского хозяйства, работоспособность которой они поддерживают.

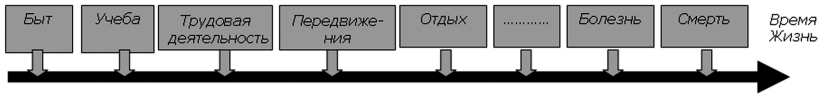
Например, специалист с высшим дорожным образованием (руководитель управления благоустройства), как правило, весьма отдаленно представляет себе назначение транспортной системы города, принципы ее функционирования. Это же можно сказать о парках и скверах, которые являются зонами его ответственности. Поэтому ему очень тяжело принимать управленческие решения в области развития той или иной системы, объектов городского хозяйства и муниципальной собственности. Отсутствие критериев оценки правильности управленческих решений не позволяет в такой структурной иерархии принимать какие-либо долгосрочные перспективные решения в развитии управляемых систем.

Следует пересмотреть существующие во многих городах принципы формирования органов власти и их подразделений, ответственных за развитие городского хозяйства, основанные на технологических особенностях управления и содержания объектов управления. Вместо модели организационной системы, созданной по технологическому принципу, предлагается управленческая модель, основанная на *фазовом принципе*.

Основная идея предлагаемого управленческого подхода заключается в следующем: новая управленческая концепция должна привести к тому, что каждый житель города в каждый момент времени (фазу, период) жизни будет находиться в зоне ответственности определенного структурного подразделения органа управления (страны, региона, органа местного самоуправления).

На рис. 5.2 схематично изображены типичные фазы (периодические и непериодические) жизни горожанина. Система городского му-

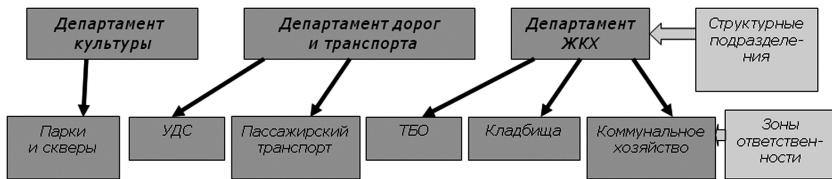




**Рис. 5.2.** Схема смены фаз жизни горожанина (суточный, годовой, ..., и т.д. ритмы жизни горожанина)

ниципального управления должна строиться таким образом, чтобы внутренне повторять жизнь человека в каждой ее фазе. Такой подход существенно меняет структуру зон ответственности функциональных подразделений и блоков администрации муниципального образования.

На рис. 5.3 приведена измененная схема зон ответственности по сравнению со схемой на рис. 5.2. Пример распределения зон ответственности касается зон, непосредственно затрагивающих сферу функционирования городской транспортной системы.



**Рис. 5.3.** Схема зон ответственности некоторых структурных подразделений нескольких функциональных блоков в новой концепции управления

Очевидно, что в предлагаемой системе значительная часть направлений зоны ответственности управления благоустройства должна быть распределена между функциональными подразделениями:

- Департамент ЖКХ – твердые бытовые отходы, кладбища;
- Департамент дорог и транспорта – проезжие части улиц и тротуары;
- Департамент по культуре – парки, скверы и т. п.

Общая структура системы управления в предложенной концепции может быть представлена укрупненной схемой распределения полномочий на уровне полномочий заместителей главы администрации муниципального образования.

Примерная схема приведена на рис. 5.4.

Вторым важным моментом предлагаемой концепции управления является подход к распределению полномочий внутри каждого функционального блока. Предлагается распространить принятый на федеральном уровне принцип разделения функциональных и операционных подразделений органов управления. Примером такого распределения может служить принятое на уровне Правительства

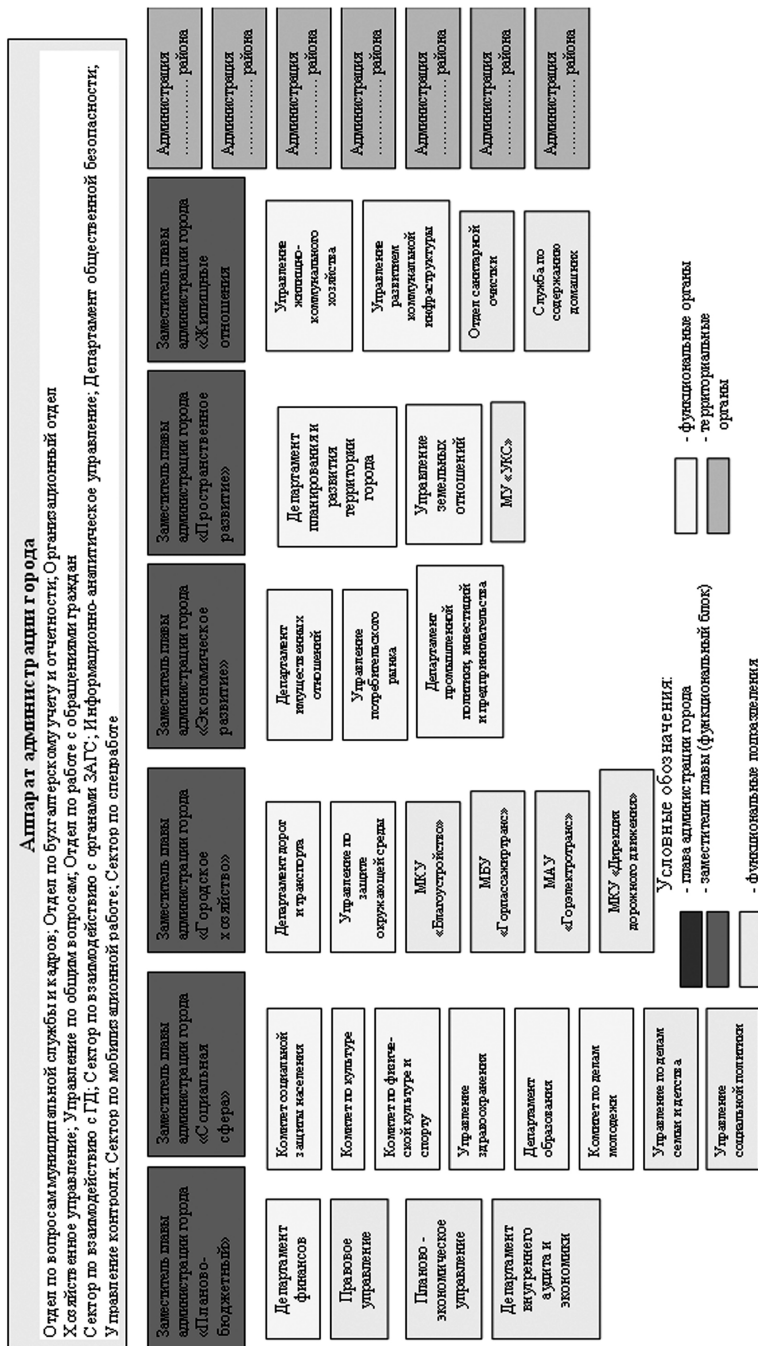


Рис. 5.4. Общая структура системы управления администрации крупного города

Российской Федерации распределение функций министерств и федеральных агентств.

Целесообразно при формировании функциональной иерархии администрации города (а также администрации или правительств региона) и определении зон ответственности каждого функционального блока и структурного подразделения исходить из того, что конечная структура должна состоять из набора функциональных и операционных подразделений и служб.

Принципы внутреннего распределения функционала между указанными подразделениями можно проиллюстрировать в следующих основополагающих определениях:

*определение 1:*

- функциональные подразделения сформированы по фазовому принципу жизни жителя города;
- операционные службы сформированы по технологическому признаку;

*определение 2:*

- функциональные подразделения несут ответственность перед населением;
- операционные службы несут ответственность перед функциональными подразделениями;

*определение 3:*

- функциональные подразделения работают с обращениями граждан;
- операционные службы не работают с письмами граждан и не отвечают за уставную эффективность работы функциональных подразделений;

*определение 4:*

- функциональные подразделения являются распорядителями бюджетных средств, выделенных им соответствующими представительными органами власти;
- операционные службы являются распорядителями бюджетных средств, выделенных им функциональными подразделениями;

*определение 5:*

- функциональные подразделения укомплектованы чиновниками-управленцами;
- операционные службы укомплектованы специалистами-инженерами.

#### **5.4. Концепция управления транспортной системой крупного города**

Существующая система основополагающих документов развития территорий может быть представлена как последовательность в виде:

концепции, стратегии, плана, программы, схемы. Каждый из документов этой последовательности решает определенную задачу, развивая ее и основываясь при этом на положениях вышестоящего документа.

Такая последовательность хорошо применима к одному объекту исследования либо управления. Но можно рассматривать один и тот же объект с разных сторон его функционирования либо внутреннего устройства.

Остановимся на одном объекте исследования – транспортной системе крупного города. В качестве предмета исследования выберем управление ею. В такой постановке система руководящих документов в отношении выбранного предмета исследования будет выглядеть как:

- Концепция управления транспортной системой;
- Стратегия управления транспортной системой;
- План управления транспортной системой;
- Программа управления транспортной системой;
- Схема управления транспортной системой.

В настоящий момент возникает необходимость в разработке документов не столько в развитие уже принятых документов генерального планирования, сколько в качестве некоего руководства в целях принятия среднесрочных и оперативных решений, направленных на улучшение транспортной ситуации в городе.

Требуется разработка максимально функциональных документов как основы принятия управленческих решений в области транспортного планирования, а также методического документа для органов исполнительной власти, администрации города и главы администрации.

Концепция должна учитывать опыт крупных мегаполисов мира, крупных и крупнейших городов Российской Федерации, отражающий целевые установки органов исполнительной и законодательной власти в сфере транспортной политики, направленной на повышение качества жизни населения, развитие экономики, обеспечение безопасности дорожного движения и оздоровление окружающей среды.

Результатом реализации положений концепции, по нашему мнению, должны стать:

- стратегии развития отдельных составляющих дорожно-транспортного комплекса (например, городского пассажирского транспорта);
- планы и программы их развития (примерный план реализации генплана в части развития улично-дорожной сети);
- проекты их развития (примерные проекты планировки участков улично-дорожной сети);
- схемы их развития (примерная схема размещения автомобильных парковок).

*Концепция* (от лат. conceptio – понимание, система) – определенный способ понимания, трактовки какого-либо предмета, явления, процесса, основная точка зрения на предмет, руководящая идея в отношении четырех объектов приложения концепции:

- транспортное планирование;
- организация дорожного движения;
- совершенствование функционирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования;
- формирование парковочной политики.

Предлагаемая концепция управления транспортной системы вобрала в себя все высказанные в прошлом и закрепленные в виде различных решений, постановлений и распоряжений органов власти различных уровней города Перми и Пермского края идеи и предложения по различным вопросам в области транспортного планирования и организации дорожного движения, формирования системного подхода к управлению этими процессами.

Концепция предусматривает создание двухуровневой системы информационного обеспечения развития дорожно-транспортного комплекса города, цель которого – обеспечение органов местного самоуправления города Перми полной, достоверной и актуальной статистической и аналитической информацией о состоянии и перспективах развития дорожно-транспортного комплекса.

Системы анализа качества принятия решений основываются на моделировании и прогнозировании движения, которые необходимы для поиска эффективных стратегий управления транспортными потоками и оптимальных решений по развитию УДС, проектированию элементов сети, организации движения.

Подготовка и принятие любых управленческих решений в области транспортного планирования и организации дорожного движения должны в обязательном порядке включать в себя в качестве обосновывающих материалов элементы моделирования дорожного движения.

Главное внимание в концепции уделено двум основным блокам вопросов:

- 1) совершенствование системы управления развитием дорожно-транспортного комплекса города;
- 2) совершенствование системы управления развитием системы городского пассажирского транспорта общего пользования.

Разделение на два блока целесообразно в плане привязки системы управления транспортной системой города к положениям основополагающего Федерального закона № 131-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации».

В частности, они повторяют идеи разграничения вопросов, относящихся к ведению органов местного самоуправления городов, и отражены в ст. 16 этого закона:

«Статья 16. Вопросы местного значения городского округа:

...5) дорожная деятельность в отношении автомобильных дорог местного значения в границах городского округа, включая создание и обеспечение функционирования парковок (парковочных мест), а также осуществление иных полномочий в области использования автомобильных дорог и осуществления дорожной деятельности в соответствии с законодательством Российской Федерации;

...7) создание условий для предоставления транспортных услуг населению и организация транспортного обслуживания населения в границах городского округа» [161].

Все воздействия, направленные на повышение качества функционирования транспортной системы города, можно разложить на три уровня:

- управленческий;
- нормативно-законодательный;
- организационно-технический.

Управление осуществляется через четыре группы инструментов управления:

- транспортное планирование;
- организация дорожного движения;
- совершенствование функционирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования;
- формирование парковочной политики.

Для развития процесса совершенствования системы управления транспортной системой города требуется симметричное совершенствование законодательных основ управления. Концепция предусматривает разработку и принятие целого ряда законодательных и нормативных документов:

- в сфере разработки градостроительной документации и нормативов градостроительного регулирования;
- в области организации дорожного движения;
- в области совершенствования функционирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования;
- в области формирования парковочной политики.

#### **5.4.1. Приоритеты управления транспортной системой крупного города**

Концепция управления транспортной системой крупного города строится на основных базовых положениях, определяющих несколько приоритетов.

### **Приоритет интересов сообщества людей перед частными интересами**

Возможность реализации объективно обусловленных потребностей в перемещении грузов и населения по территории города – общественное благо, которое распределяется органами власти в соответствии с принципом «каждому по потребности». Никакая отдельная группа людей (их объединения и организации) ни при каких обстоятельствах не вправе претендовать на исключительную долю при распределении этого блага в ущерб интересам всего сообщества.

### **Приоритет пешеходного движения перед транспортным**

Транспортное движение не является объективно необходимым для сообщества, оно изначально альтернативно и определяется исключительно задачами повышения производительности перемещения грузов и населения по территории города. Пешеходное движение, в свою очередь, определяется не только необходимостью в перемещении, но и более всего – потребностью каждого отдельного человека в двигательной активности, не связанной с перемещениями.

### **Приоритет общественного транспорта перед индивидуальным**

Общественный транспорт, и в первую очередь пассажирский, должен также рассматриваться как общественное благо, распределение которого, в идеале, – задача органов власти. Несмотря на то что он в общем случае может не принадлежать сообществу и при этом потреблять общественный ресурс – провозную способность улично-дорожной сети, этот вид транспорта является средством наиболее справедливого и рационального потребления и распределения ресурса.

### **Приоритет вопросов управления перед вопросами реализации**

Нельзя выстроить механизм, идеально реализующий самые перспективные идеи и планы, но не имеющей системы управления. Нельзя алгоритмизировать, интенсифицировать и автоматизировать процессы управления либо принятия решений, не имея изначально его «ручного аналога». Нельзя оценить качество принятия управленческого решения, и нельзя контролировать процессы реализации этих решений, не имея системы управления.

### **Приоритет интенсивных решений перед экстенсивными**

Экстенсивные решения в развитии УДС, сопровождаясь значительными финансовыми затратами на их реализацию, не только стимулируют использование личного транспорта, усугубляя проблему, но и ведут к росту в будущем безальтернативных затрат на содержание

растущей сети. Интенсивные решения обратимы, а следовательно, безопасны и наименее затратны.

### **Приоритет качества информации перед технологиями**

Все решения в области транспортного планирования и организации дорожного движения должны быть основаны на анализе качественной информации с применением совершенных алгоритмов, технологий и инструментов ее обработки.

При этом только объем и качество исходной информации при современном уровне развития технологий будут в итоге определять качество выработанных управленческих решений.

#### **5.4.2. Принципы управления транспортной системой крупного города**

*Предмет управления* – жизненная фаза. Все формы жизнедеятельности городского жителя можно разделить на отдельные фазы. Предметом управления, определяемым настоящей концепцией, будет фаза жизни человека, характеризующая процессы осуществления перемещений городского жителя по территории города.

*Объект управления* – транспортная система города, в частности дорожно-транспортный комплекс: улично-дорожная сеть, инфраструктура городского пассажирского транспорта общего пользования и его подвижной состав.

*Способ управления* – жизненный цикл функционирования каждого управляемого объекта. Этот способ предполагает переход от оплаты конкретных работ и услуг к оплате гарантий того, что каждый управляемый объект будет соответствовать некоему набору технико-эксплуатационных параметров в течение определенного периода времени – жизненного цикла. Жизненный цикл при этом целесообразно устанавливать в соответствии с бюджетным периодом.

В качестве иллюстрации этого способа управления можно привести технологию оплаты услуг по нанесению разметки на УДС города. Оплата производится не из расчета объемов нанесения разметки, а из расчета показателей качества состояния разметки в течение жизненного цикла разметки (календарный год). В этот период подрядная организация в соответствии с муниципальным контрактом обязуется поддерживать в оговоренных в контракте пределах состояние разметки на вверенной территории. При этом контрактом не регламентируется количество циклов и способ нанесения разметки, а также не производится контроль качества нанесения разметки, контролируется только текущее ее состояние.

*Цель управления транспортной системой города* – создание условий для удовлетворения объективно обусловленных транспортных



потребностей населения при эффективном использовании имеющихся в распоряжении сообщества ресурсов.

Вся оценка качества вырабатываемых и принимаемых управленческих решений будет рассматриваться в *двухкоординатной системе показателей*. Они могут быть целевыми и расчетными.

*Целевые показатели* определяются как цели, обязательства, которые принимают на себя органы местного самоуправления города, и могут быть приняты к соответствующему временному рубежу или на перспективу. Они могут и не приниматься в виде конкретного числового показателя, а представляться в каждый момент времени в виде некой целевой функции, увеличение (уменьшение) которой целесообразно в любых условиях и в любой момент времени.

*Расчетные показатели*, достижение которых обеспечивает достижение целевого показателя и является необходимым для этого условием. На языке математики расчетный показатель – это один из аргументов целевой функции (целевого показателя).

Важное и необходимое свойство расчетных показателей – измеримость. Расчетный показатель может быть измерен (получен, рассчитан) на основе натуральных наблюдений за функционированием объекта исследования (транспортной системы).

Целевой показатель – это сокращение времени транспортных корреспонденций всех жителей города.

Расчетные показатели:

- средняя скорость движения по городу;
- пассажиропоток на всех видах общественного транспорта;
- средняя эксплуатационная скорость движения общественного транспорта;
- доля пассажиропотока на муниципальном общественном транспорте.

#### **5.4.3. Управление развитием дорожно-транспортного комплекса города**

Основными задачами совершенствования системы управления развития дорожно-транспортного комплекса города являются:

1) приведение системы управления в соответствие с нормами федерального законодательства, в частности ст. 21 Федерального закона «О безопасности дорожного движения»;

2) разделение зон ответственности за текущее состояние и условия движения по УДС и за разработку и реализацию планов перспективного развития УДС между подразделениями администрации города Перми [4].

### Формирование муниципальных органов власти

Для реализации положений ст. 21 Федерального закона «О безопасности дорожного движения», определившей, что организация дорожного движения есть функция органа местного самоуправления (в ведении которого находятся автомобильные дороги), предлагается в качестве одного из субъектов управления транспортной системой создание специализированного структурного подразделения администрации города – органа, уполномоченного в области содержания и строительства автомобильных дорог, организации транспортного обслуживания населения [162].

В итоге *субъектами управления транспортной системой* города должны стать два специализированных структурных подразделения городской администрации:

– орган администрации города, уполномоченный в области градостроительной деятельности (для Перми – департамент планирования и развития территории);

– орган администрации города, уполномоченный в области содержания и строительства автомобильных дорог, организации транспортного обслуживания населения (для Перми – департамент дорог и транспорта администрации).

Деятельность указанных органов является необходимой и достаточной в области управления транспортной системой.

Основными зонами ответственности органа администрации города, уполномоченного в области градостроительной деятельности (для Перми – департамент планирования и развития территории), предусматривается:

- разработка общей документации по планировке территорий в части развития УДС – генеральный план развития города, правила землепользования и застройки территории, проекты планировок УДС (с проектами межевания и установкой красных линий);

- разработка программ реализации генерального плана в части развития УДС города на перспективу генерального плана;

- разработка комплексной транспортной схемы (КТС);

- осуществление мониторинга реализации генерального плана в части развития УДС города.

Основными зонами ответственности органа администрации города, уполномоченного в области содержания и строительства автомобильных дорог, организации транспортного обслуживания населения (для Перми – департамент транспорта и дорог администрации города Перми), предусматривается:

- обеспечение информационной основы для принятия решений в области транспортного планирования;

- разработка этапов реализации генерального плана в части развития транспортной инфраструктуры города на срок принятия бюджета;
- разработка документации по планировке территории под объектами транспортной инфраструктуры города;
- разработка документации на строительство, реконструкцию, ремонт и содержание объектов транспортной инфраструктуры;
- разработка комплексных схем организации дорожного движения (КСОДД) и проектов организации движения (ПОД);
- выполнение функций заказчика на строительство, содержание и реконструкцию элементов УДС;
- обеспечение информационной основы для принятия решений в области организации дорожного движения;
- организация дорожного движения на УДС города;
- формирование парковочной политики;
- создание условий для предоставления транспортных услуг населению;
- разработка схем маршрутной сети общественного транспорта;
- разработка целевых программ в отношении объектов приложения концепции.

В составе органа администрации города, уполномоченного в области содержания и строительства автомобильных дорог, организации транспортного обслуживания населения, создаются специализированные подразделения:

- управление программно-целевым планированием, в составе которого:
  - отдел долгосрочных программ;
  - Муниципальное казенное учреждение (МКУ) «Дирекция дорожного движения»;
- управление пассажирского транспорта, в составе которого:
  - центральная диспетчерская служба;
  - отдел экономического анализа и контроля;
  - юридический отдел.

Кроме того, предусматривается создание управления автомобильных дорог, выполняющего функции балансодержателя объектов транспортной инфраструктуры и заказчика проектной документации на строительство, объектов транспортной инфраструктуры.

Орган администрации города, уполномоченный в области содержания и строительства автомобильных дорог, организации транспортного обслуживания населения, является учредителем муниципальных предприятий:

- МКУ «Дирекция дорожного движения»;
- МКУ «Благоустройство»;
- МКУ «Городская служба перемещения транспортных средств»;

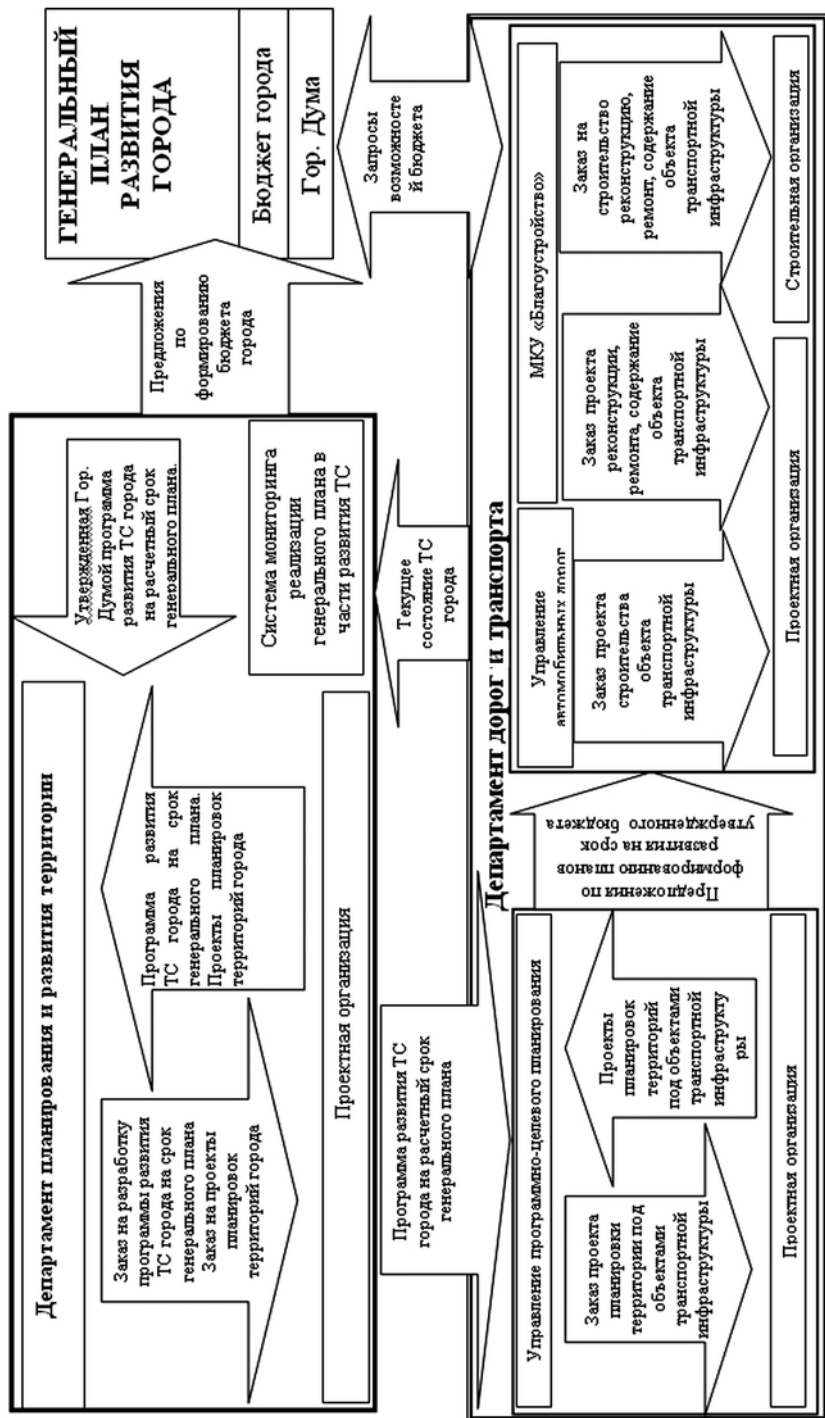


Рис. 5.5. Схема принятия решений по развитию транспортной инфраструктуры города

МБУ «Горпассажиртранс»;

МАУ «Горэлектротранс».

Примерная схема принятия решений по развитию транспортной инфраструктуры города и взаимодействию между структурными подразделениями администрации города приведена на рис. 5.5.

Департамент дорог и транспорта (ДДТ) – обеспечивает объективно обусловленные и конституционно закрепленные потребности жителей города в передвижении по городу, отвечает за эффективность расходования движимого и недвижимого имущества и бюджета города на обеспечение реализации этой потребности.

МКУ «Благоустройство» – служба заказчика, сформированная по технологическому принципу, выполняющая операционную работу по организации расходования средств бюджета на цели ДДТ, а также уставные цели других структурных подразделений администрации города (выполняет функции, аналогичные муниципальному управлению строительством при управлении развития коммунальной инфраструктуры).

Управление благоустройства – служба переходного периода (временная), выполняющая функции заказчика по строительству, ремонту и содержанию объектов множественного назначения либо объектов имущества города, чье функциональное назначение не определено либо узкоспециально и не подпадает под уставные цели существующих функциональных подразделений администрации города.

Департамент планирования и развития территории (в части дорожно-транспортного комплекса города) занимается градостроительной деятельностью, работает с функционалом территории города. Заказывает комплекс градостроительной документации на всю территорию города от мастер-плана до проектов планировок участков территории города под элементы улично-дорожной сети.

### **Формирование коллегиальных органов управления**

Недостатками существующих систем управления дорожно-транспортным комплексом в городах является отсутствие коллегиальных органов управления и действенных механизмов участия общественных организаций, их объединений и граждан в вопросах управления и контроля качества управленческих решений.

В качестве коллегиального органа для решения вопросов разработки и реализации муниципальных целевых программ в отношении объектов приложения концепции, выработки научно-технической политики и совершенствования нормативной базы в области развития транспортной инфраструктуры города предусматривается создание *Технического совета по координации развития транспортной инфраструктуры города.*

Технический совет действует по образу имеющихся на сегодняшний день градостроительных советов при главах крупных городов, его деятельность координируется органом администрации города, уполномоченным в области градостроительной деятельности.

Для решения вопросов по любым видам ограничений движения транспорта как в целом, так и по отдельным группам и видам транспорта в целях обеспечения безопасности дорожного движения, пропускной или провозной способности участков УДС в соответствии со ст. 14 Федерального закона «О безопасности дорожного движения» предусматривается создание Комиссии по оперативному рассмотрению вопросов, связанных с обеспечением режимов движения транспортных средств в городе. За ней будут закреплены также полномочия и функции существующей комиссии по безопасности и организации дорожного движения, деятельность которой прекращается [162].

Деятельность Комиссии координируется органом администрации города, уполномоченным в области содержания и строительства автомобильных дорог, организации транспортного обслуживания населения.

### **Участие общественных организаций и их объединений**

Следует принять во внимание рекомендации, изложенные:

– в п. 2 ст. 8 Федерального закона «О безопасности дорожного движения» [154]: «Привлекать с их согласия общественные объединения к проведению мероприятий по обеспечению безопасности дорожного движения, участие граждан и их объединений в осуществлении градостроительной деятельности, обеспечение свободы такого участия»;

– в п. 5 ст. 2 Градостроительного кодекса РФ [2]: «...участие граждан и их объединений в осуществлении градостроительной деятельности, обеспечение свободы такого участия».

Наряду с формированием специализированных муниципальных и коллегиальных органов управления развитием дорожно-транспортного комплекса необходимо создавать условия для участия граждан, общественных организаций и их объединений для решения вопросов управления транспортной системой города.

Принципиальные решения по развитию и организации управления в транспортной системе города принимаются на основе предметной гражданской дискуссии с участием различных слоев населения (сегментированного по признакам транспортного поведения), властей и, разумеется, экспертного сообщества.

Участие в принятии подобных решений граждан, жителей города – участников дорожного движения возможно при обсуждении и оценке принимаемых органами местного самоуправления управленческих решений в области:

- градостроительной деятельности, направленной на развитие УДС;
- мероприятий по обеспечению безопасности дорожного движения;
- мероприятий по организации дорожного движения;
- мероприятий по содержанию объектов транспортной инфраструктуры и оценке качества их строительства, контроля потребительских свойств автомобильных дорог и улиц.

Участие граждан, общественных организаций и их объединений необходимо для консолидации и координации усилий органов власти, общественности и граждан в выработке и принятии управленческих решений, направленных на совершенствование и развитие транспортной системы города. Оно возможно на любых этапах подготовки решений в форме общественных слушаний, общественных инициатив, обсуждений, заключений.

Можно по-разному относиться к различным предложениям граждан, оценивать их качество должны специалисты, но на самом первом этапе необходимо просто дать им возможность быть услышанными. Само по себе это мероприятие будет способствовать снятию раздражения у участников дорожного движения и консолидировать действия, потребности и усилия участников дорожного движения, с одной стороны, и задачи различных служб – с другой.

#### **5.4.4. Управление развитием системы городского пассажирского транспорта общего пользования**

##### **Двойственность услуги по транспортному обслуживанию населения городским пассажирским транспортом общего пользования**

Пункт 7 ст. 16 Федерального закона «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» закрепляет за органами муниципального управления городов *«создание условий для предоставления транспортных услуг населению и организации транспортного обслуживания населения в границах городского округа»* [161].

Для дальнейшего выстраивания методики формирования эффективной структуры управления транспортной системой крупного города потребуются дополнительная формализация понятия «услуга», закрепленного в указанном законе.

Транспортное обслуживание населения городским пассажирским транспортом общего пользования предполагает оказание двух видов услуг:

- 1) услуга по перевозке пассажира;

2) услуга по предоставлению гарантии того, что первая услуга будет предоставлена.

Иными словами, кроме получения услуги, выраженной в транспортной работе непосредственно поставщика транспортной услуги (владельца транспортного средства, на котором осуществляется перевозка), потребителям услуги важно иметь гарантии того, что такая услуга будет оказана и транспортное средство придет на остановку.

Подробнее определим понятия поставщиков, потребителей и некоторые иные особенности рассматриваемой услуги.

*Потребителями услуги* являются все жители города (территории), где организуется транспортное обслуживание. Именно все жители, а не только пассажиры городского пассажирского транспорта общего пользования.

*Поставщики услуги:* первую услугу предоставляет перевозчик, вторую – организатор перевозок (согласно Федеральному закону № 131-ФЗ, это муниципалитет) [161].

*Оплата услуги:* за оказанную первую услугу платит пассажир, за вторую – все жители, осуществляющие налоговые платежи в бюджет. Кто потребляет, тот и платит.

*Ответственность за оказание услуги:* за предоставление первой услуги отвечает перевозчик, второй – муниципалитет (орган администрации муниципального образования, уполномоченный в области содержания и строительства автомобильных дорог, организации транспортного обслуживания населения).

Анализируя развитие рынка пассажирских перевозок и организацию этого процесса в крупных российских городах, можно убедиться в том, что проблем с предоставлением первой услуги не существует. Есть спрос, соответственно, появляется и предложение – все функционирует по понятным и надежным законам рынка, а вот с предоставлением второй услуги (гарантий) наметились явные проблемы, и прежде всего экономического характера.

Перевозчик не только не хочет, но и не может предоставить всем жителям гарантии – у него нет на это средств. Чтобы такие гарантии предоставить всем жителям города, нужно иметь бюджет, сопоставимый с бюджетом города. У перевозчика таких возможностей нет, как и у муниципалитетов. Нет муниципальных автотранспортных предприятий, а держать в резерве сотню-другую автобусов для затыкания дыр в соблюдении графиков нерадивыми перевозчиками – накладно для бюджета.

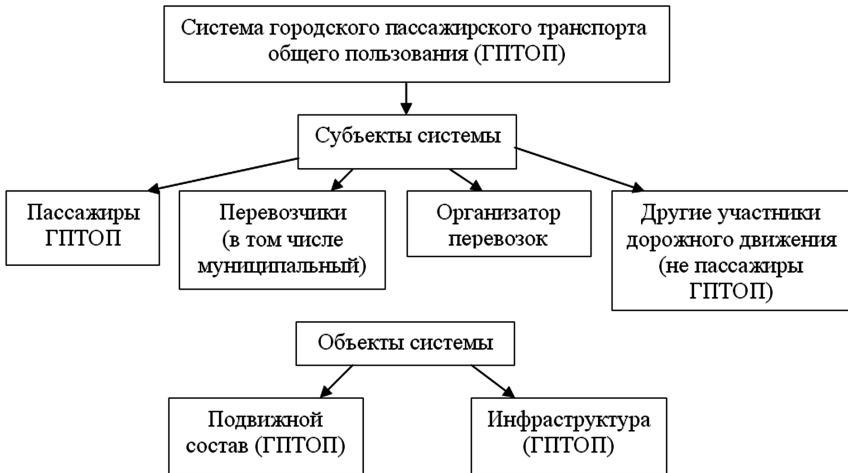
Задача построения современной системы транспортного обслуживания населения как раз и заключается в стимулировании перевозчиков брать на себя предоставление не только первой, но и второй услуги. И за предоставление второй сообщество готово платить бюджетные деньги. Подобный пакет, состоящий из двух услуг одновременно, в



перспективе может предоставлять некая управляющая компания, причем крупная, которая возьмет на себя все взаимоотношения с перевозчиками и одновременно предоставит все гарантии, в том числе финансовые, для всех жителей города.

### Виды взаимодействий в системе городского пассажирского транспорта общего пользования

В систему городского пассажирского транспорта общего пользования вовлечены следующие объекты и субъекты (рис. 5.6).



**Рис. 5.6.** Объекты и субъекты системы городского пассажирского транспорта общего пользования

Для выстраивания методики формирования эффективной системы управления транспортной системой крупного города предлагается в обязательном порядке принимать во внимание в качестве равноправных субъектов управляемой системы других участников дорожного движения. Это участники, не являющиеся в определенный момент времени пассажирами ГПТОП (водители индивидуального транспорта и его пассажиры, пешеходы). Однако они потенциально являются пассажирами ГПТОП и потребляют услугу второго вида, имея гарантии того, что в городе работает система ГПТОП.

Субъекты и объекты системы городского пассажирского транспорта общего пользования вовлечены в комплекс взаимоотношений, который в итоге формирует качество функционирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования. Все виды возможных взаимоотношений в рассматриваемой системе представлены на рис. 5.6.

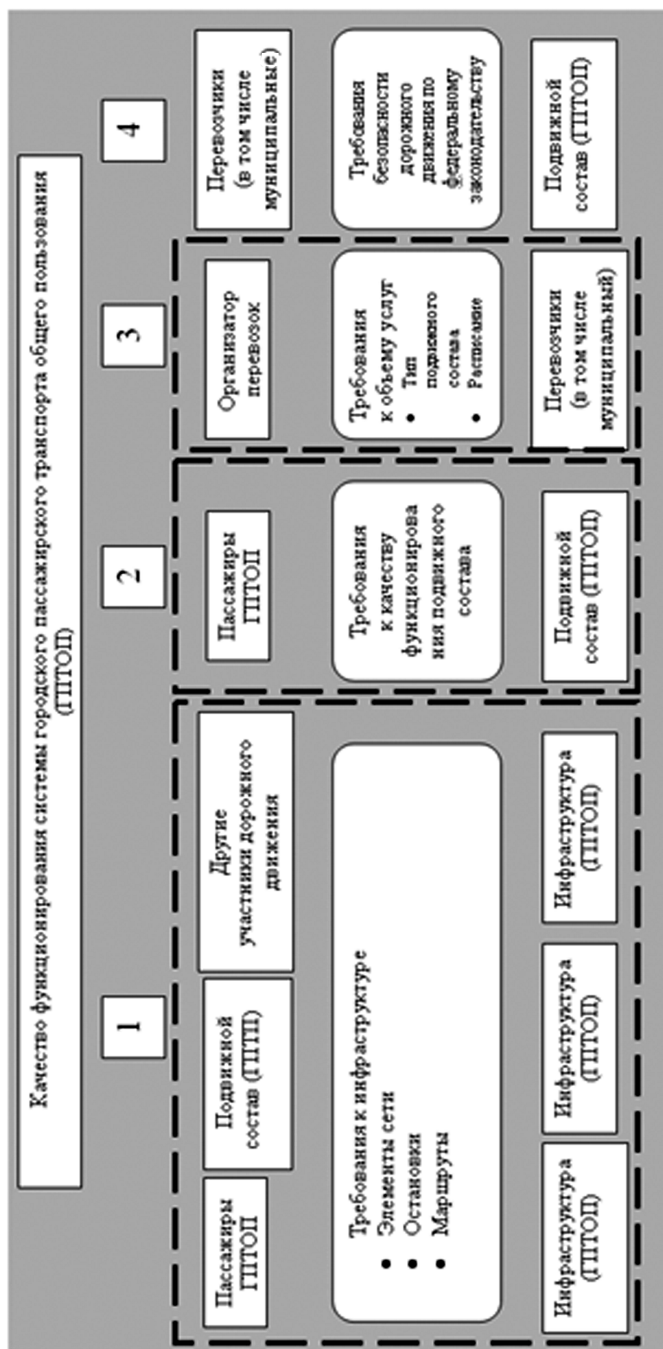


Рис. 5.7. Виды возможных взаимоотношений в системе городского пассажирского транспорта общего пользования

На рис. 5.7 представлены всевозможные вертикальные взаимодействия между субъектами и объектами системы, определяемые требованиями к их качеству. Все взаимодействия можно объединить в четыре группы, каждая из них представляет собой объект наложения требований:

- к инфраструктуре ГПТОП;
- к подвижному составу ГПТОП;
- к объему услуг;
- к обеспечению безопасности услуг.

На рисунке пунктирными линиями выделены те области взаимодействий, которые по смыслу входят в зону ответственности органов муниципальной власти городов согласно Федеральному закону № 131-ФЗ [161]. Представляется важным четко ограничивать полномочия органов муниципальной власти в процессе установления и администрирования различных ограничительных функций при каждом взаимодействии в системе.

Например, область взаимодействий № 4 не является полномочием органов муниципальной власти. Область взаимодействий № 2 только частично можно назвать сферой регулирования муниципалитетов и только в части комфорта пассажиров ГПТОП при осуществлении перевозок (например, наполняемость подвижного состава). Остальные параметры регулирования качества подвижного состава также относятся к сфере федерального нормирования, так как затрагивают сферу безопасности пассажирских перевозок.

### **Принципы управления системой городского пассажирского транспорта общего пользования**

В области принципиальных основ управления работой системы городского пассажирского транспорта общего пользования можно выделить несколько основных положений, реализация которых соответствует предложенным ранее приоритетам развития всей транспортной системы крупного города.

**Увеличение доли городского пассажирского транспорта общего пользования (большой вместимости) в транспортной системе.** Увеличение доли городского пассажирского транспорта общего пользования большой вместимости уменьшает потребности в территориях, снижает стоимость перевозок в сравнении с индивидуальным транспортом и повышает эффективность использования транспортной инфраструктуры в сравнении с использованием подвижного состава малой и особо малой вместимости.

**Дифференциация услуг на рынке перевозок городским пассажирским транспортом общего пользования.** Личные предпочтения потенциальных пассажиров существенно разнятся, поэтому услуга по

их перевозке городским пассажирским транспортом общего пользования должна быть дифференцированной как по объему, качеству, так и по цене.

**Обеспечение конкурентной среды на рынке предоставления услуг городского пассажирского транспорта общего пользования.** Конкуренция – это залог качества предоставления услуги, прежде всего, конкуренция поставщиков услуги в борьбе за своего потребителя – пассажира. В процессе организации и управления предоставлением услуг по транспортному обслуживанию населения городским пассажирским транспортом общего пользования конкурентные механизмы применяются на этапе проведения конкурсных процедур при входе перевозчика в систему перевозок ГПТОП.

**Введение дифференцированной оплаты за услуги перевозки городским пассажирским транспортом общего пользования.** Услуга должна стоить столько, сколько стоит. Предлагается поэтапный переход на дифференцированный тариф на предоставляемые услуги в зависимости от территории, объема услуги и времени ее предоставления. С целью исполнения властных полномочий на начальном этапе возможно установление предельного тарифа на перевозку на всей территории муниципального образования.

**Диверсификация полномочий и зон ответственности в системе управления транспортной системой города.** Необходимо развитие специализации в системе управления ГПТОП, а также институтов аутсорсинга в процессах планирования, проектирования, организации, эксплуатации и контроля функционирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования. При этом функции управления в части реализации властных полномочий должны быть отделены от хозяйственных функций и процесса перевозок.

### **Инструменты управления и регулирования**

Перевозки городским пассажирским транспортом общего пользования регулируются Законом Российской Федерации от 7 февраля 1992 г. № 2300-1 «О защите прав потребителей» [165], Федеральным законом от 8 марта 2001 г. № 128-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности» [166], Федеральным законом от 10 декабря 1995 г. № 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения» и его подзаконными актами (Правилами дорожного движения) [162], Федеральным законом от 8 ноября 2007 г. № 259-ФЗ «Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта» [167].

Каждый из этих федеральных законов подкреплён соответствующими санкциями за их невыполнение и нарушение отдельных положений. Большинство из этих санкций содержатся в Кодексе об административных правонарушениях, небольшая часть – в Уголовном

кодексе Российской Федерации [168, 169]. Все эти законы регулируют порядок предоставления первой из двух описанных выше услуг по транспортному обслуживанию населения городским пассажирским транспортом общего пользования, а точнее – *услуги по перевозке пассажира городским пассажирским транспортом общего пользования*, которую оказывают предприятия-перевозчики.

Параметры качества и безопасности предоставления этой услуги довольно подробно регламентированы приведенными законами и подзаконными актами.

В процессе предоставления второй услуги по транспортному обслуживанию населения городским пассажирским транспортом общего пользования – предоставления гарантий того, что перевозка состоится, органы местного самоуправления испытывают определенные трудности, вызванные в первую очередь отсутствием широкого спектра инструментов для выстраивания качественной системы по ее предоставлению.

В распоряжении муниципальной власти городов для этого есть всего два инструмента регулирования и управления:

1) положения ст. 21 Федерального закона «О безопасности дорожного движения», касающиеся полномочий и обязательств органов местного самоуправления в сфере организации дорожного движения;

2) положения ст. 790 Гражданского кодекса Российской Федерации и Постановления Правительства Российской Федерации от 7 марта 1995 г. № 239, а также законов субъектов Российской Федерации, определяющих полномочия и обязательства органов местного самоуправления в области установления тарифов на перевозку пассажиров городским пассажирским транспортом общего пользования в пределах границ муниципального образования.

Иные взаимоотношения между перевозчиками и организатором перевозок (органами местного самоуправления) возможны исключительно в рамках гражданско-правовых отношений посредством заключения и исполнения договорных обязательств.

Один из наиболее распространенных способов привлечения предприятий-перевозчиков к установлению договорных отношений с организатором перевозок – предоставление бюджетных субсидий на перевозку. Этот инструмент позволяет обеспечить не только выполнение обязательств по предоставлению услуги по перевозке требуемого качества, но и получение необходимых гарантий того, что эта услуга будет оказана.

Весь процесс управления и регулирования предоставления услуг по транспортному обслуживанию населения городским пассажирским транспортом общего пользования можно разбить на два этапа:

1) управление процессами привлечения предприятий-перевозчиков к перевозке пассажиров в системе городского пассажирского транспорта общего пользования;

2) управление процессом контроля над работой предприятий-перевозчиков в маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования.

Следует констатировать, что на их реализацию приходится всего два указанных выше инструмента регулирования – тарифообразование и организация дорожного движения.

Данная ситуация делает невозможным выстраивание системы управления качеством предоставления сразу двух услуг по транспортному обслуживанию населения городским пассажирским транспортом общего пользования на каждом из этапов управления.

Представляется целесообразным использовать инструменты гражданско-правового характера на этапе заключения договоров на оказание услуг по транспортному обслуживанию населения городским пассажирским транспортом общего пользования. Предметом договорных отношений могут стать:

1) со стороны перевозчика – *предоставление гарантий* оказания услуги по перевозке пассажира городским пассажирским транспортом общего пользования;

2) со стороны организатора пассажирских перевозок (органов местного самоуправления) – *предоставление объектов инфраструктуры* городского пассажирского транспорта общего пользования при осуществлении перевозок предприятиями-перевозчиками и *субсидирование* перевозок из муниципального бюджета.

С целью выстраивания правовых отношений между организатором перевозок и предприятием-перевозчиком по предоставлению в пользование объектов инфраструктуры системы городского пассажирского транспорта общего пользования на первом этапе потребуется паспортизация объектов сети ГПТОП с целью их последующего выделения в статусе самостоятельного объекта управления, отделенного от территорий общего пользования.

Исходя из заявленных приоритетов в управлении транспортной системой крупного города, процесс привлечения предприятий-перевозчиков к осуществлению перевозок пассажиров городским пассажирским транспортом общего пользования не может иметь финансовых ограничений.

К перевозке в городской системе пассажирского транспорта общего пользования могут привлекаться любые предприятия-перевозчики, соответствующие требованиям федерального законодательства и выполняющие следующие технические условия (ТУ):

1) соблюдение инфраструктурных ограничений на деятельность привлекаемого перевозчика в системе городского пассажирского транспорта общего пользования;

2) соблюдение принципов добросовестной конкуренции между перевозчиками при осуществлении деятельности по перевозке пассажиров в системе городского пассажирского транспорта общего пользования.

Инфраструктурные ограничения – это объективные факторы, определяющие эффективность функционирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования. К объектам инфраструктуры, на использование которых накладываются ограничения по предельным параметрам их использования, относятся:

- остановочные пункты ГПТОП;
- разворотные площадки и площадки отстоя на конечных пунктах маршрутов ГПТОП;
- выделенные полосы для движения маршрутных транспортных средств.

Методические указания для расчета параметров функционирования инфраструктуры системы городского пассажирского транспорта общего пользования разработаны авторами и внедрены в деятельность администрации города Перми.

Соблюдение принципов добросовестной конкуренции между перевозчиками заключается в создании единых с точки зрения возможных экономических рисков правил входа в систему городского пассажирского транспорта общего пользования. В соответствии с ними каждый перевозчик, работающий в системе городского пассажирского транспорта общего пользования либо только привлекаемый на работу в процессе изменения маршрутной сети, должен изначально понимать уровень своих экономических рисков, связанных с процессами развития и изменения маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования.

Речь идет об экономических рисках, связанных с потерей части объемов перевозимых пассажиров в результате изменения (расширения) маршрутной сети ГПТОП и привлечения в нее новых предприятий-перевозчиков.

Управление процессами привлечения предприятий-перевозчиков к перевозке пассажиров в системе городского пассажирского транспорта общего пользования возможно только с применением конкурсных процедур.

Конкурс может проводиться по одному из нескольких параметров, формализованных в виде конкретных числовых показателей, как то:

- размер субсидии на перевозку;
- размер гарантийных обязательств по исполнению договоров на перевозку;

– технические параметры качества подвижного состава и качества услуги по перевозке.

**Оплата проезда. Тарифообразование.** В отсутствие монополии на пассажирские перевозки городским пассажирским транспортом общего пользования процесс тарифообразования на услуги по транспортному обслуживанию населения не является инструментом стимулирования либо сдерживания развития системы ГПТОП, которое определяется в первую очередь спросом на услуги, а тариф формируется под воздействием рыночных инструментов.

Задача органов местного самоуправления в процессе формирования тарифа – решать внутренние технические задачи управления и развития транспортной системы города. Обязательство по установлению тарифа на перевозки пассажиров городским пассажирским транспортом общего пользования решает задачи перераспределения финансовой нагрузки на обе части этой услуги между:

1) пассажирами ГПТОП и не пассажирами ГПТОП – теми людьми, которые пользуются и первой, и второй частями услуги по транспортному обслуживанию населения, и теми, которые пользуются только второй частью услуги (гарантиями предоставления услуги ГПТОП), не являясь при этом пассажирами общественного транспорта. Следовательно, это распределение финансовой нагрузки между пассажирами и бюджетом муниципалитета;

2) разными пассажирами ГПТОП – теми, которые в разных объемах пользуются первой частью услуги, то есть пассажирами, передвигающимися в процессе реализации своих транспортных потребностей на разные расстояния в соответствии с принципами тарификации услуги по перевозке.

Решение первой задачи формирует макроуровневые принципы оплаты услуг по транспортному обслуживанию населения в городах.

С одной стороны, смещая нагрузку в большей части на бюджет города и финансируя из него гарантии предоставления услуги, органы местного самоуправления имеют возможность менять спрос на услуги по перевозке пассажира городским пассажирским транспортом общего пользования, при этом экономя, например, на дорожном строительстве. С другой стороны, если происходит экономия на бюджетных дотациях в систему городского пассажирского транспорта общего пользования и нагрузка в большей степени перекладывается на его пассажира, уменьшается спрос на услуги ГПТОП и растет спрос на объемы транспортной инфраструктуры, предназначенной для использования индивидуальным транспортом.

Решение второй задачи предполагает разработку справедливых принципов оплаты услуг городского пассажирского транспорта общего пользования, в первую очередь по объему потребленных услуг.



При равной (или почти равной) удельной себестоимости перевозки пассажира на единицу расстояния (км) для одного вида транспорта конечная рентабельность маршрута определяется пассажирооборотом на маршруте. На маршрутах, связывающих удаленные районы с центром города, пассажирооборот существенно ниже, чем на маршрутах, большая часть которых проложена через центр. При фиксированной оплате одной поездки на ГПТОП в черте всего города такое положение вещей делает менее привлекательными для перевозчиков маршруты, связывающие удаленные районы с центром, хотя при этом наблюдается экономически оправданный рост предложений услуг ГПТОП в центре города, что также требует дополнительных ресурсов пропускной способности элементов УДС.

С позиции потребителя услуги – пассажира ГПТОП – наблюдается диспропорция между объемами полученной услуги и стоимостью ее оплаты на маршрутах в центральной части города и на периферийных длинных маршрутах. Подобная ситуация не позволяет выстроить систему, которая учитывала бы интересы пассажира общественного транспорта, заинтересованного в оплате строго фиксированной части предоставленной ему услуги, и одновременно стимулировала бы перевозчиков развивать удаленные маршруты в целях формирования механизма здоровой и справедливой конкуренции между автоперевозчиками.

Дифференциация оплаты услуг городского пассажирского транспорта общего пользования в зависимости от расстояния поездки пассажира призвана нивелировать описанные выше проблемы и несоответствия. В качестве модели формирования дифференцированной оплаты услуг можно предложить систему, базирующуюся на предложенном в предыдущих главах зонировании территории города, разделенной на 10 транспортных зон.

Сгруппируем зоны в четыре типа:

1) городской центр (зона 1). Для зон данного типа характерна максимальная деловая активность;

2) центральные районы, прилегающие к городскому центру (зоны 2–5). Для этих зон характерна преобладающая высотная застройка и многофункциональное использование территории;

3) удаленные районы (зоны 6–8). Такие зоны имеют собственные центры деловой и социальной активности. Перспектива – преобразование данных участков в самостоятельные поселения и их автономизация;

4) обширные участки с низкой плотностью населения (малоэтажные строения) (зоны 9, 10).

Основной принцип определения стоимости поездки пассажира в предлагаемой системе заключается в подсчете количества пересекаемых границ обозначенных зон при его следовании от начальной

остановки при посадке до конечной остановки при его выходе из транспортного средства. Следует ожидать существенного усложнения процедуры сбора оплаты проезда и контроля оплаты и возможных трудностей адаптации пассажиров ГПТОП к предлагаемой зонной системе оплаты проезда. С целью нивелирования этих негативных ожиданий предлагается на начальном этапе внедрения зонной оплаты проезда использовать переходную систему дифференцированного тарифа, которая заключается в фиксации стоимости проезда на маршруте в зависимости от его типа.

В качестве примера можно привести систему автобусных маршрутов, состоящую из трех типов маршрутов. Для удобства восприятия пассажирами подвижной состав на каждом типе маршрута окрашивается в определенный цвет:

- 1) зеленые автобусы не пересекают зоны (стоимость проезда – один тариф);
- 2) желтые – пересекают одну границу зон (стоимость проезда – полтора тарифа);
- 3) красные – пересекают две и более границ зон (стоимость проезда – два тарифа).

**Рациональный тип подвижного состава.** Каркасом транспортной системы городов должен стать рельсовый пассажирский транспорт большой провозной способности (надземный либо подземный). Для крупных городов – это трамвай, в перспективе генеральных планов городов – скоростной трамвай. Трамвайная сеть должна дополняться сетью автомобильного транспорта.

Суточная неравномерность загрузки территории движением определяет тип подвижного состава, действующего на данной территории:

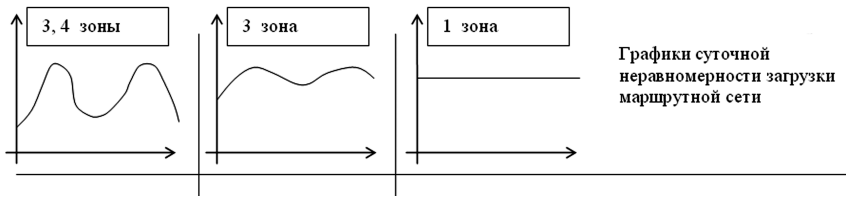
– среднесуточный коэффициент использования пропускной способности действующей инфраструктуры определяет рациональный тип подвижного состава на маршруте;

– суточная неравномерность интенсивности движения (коэффициента использования пропускной способности) определяет возможность смены типа подвижного состава на маршруте в течение суток.

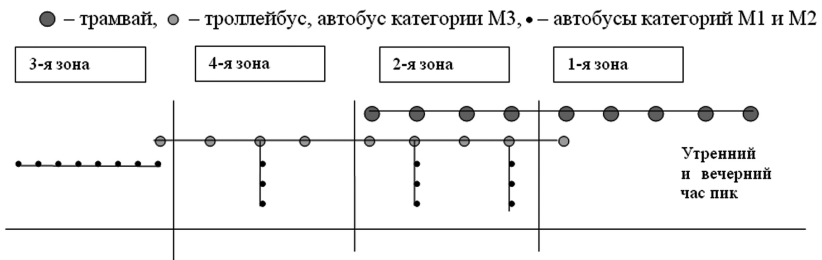
Фиксируемый среднесуточный коэффициент использования пропускной способности действующей инфраструктуры определяет загрузку инфраструктуры каждого типа городской территории в течение дня (в порядке убывания):

- зоны первого типа;
- зоны второго типа;
- зоны третьего типа;
- зоны четвертого типа.

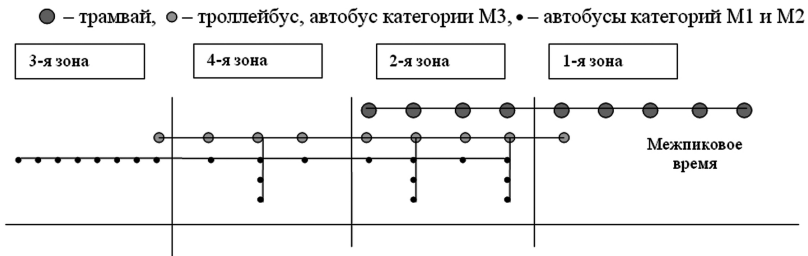
Существенная суточная неравномерность пассажиропотока обуславливает целесообразность замены подвижного состава на марш-



**Рис. 5.8.** Схематичные графики суточной неравномерности использования действующей инфраструктуры в зависимости от типа зон



**Рис. 5.9.** Предлагаемое распределение систем транспорта, типа и категорий подвижного состава на маршрутах ГПТОП по зонам в утренний и вечерний час пик



**Рис. 5.10.** Предлагаемое распределение систем транспорта, типа и категорий подвижного состава на маршрутах ГПТОП по зонам в межпиковое время

рутах на меньший по пассажировместимости в течение дня. На рис. 5.8 представлены графики суточной неравномерности использования действующей инфраструктуры в зависимости от типа зон.

Зона первого типа (зона 1) характеризуется постоянным во времени и высоким по значению уровнем использования действующей инфраструктуры, поэтому для нее рациональным типом подвижного состава из возможных наземных систем транспорта будет трамвай, скоростной трамвай. Для остальных типов зон – это автобусы особо большой вместимости, автобусы большой вместимости, автобусы малой вместимости в зависимости от типа зон.

Предлагаемое распределение систем транспорта, типа и категорий подвижного состава на маршрутах ГПТОП по зонам представлено на рис. 5.9 и 5.10, где кружками разного оттенка и диаметра представлены схематично остановки подвижного состава ГПТОП различных систем транспорта, типа и категорий подвижного состава.

**Конкурсные процедуры.** Конкурсные процедуры являются единственным инструментом привлечения (допуска) предприятий-перевозчиков к оказанию услуги по перевозке пассажиров городским пассажирским транспортом общего пользования. Следует различать два типа заказа услуги:

- первичное размещение заказа;
- вторичное (срочное) размещение заказа; размещение в качестве эксперимента.

При первичном размещении заказа на оказание услуги по перевозке пассажиров городским пассажирским транспортом общего пользования спецификация услуги определена организатором перевозок – органами местного самоуправления и является приложением к проекту договора и конкурсной документации в виде технического задания, содержащего основные параметры заказываемой услуги: территория; маршрут; интервалы движения; время начала и окончания оказания услуги в течение суток; технические требования, предъявляемые к подвижному составу и качеству перевозочного процесса.

При вторичном размещении заказа на оказание услуги по перевозке пассажиров городским пассажирским транспортом общего пользования спецификация услуги определена предприятием-перевозчиком либо группой граждан. Состав спецификации услуги аналогичен спецификации услуги первичного размещения, но отличается тем, что допуск к оказанию услуги производится в декларационном порядке предприятием-перевозчиком на срок 3 месяца. По его истечении сформированное задание на перевозку выставляется на конкурс по той же процедуре, как и при первичном размещении заказа.

Размещение заказа на осуществление оказания услуги по перевозке пассажиров городским пассажирским транспортом общего пользования осуществляется по аналогии с предоставлением участков под строительство: маршруты выставляются на конкурс в подготовленном виде, с пакетом документов, проведенными расчетами прогнозной прибыли и в соответствии с техническими условиями.

Конкурсную процедуру на размещение заказа целесообразно проводить в два этапа:

- 1) первый этап – конкурс. Участники размещения заказа выбираются по совокупности критериев, определяющих технические параметры, предъявляемые к подвижному составу и качеству перевозочного

процесса. В конце первого этапа конкурсная комиссия рекомендует список предприятий-перевозчиков к участию во втором этапе;

2) второй этап – аукцион. Участники размещения заказа выбираются в результате торгов по размерам субсидий, предоставляемых из бюджета на осуществление услуги по перевозке пассажиров городским пассажирским транспортом общего пользования по каждому лоту.

При вторичном размещении заказа необходимо обеспечить стабильную работу перевозчиков, прошедших конкурсные процедуры первичного размещения, так как открытие новых маршрутов неизбежно приведет к снижению пассажиропотока и доходов на сопряженных маршрутах, разыгранных на конкурсе.

Перевозчик, участвующий в конкурсе, должен быть предупрежден о таком варианте развития событий и готов к возможным рискам, а сами риски сведены к минимуму.

Принципы формирования и открытия новых маршрутов при вторичном размещении состоят в следующем.

Маршруты открываются в порядке эксперимента на определенный период (3 месяца). Эксперимент включает в себя следующие основные моменты:

– маршрут может быть открыт в порядке эксперимента при соответствии установленным ТУ:

соответствие инфраструктурным ограничениям;

отсутствие дублирования существующих маршрутов;

– в течение эксперимента проводится изучение пассажиропотока и определяется востребованность каждого открытого маршрута по установленным параметрам;

– востребованные по итогам эксперимента маршруты включаются в единую маршрутную сеть, при необходимости производится корректировка объемов работ на сопряженных маршрутах;

– открытые и существующие маршруты группируются в лоты и распределяются через конкурсные процедуры с заключением договоров на 3 года.

Нормативно устанавливается единое время подачи заявок на открытие новых маршрутов при вторичном размещении. Представляется целесообразным в качестве такого периода принять август каждого года. В этом месяце формируются спецификации экспериментальных маршрутов и подаются декларации о намерении осуществлять на них перевозки. Порядок проведения эксперимента и критерии его оценки отражены в нормативном документе «Порядок открытия и закрытия маршрутов регулярных перевозок».

**Субсидирование.** Как уже отмечалось, исчерпывающий перечень полномочий и зон ответственности органов местного самоуправления изложен в ст. 16 Федерального закона от 6 октября 2003 г. № 131-ФЗ

«Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» [161].

В Законе не предусмотрено выделение какой-либо отдельной строки полномочий, являющейся приоритетной по сравнению с остальными, поэтому и п. 5 (содержание и строительство автомобильных дорог общего пользования и т. д.), и п. 7 (создание условий для предоставления транспортных услуг населению и организация транспортного обслуживания населения в границах городского округа) ст. 16 являются прямыми и равноправными муниципальными полномочиями и соответственно расходными обязательствами местного бюджета.

В существующем и определенном преимущественно положениями Федерального закона № 131-ФЗ правовом поле нет никаких объективных причин добиваться «сомокупаемости» либо «безубыточности» работы городского пассажирского транспорта общего пользования. Кроме того, в силу указанной двойственной природы услуги по транспортному обслуживанию населения городским пассажирским транспортом общего пользования потребителями услуги первого и второго вида являются все жители города (все налогоплательщики), и в этом плане обязательства по дорожной деятельности и транспортному обслуживанию населения являются равноправными и обеспечиваются налогами общего покрытия.

Представляется целесообразным рассмотреть в первом приближении эффективность субсидирования обязательств (функционального блока), направленных на обеспечение подвижности населения. Представим на примере города Перми баланс размеров субсидий (трат бюджета) на эти цели.

Бюджет дорожного строительства, реконструкции, ремонта и содержания УДС составляет 4 млрд рублей в год, а бюджет Департамента дорог и транспорта, направляемый на субсидии перевозчиков всех систем транспорта, оплату вводимых муниципалитетом льгот, – 800 млн рублей. Сопоставим эти расходы с объемами предоставляемых услуг, выраженными в пассажиро-километрах.

Примем допущение о том, что бюджетные ассигнования в ГПТОП приходятся на реализацию подвижности именно на общественном транспорте, а бюджетные ассигнования в дорожное строительство, реконструкцию, ремонт и содержание УДС идут на реализацию подвижности при помощи индивидуального транспорта. Данное допущение принято для простоты расчетов и анализа.

Следует, разумеется, иметь в виду, что траты бюджета на дорожное строительство покрывают также инфраструктурные запросы системы ГПТОП, в частности систем наземного автомобильного транспорта. Однако в этом случае надо также учитывать, что в общем объеме движения подвижной состав ГПТОП представляет собой лишь 1/17 часть всего транспортного потока в городе, поэтому для нужд подвижного

Таблица 5.3

**Оценочный расчет размеров дотаций (трат бюджета) на покрытие обязательств по обеспечению подвижности населения посредством индивидуального и общественного транспорта**

Транспорт	Пасс.-км в сутки	Пасс.-км в год	Субсидии, руб. в год	Размер дотаций на 1 пасс.-км, руб.
Индивидуальный	9 551 623	3 486 342 367	4 000 000 000	1,147334
Общественный	4 120 945	1 504 144 976	800 000 000	0,531864

состава ГПТОП существующей дорожной инфраструктуры уже хватает, и нет необходимости ее наращивать. Итоговые результаты расчета представлены в табл. 5.3.

Результаты оценочного расчета показывают, что в первом приближении расходы бюджета на предоставление услуг по обеспечению транспортной подвижности населения посредством индивидуального транспорта в пересчете на единицу данной услуги оказываются значительно выше расходов на единицу услуги ГПТОТ.

Следует предположить, что в крупнейших городах эти показатели будут не столь различаться, а в европейских городах цифры удельных трат бюджета на обеспечение транспортной подвижности населения разными способами будут одинаковыми. Показатель удельных затрат на обеспечение транспортных потребностей населения может также служить индикатором эффективности функционирования городской транспортной системы.

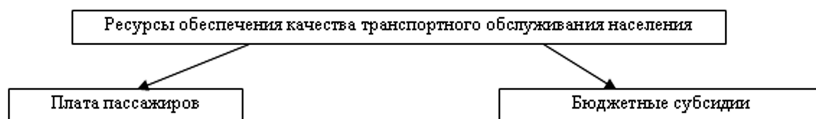
**Требования к качеству предоставления услуг по транспортному обслуживанию населения городским пассажирским транспортом общего пользования**

Услуга по перевозке пассажиров городским пассажирским транспортом общего пользования связана с использованием механических транспортных средств, представляющих собой источник повышенной опасности. В связи с этим деятельность по перевозке пассажиров указанным видом транспорта регламентируется целым рядом законов и нормативных актов федерального уровня, касающихся обеспечения безопасности этого процесса со стороны как подвижного состава, так и объектов инфраструктуры.

При рассмотрении услуги по организации транспортного обслуживания населения с точки зрения качества и безопасности следует отметить, что ее двойственность накладывает дополнительные требования к качеству каждой части. Конкретные параметры качественных

показателей предоставления услуги по организации транспортного обслуживания населения определяются возможностями сообщества (жителей города) оплачивать услуги соответствующего качества.

Как было указано ранее, плательщиками услуги выступают не только пассажиры городского пассажирского транспорта общего пользования, но и остальные жители города. Баланс финансовой нагрузки на пассажиров и на не пассажиров общественного транспорта определяется уровнем субсидирования общественного транспорта и принятым тарифом на оплату услуги по перевозке.



**Рис. 5.11.** Обеспечение ресурсами параметров качества функционирования системы ГПТОП

Параметры качественных показателей предоставления услуги по организации транспортного обслуживания населения разрабатываются органом администрации города, уполномоченным в области содержания и строительства автомобильных дорог, организации транспортного обслуживания населения, и утверждаются органом представительной власти муниципального образования. В соответствии с двойственной природой услуги по организации транспортного обслуживания населения требования к качеству предоставляемых услуг имеют аналогичную структуру (рис. 5.12).



**Рис. 5.12.** Структура параметров качества услуг по организации транспортного обслуживания населения

Услуги по организации транспортного обслуживания населения предоставляются жителю города еще до осуществления им поездки на ГПТОП. Услуга по организации процесса перевозки обеспечивает в результате гарантию осуществления перевозки. В первую очередь

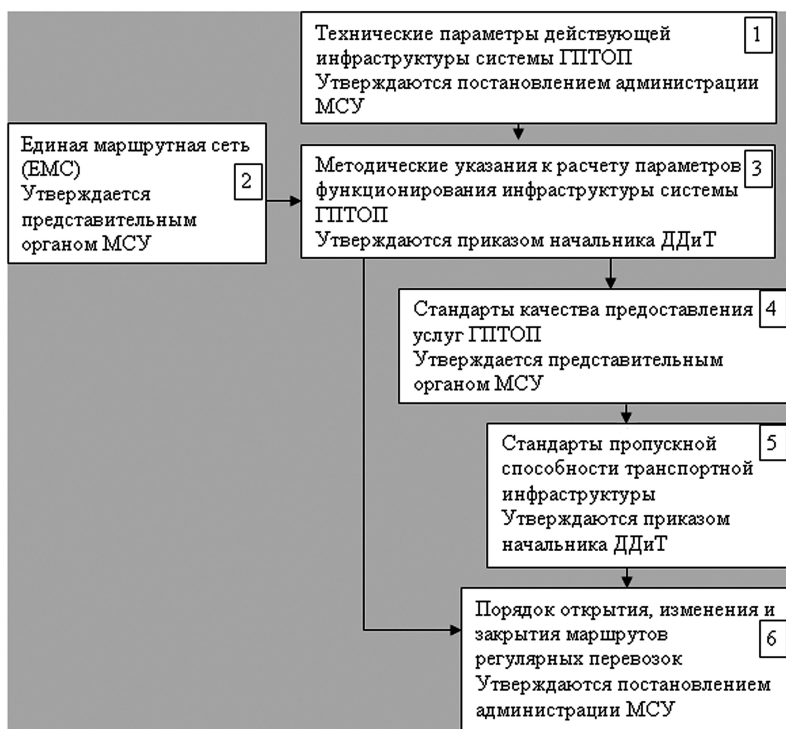


процессная составляющая этой услуги относится к взаимодействию организатора перевозок и предприятия-перевозчика.

Для конечного потребителя этой услуги (жителя города) услуга выражается через информационное обеспечение функционирования ГПТОП путем доведения необходимой потенциальному пассажиру информации на каждом этапе пользования услугой по перевозке: на остановочном комплексе, в подвижном составе, в информационном пространстве города.

### Система правоустанавливающих и нормативных документов в сфере организации транспортного обслуживания населения городским пассажирским транспортом общего пользования

Для развития существующего правового поля в области функционирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования требуются разработка и последующее принятие ряда нормативных документов местного значения. Состав и общая структура необходимых документов приведены на рис. 5.13.



**Рис. 5.13.** Система правоустанавливающих и нормативных документов в сфере организации транспортного обслуживания населения городским пассажирским транспортом общего пользования

Таблица 5.4

**Технические характеристики основных элементов инфраструктуры городского пассажирского транспорта общего пользования**

Параметр	Необходимая информация	Источник информации	Комментарий
<b>1. Фактическая пропускная способность остановочных пунктов</b>			
Количество автобусов, способное одновременно осуществлять посадку/высадку пассажиров на остановочном пункте	Длина остановочного кармана	Организатор перевозок	
Количество одновременно ожидающих транспорт пассажиров, которое может вместить остановочный павильон	Площадь остановочного павильона	Организатор перевозок	
Потенциал остановки по привлечению пассажиропотока	По данным транспортной модели	Транспортная модель	Из модели рассчитанные объемы пассажиропотоков на остановках
<b>2. Расчетная интенсивность движения на участках УДС с полосами для движения маршрутных транспортных средств</b>			
Интенсивность транспортного потока в час	Интенсивность движения ИТ. Расписание движения ОТ	Транспортная модель	С учетом выделенной полосы ОТ/в общем потоке
Коэффициент использования пропускной способности	Интенсивность движения ИТ. Расписанию движения ОТ	Транспортная модель, натурные наблюдения	С учетом выделенной полосы ОТ/в общем потоке
<b>3. Фактическая пропускная способность разворотных площадок и мест отстоя ГПТОП</b>			
Количество автобусов, которое может одновременно отставиваться на конечном остановочном пункте	Площадь разворотной площадки	Организатор перевозок	

Рассмотрим подробнее назначение и состав каждого из документов.

1. Технические параметры действующей инфраструктуры системы ГПТОП – это паспорт инфраструктуры системы ГПТОП, включающий в себя технические характеристики основных структурных элементов. Возможная структура документа представлена в виде таблицы (табл. 5.4).

2. Единая маршрутная сеть. Данный документ представляет собой паспорт функционирования системы ГПТОП и включает в себя информацию:

а) по остановкам:

- номер и наименование маршрута;
- интервал прибытия маршрута на остановку в час пик;
- количество прибытий маршрута в час пик;
- средний интервал прибытия всех маршрутов на остановку;
- среднее количество прибытий всех маршрутов на остановку;

б) по маршрутам:

- номер и наименование маршрута;
- путь следования маршрута по остановочным пунктам и участкам улиц в прямом и обратном направлении (из модели);
- количество графиков на маршруте;
- время начала и окончания движения маршрута;
- интервалы движения маршрута в часы пик.

3. Методические указания для расчета параметров функционирования инфраструктуры системы городского пассажирского транспорта общего пользования. Этот документ представляет собой методику расчета параметров функционирования системы ГПТОП и включает в себя алгоритмы и формулы, позволяющие, исходя из параметров ЕМС, рассчитать:

а) вероятность прибытия на остановочный пункт количества ТС, превышающего его фактическую пропускную способность;

б) предельные параметры функционирования разворотных площадок и мест отстоя подвижного состава ГПТОП;

в) предельные параметры интенсивности движения ТС подвижного состава ГПТОП на участках УДС с полосами для движения маршрутных транспортных средств.

4. Стандарты качества предоставления услуг ГПТОП. Документ включает в себя:

а) требования к средствам транспорта:

- к подвижному составу;
- к инфраструктуре ГПТОП;

б) требования к процессу перевозки;

в) требования к информационному сопровождению функционирования ГПТОП.

5. Стандарты пропускной способности транспортной инфраструктуры – документ, содержащий принимаемые на территории города минимальные требования к отдельным элементам инфраструктуры ГПТОП и действующий в отношении следующих объектов:

а) остановочные пункты, в том числе конечные:  
– вероятность прибытия на остановочный пункт количества ТС, превышающего его фактическую пропускную способность;  
– допустимое количество человек на 1 м<sup>2</sup> площади остановочного павильона;

б) предельная пропускная способность участков УДС;

6. Порядок открытия, изменения, закрытия маршрутов – итоговый документ в последовательности нормативных документов, который определяет порядок процедуры открытия и закрытия маршрутов ГПТОП, а также фиксирует возможные ограничения по открытию и закрытию маршрутов связанные:

а) с дублированием смежных маршрутов;

б) с инфраструктурными ограничениями.

Документ содержит в себе ссылки на стандарты пропускной способности транспортной инфраструктуры, а также определяет минимальный пассажиропоток:

а) для закрытия существующего маршрута;

б) для включения маршрута в ЕМС.

### **5.5. Стратегия управления транспортной системой крупного города**

На основе проведенных исследований в условиях сформированной системы управления требуется выработка стратегии принятия управленческих решений в области развития и текущей эксплуатации транспортной системы города.

Стратегия призвана установить единый алгоритм выработки и принятия управленческих решений в указанной области при двух способах управления: проектном и процессном.

Основными документами проектного управления являются разработанные в городах и принятые к исполнению генеральные планы в части развития транспортных систем. Генеральные планы городов, если рассматривать их реализацию через различные способы управления организационными системами (см. табл. 5.1 выше), представляют собой:

1) концепцию (руководящую идею);

2) программу (перечень мероприятий на перспективу генерального плана);

3) схему (схемы реконструкции и развития отдельных территорий и их инфраструктурных элементов).

Недостающими в общей обойме документов являются:

- 1) стратегия (методика реализации концепции);
- 2) план (часть общей программы, принятая к реализации в текущий период).

Разработка и принятие исполнительным органом власти (администрацией города) планов работ на текущий и последующие отчетные (бюджетные) периоды предполагают наличие механизма выбора приоритетов из представленного общего набора мероприятий генерального плана (программы мероприятий). Такой механизм должен установить взаимное соответствие между концептуальными идеями генеральных планов и программными мероприятиями, заложенными в них, а также интерпретировать основные идеи в целевые (числовые) показатели эффективности их реализации с точки зрения затрат бюджета. Таким инструментом служит документ под названием «Стратегия управления транспортной системой крупного города».

Стратегия предусматривает единый порядок выработки и принятия управленческих решений в области развития и текущей эксплуатации транспортной системы города как в проектном, так и в процессном управлении. Процесс выработки и процесс принятия (выбора) управленческих решений основаны на положениях глав 4 и 3 соответственно.

#### **5.5.1. Стратегия выработки управленческих решений в области развития и текущей эксплуатации транспортной системы**

Управленческие решения в области развития и текущей эксплуатации транспортной системы крупного города вырабатываются с целью повышения эффективности функционирования транспортной системы, а следовательно, согласно положениям главы 1, – повышения качества жизни на его территории.

Управленческие решения могут быть направлены на осуществление мероприятий в области изменения как транспортного спроса, так и транспортного предложения.

К *первой группе* относятся мероприятия территориального планирования, находящиеся в сфере регулирования землепользования и застройки территории города:

- комплексное освоение отдельных городских территорий;
- локальные инвестиционные проекты в области строительства объектов различного назначения;
- проекты в области изменения назначения и использования имеющихся объектов городской недвижимости.

Данная группа мероприятий в целях повышения эффективности функционирования транспортной системы города определяет баланс использования его территории с целью снижения общего объема

транспортного спроса. На основе транспортного анализа территории (глава 2) и решения двойственной задачи формирования эффективной транспортной системы (глава 4) определяют территории, имеющие:

1) наибольшую разность  $|SG_g(i) - SG'_g(i)|$  количества референтных лиц из формул (3.1) и (3.2) для слоя спроса  $g$  в районе  $i$  (население, трудящиеся, рабочие места, рабочие места в сфере услуг, студенты, учебные места), образующих слой спроса (см. табл. 3.1 в главе 3);

2) наименьшее значение  $Y_{2E+3(r-1)+s}$  (формула (4.86.1)) в каждой зоне. Полученные в результате решения двойственной модели значения оценок транспортной зависимости территории представлены на рис. 4.30 (глава 4).

Для таких территорий формируется программа мероприятий, направленная:

1) на выравнивание параметров использования территории города с целью снижения общего объема транспортного спроса;

2) на изменение назначения использования различных объектов (элементов городской структуры) с целью задействования найденных резервов транспортной зависимости территории от транспортных перемещений различных типов (формула (4.77)).

Ко второй группе относятся мероприятия в области транспортного планирования и организации дорожного движения:

– строительство новых и реконструкция действующих объектов транспортной инфраструктуры города;

– организация движения;

– совершенствование маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования.

Данная группа мероприятий определяет оптимальный объем транспортной инфраструктуры города, а также назначение ее отдельных элементов с целью эффективного удовлетворения сформированного транспортного спроса.

На основе решения двойственной задачи формирования эффективной транспортной системы (глава 4) устанавливают территории, имеющие:

1) наибольшее значение  $Y_r$  (формула (4.86.1)), определяющее оценку ресурсного потенциала протяженности транспортной инфраструктуры в зоне и влияние данного ресурса на целевую функцию качества функционирования транспортной системы города;

2) наибольшие значения  $Y_{6E+2+r}$  и  $Y_{7E+2+r}$  (формула (4.86.1)), определяющие оценку ресурсного потенциала частотности возникновения ДТП, ущерба от них в зоне (рис. 4.33) и влияние данного ресурса на

целевую функцию качества функционирования транспортной системы города.

Для таких территорий формируется программа мероприятий, направленная:

1) на строительство новых и реконструкцию действующих объектов транспортной инфраструктуры города в зонах с наибольшим значением  $Y_r$  (формула (4.86.1)). В этих зонах на основе найденных пределов устойчивости соответствующих двойственных оценок (рис. 4.32, правая шкала) определяют максимально необходимый объем ввода в эксплуатацию объектов транспортной инфраструктуры;

2) организацию движения в зонах с наибольшими значениями  $Y_{6E+2+r}$  и  $Y_{7E+2+r}$  (формула (4.86.1)). В этих зонах требуется разработка мероприятий для снижения рисков возникновения ДТП;

3) совершенствование маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования в зонах, имеющих найденные значения  $Y_r > 0$ . В таких зонах после определения объемов ввода в эксплуатацию объектов транспортной инфраструктуры требуется определить назначение вводимых элементов транспортной инфраструктуры, в частности, для новых и реконструируемых элементов УДС города в соответствии с четырьмя типами:

- объездные/подъездные дороги (артерии);
- общегородские улицы (второстепенные артерии);
- районные улицы (собирающие);
- квартальные улицы (местные).

Одна и та же улица на всем своем протяжении в каждой зоне может иметь разный тип.

### **Методика определения и назначения типов участков улично-дорожной сети**

Типы участков УДС (классификация улиц и дорог) назначаются из четырех указанных типов в зависимости от имеющейся в данной зоне транспортного спроса определенной структуры в соответствии с тремя типами корреспонденций (см. рис. 4.2 в главе 4): АВ – транзит; ВС – въезд в зону; CD – внутреннее движение в зоне.

Улицы (участки улиц) первого и второго типа должны обеспечивать необходимый объем корреспонденций  $G_{r1}$  (см. раздел 4.3.3), улицы (участки улиц) третьего типа – необходимый объем корреспонденций  $G_{r2}$ , а четвертого типа – необходимый объем корреспонденций  $G_{r3}$ .

Обозначим как  $LZ_{1r}$  необходимый объем протяженности элементов УДС в зоне, относящихся к первому и второму типам, как  $LZ_{2r}$  – относящихся к третьему типу и как  $LZ_{3r}$  – относящихся к четвертому типу улиц (участков улиц).

Тогда

$$LZ_{1r} = \frac{G_{r1}}{G_{r1} + G_{r2} + G_{r3}} \cdot L_r, \quad (5.1)$$

$$LZ_{2r} = \frac{G_{r2}}{G_{r1} + G_{r2} + G_{r3}} \cdot L_r, \quad (5.2)$$

$$LZ_{3r} = \frac{G_{r3}}{G_{r1} + G_{r2} + G_{r3}} \cdot L_r, \quad (5.3)$$

где  $LZ_{1r}$  – необходимый объем протяженности элементов УДС в зоне, относящихся к первому и второму типам улиц, км;  $LZ_{2r}$  – необходимый объем протяженности элементов УДС в зоне, относящихся к третьему типу улиц, км;  $LZ_{3r}$  – необходимый объем протяженности элементов УДС в зоне, относящихся к четвертому типу улиц, км;  $L_r$  – общая протяженность элементов УДС в зоне  $r$ , км;  $G_{r1}$  – транспортная зависимость территории зоны  $r$  для корреспонденций типа 1 (транзит), чел · км/сутки;  $G_{r2}$  – транспортная зависимость территории зоны  $r$  для корреспонденций типа 2 (въезд), чел · км/сутки;  $G_{r3}$  – транспортная зависимость территории зоны  $r$  для корреспонденций типа 3 (внутреннее движение), чел · км/сутки.

После определения требуемого объема улиц (участков улиц) различного назначения для каждой зоны выполняют камеральные работы по назначению типов (категорий) конкретным городским улицам и их участкам в каждой зоне при сохранении рассчитанного баланса типов участков в зоне.

Каждому типу улиц в зависимости от назначения ставится в соответствие типовый продольный профиль улицы, обеспечивающий это назначение. Каждому продольному профилю улицы назначается список эксплуатационных параметров:

– максимальная часовая пропускная способность;



- разрешенная скорость движения;
- разрешенный состав транспортного потока.

Эксплуатационные параметры улиц в дальнейшем закладываются в прогнозную транспортную модель (см. раздел 3.1.4 в главе 3) с целью получения прогнозного спроса на движение на участках для последующего анализа и выработки эффективных вариантов организации дорожного движения.

Результатом выработки управленческих решений в области развития и текущей эксплуатации транспортной системы является программа мероприятий в сфере транспортного планирования, организации дорожного движения, совершенствования маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования на период действия генерального плана города.

Программа мероприятий служит исходным документом для выбора и принятия управленческих решений в указанных областях на каждый бюджетный год в зависимости от текущих возможностей бюджета муниципального образования.

### **5.5.2. Стратегия выбора и принятия управленческих решений в области развития и текущей эксплуатации транспортной системы**

#### **Основные принципы стратегии выбора**

##### *Первый принцип: этапы*

Рассмотрение объектов, определяющих функционирование и развитие транспортной системы города, идет по принципу *от сложного к простому*. Последовательно рассматриваются три уровня объектов.

Исследование проводят в направлении от сложных объектов к простым: территория (2-мерный объект, полигон) → участки УДС (1-мерный объект, линия) → перекрестки (0-мерный объект, точка).

##### Приоритеты:

- качество функционирования территории важнее качества функционирования входящих в нее улиц;
- качество функционирования улицы в целом важнее качества функционирования находящихся на ней перекрестков.

Организация дорожного движения и регулирования движения на перекрестках определяется исходя из типов участков улиц, образующих перекресток, и их эксплуатационных параметров. Исходными данными проектов организации дорожного движения служит прогнозная интенсивность изменения спроса на движение через перекресток.

##### *Второй принцип: критерии* (определяются территориями)

##### Приоритеты:

- самодостаточность каждой городской территории в транспортном плане важнее транспортных связей между территориями;

– транспортная связанность территорий друг с другом важнее их транзитного потенциала.

Основной принимаемый целевой показатель – выравнивание транспортной обеспеченности территории города (см. раздел 3.2.3 в главе 3).

*Расчетные показатели:*

- транспортная обеспеченность территории (ТОТ), мин.;
- транспортная обеспеченность доступа к территории (ТОД), мин.;
- транспортная обеспеченность транзита через территорию (ТОТР), мин.;
- интегральный показатель качества транспортной системы на отдельной территории, мин.;
- среднее интегральное время реализации транспортных корреспонденций в городе, мин.;
- стоимость реализации проекта, руб.;
- интегральный эффект от реализации проекта, мин./руб.

### Методика обоснования выбора

Все проекты, составляющие программу мероприятий в области развития и текущей эксплуатации транспортной системы города, ранжируются по расчетному показателю – интегральному эффекту от реализации проекта (мин./руб.). С этой целью проводится следующая процедура:

#### 1. Исследование транспортной зависимости территории

А. Для существующего состояния и проектной ситуации формируют два набора значений транспортной обеспеченности территории (ТОТ) – для каждой зоны:

$$\text{ТОТ} = \frac{\sum_k x_{kCD} \cdot l_{kCD} \cdot t_{kCD}}{\sum_k x_{kCD} \cdot l_{kCD}}$$

где ТОТ – транспортная обеспеченность территории, мин.;  $k$  – порядковый номер пути типа  $CD$  в исследуемой зоне;  $x_{kCD}$  – количество корреспонденций на  $k$ -м пути типа  $CD$  за сутки;  $t_{kCD}$  – время совершения корреспонденций на  $k$ -м пути типа  $CD$ , мин.;  $l_{kCD}$  – длина  $k$ -го пути типа  $CD$ , м.

Значения для каждой зоны помещают в таблицу, подобную табл. 5.5.

**Исследование транспортной зависимости территории  
(пример составления таблицы)**

Номер зоны	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Существующее значение ТОТ по зонам, мин.										
Проектное значение ТОТ по зонам, мин.										

В. Проводят сопоставление проектных значений ТОТ по текущему значению, не допуская при реализации проектов их увеличения.

С. Аналогично формируют по два набора значений для транспортной обеспеченности доступа к территории (ТОД) и транзита через территорию (ТОТТ), которые также сравнивают для существующей и проектной ситуаций.

### 2. Определение интегральных показателей качества

А. Для оценки эффекта от реализации проекта используют интегральный показатель качества транспортной системы для каждой зоны, который является линейной комбинацией ТОТ, ТОД и ТОТТ:

$TI_{cp} = \beta_{AB} \text{ТОТТ}_i + \beta_{BC} \text{ТОД}_i + \beta_{CD} \text{ТОТ}_i$ . Весовые коэффициенты слагаемых определяют, как предложено в разделе 3.2.3 (формула (3.5.5)). Наибольший коэффициент будет у ТОТ, наименьший – у ТОТТ.

В. Для всей территории города в целом определяют оценку эффекта от реализации проекта по параметру «среднее интегральное время реализации транспортных корреспонденций в городе»:

$TI_{cp} = \alpha_1 TI_{cp1} + \alpha_2 TI_{cp2} + \dots + \alpha_{10} TI_{cp10}$  (раздел 3.2.3). Данный параметр является линейной комбинацией значений интегрального показателя качества транспортной системы для всех зон.

С. Для каждого проекта определяются интегральный эффект от реализации проекта  $WP^i$  (мин./руб.), где  $i$  – порядковый номер проекта в программе мероприятий.

$$WP^i = TI_{cp}^i / VP^i, \quad (5.4)$$

где  $VP^i$  – стоимость  $i$ -го проекта (руб.)

### 3. Формирование плана

А. На каждый отчетный (бюджетный) период формируется план мероприятий в области развития и текущей эксплуатации транспортной системы города, включающий мероприятия, имеющие наибольшее значение  $WP^i$ . Объем мероприятий из общей программы должен соответствовать имеющемуся объему консолидированного бюджета муниципального образования, выделенного на заданные цели.

#### 5.5.3. Возможные негативные последствия ошибок в управлении развитием городских транспортных систем

Анализ текущей и предшествующей градостроительной документации многих российских городов, в том числе в европейской части, в условиях рыночных отношений позволяет утверждать, что инерционные приемы проектирования советского периода могут привести к утрате городом устойчивого, стабильного развития.

В мире существуют две разновидности рыночной модели социально-экономического развития: «социально ориентированная модель» и «либеральная модель». Каждая из них с разной долей успешности реализуются в системах государственного устройства, законодательных основах государственности, налоговой политике и системе управления.

В градостроительстве, в частности в развитии транспортных систем городов, также можно различить две устойчивые модели развития: европейскую и американскую.

Первая модель характеризуется высокой плотностью населения в городе, наличием общегородского центра, насыщенного объектами культурного и бытового обслуживания и жильем. При высоком уровне автомобилизации населения транспортное обслуживание, тем не менее, основано на разветвленной системе городского общественного транспорта. Индивидуальный автомобиль при этом часто исключен из ежедневных трудовых и даже рекреационных корреспонденций.

Американская модель характеризуется рыхлой городской структурой, типичной для большинства средних и крупных городов США, низкой плотностью населения, отсутствием явного городского центра, преобладанием одноэтажной застройки. При этом наблюдаются значительные ежедневные миграции населения между местами работы, обслуживания и проживания.

Обе эти модели имеют право на существование, хотя это утверждение справедливо только на настоящий момент. Ряд крупнейших городов западного и восточного побережья США (Нью-Йорк, Вашингтон, Сан-Франциско) нельзя назвать городами с рыхлой структурой застройки и отсутствием явного городского центра. В этих городах плотность населения и мест приложения его труда уже не позволяет

использовать личный автомобиль для удовлетворения своих транспортных корреспонденций. Вместе с тем, как и в старых городах Европы, в мегаполисах США формируются свои доминанты в городской застройке, которые в итоге становятся естественными ограничителями на пути расширения улично-дорожной сети. В таких условиях городское сообщество вынуждено менять свою американскую либеральную модель развития транспортной системы на европейскую социально ориентированную модель.

Уже сейчас значительные транспортные издержки городского общества в этих городах вынуждают использовать в качестве рычагов управления транспортной системой европейские подходы, призванные сдерживать использование личного автомобиля и стимулировать развитие услуг городского пассажирского транспорта общего пользования.

Американская либеральная модель развития транспортной системы в городах опасна тем, что создает растущую нагрузку на инфраструктуру, разрушает исторический центр, наносит ущерб городской экологии, вызывает риски потери устойчивости вследствие возникновения ДТП.

Применительно к градостроительству принцип устойчивого развития подразумевает бережливое использование ресурсов, ограничение освоения новых земель, снижение потребности в использовании транспорта, создание безопасных и комфортных условий проживания для максимального числа горожан.

Существует также две гипотезы трансформации городской структуры при использовании различных инструментов управления развитием транспортной системы города. Следует различать две модели потери устойчивости нормального функционирования города, показывающие две крайние стадии потери устойчивости в результате необдуманной транспортной политики. Это появление новообразований, которые можно назвать:

- город-губка;
- город-бублик.

Город-губка – это такой город, где бывшие промышленные зоны, заброшенные районы и пространства не используются, не застраиваются заново, в то время как строительство все время ведется на неразработанных территориях, на свободных землях. При этом в модели управления работает регулятор в виде дифференциации стоимости аренды земли и земельных налогов в зависимости от удаленности от центра.

Понятно, что получение доходов в городской бюджет от повышения ставок налогов на землю в центральных частях городов с лихвой компенсируется дополнительными затратами на развитие и содержание увеличивающейся транспортной и иной инженерной инфраструктуры.

Формирование этого сценария потери устойчивости городской структуры уже началось во многих российских городах. Основным руководящим документом на этом пути становятся правила землепользования и застройки городской территории. В большинстве городов основная идея этого документа состоит в резервировании территорий под возрастающие потребности расширения транспортной инфраструктуры города.

Город-губка – это результат замкнутого цикла расползания города вширь с одновременной необходимостью резервирования в центральной части города новых и новых площадей под развитие транспортной инфраструктуры, реализация инфраструктурных проектов на которых откладывается из-за недостатка бюджетного финансирования.

Город-бублик – это гораздо более далекая перспектива возможно негативного развития территории и целостности города. Она пока не видна, но хорошо прогнозируема. Данная модель предполагает отсутствие всяких регуляторов управления развитием транспортной системы и является олицетворением либерального пути развития системы – движения по пути наименьшего сопротивления.

В этой модели управления развитием городской структуры не предполагается использование жестких регламентов резервирования территорий под объекты инфраструктуры, отсутствие дифференциации величины земельного налога и т.п. Потеря устойчивости функционирования городской инфраструктуры по этому сценарию начнется как раз не с экономических проблем, связанных с растущими объемами расходования средств на содержание инфраструктуры, а с проблемами землепользователей и владельцев недвижимости.

Эффективность использования земли в центре таких городов будет снижаться пропорционально росту транспортных издержек на обслуживание этих территорий. После того как объемы этих издержек по доступу к территориям в центре города превысят разницу в стоимости земельного участка в центре и на периферии, следует ожидать массового оттока объектов приложения труда и бизнеса из центральной части города и их расползания по периферийной территории города.

Нетрудно понять, что транспортная нагрузка центра города от такой передислокации объектов источников и стоков транспортных корреспонденций не только не снизится, но будет увеличиваться – до тех пор, пока не нарушится экономическое единство территории как города и не образуются вместо одного «бублика» несколько самостоятельных и самодостаточных городских поселений меньшего объема.

Доказательство принятой гипотезы нетрудно провести, имея в распоряжении транспортную модель города. Проведем исследования на транспортной модели города. Перми. Для этого изменим модель транспортного спроса города, построив ее исходя из того, что в центральном

планировочном районе (ЦПР) города отсутствуют места притяжения транспортных корреспонденций (в нашем случае – рабочие места).

Выполним прогноз функционирования транспортной системы города при новом транспортном спросе, а также при новом транспортном предложении. Новое транспортное предложение будет моделировать замещение выбывающих объектов притяжения транспорта объектами транспортной инфраструктуры до полного удовлетворения транспортных потребностей, то есть станет реализовывать ситуацию развития транспортного предложения в центральной части города путем сноса объектов недвижимости и расширения УДС.

В результате расчетов были получены следующие значения основного интегрального показателя функционирования транспортной системы города – времени реализации транспортных корреспонденций (табл. 5.6).

Таблица 5.6

#### Среднее время реализации транспортных корреспонденций

Сценарий	Среднее время реализации транспортных корреспонденций, мин.
Существующее положение	44,215
Без рабочих мест в ЦПР	46,745
Без рабочих мест в ЦПР с полным удовлетворением транспортных потребностей	46,216

Полученные значения среднего времени реализации транспортных корреспонденций (увеличение во втором и третьем сценариях) говорят об ухудшении транспортной ситуации по городу в целом. Данную тенденцию можно объяснить тем, что увеличилась средняя длина каждой корреспонденции, так как жители центральной части города стали совершать трудовые и бытовые корреспонденции за пределами центра. Аналогично жители периферийных районов, которые ранее работали или получали бытовое обслуживание в центральной части города, вынуждены совершать корреспонденции в другой периферийный район, вследствие чего их средний пробег также увеличился.

Гипотезу об увеличении среднего пробега подтверждает и то, что в третьем сценарии среднее время меньше, чем во втором, но хуже, чем в первом. Это объясняется тем, что в третьем сценарии отбросили фактор снижения скорости движения в ЦПР вследствие возросшей транспортной нагрузки.

Выдвинутая и проверенная на модели гипотеза хорошо иллюстрирует не только пагубность бесконтрольной концентрации объектов притяжения транспортных потоков в центральных частях городов, но и несостоятельность идей о принудительном переносе части объектов притяжения из центра города на периферию.

### Выводы

Система управления сложными техническими системами является ключевым звеном процесса повышения эффективности их функционирования. Имея на территории города систему эффективного управления, следует ожидать заказа от этой системы на разработку управленческих решений в области развития транспортных систем, повышения эффективности их функционирования. Не имея системы управления, невозможно реализовать даже самые прогрессивные и эффективные решения.

Предложенная концепция управления находится в существующем правовом поле. Предложенная ранее оптимальная модель формирования эффективной транспортной системы крупного города по набору своих ограничений соответствует основным рассматриваемым предметам управления, относящимся к вопросам местного самоуправления, согласно Федеральному закону № 131-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации».

Во многих крупных российских городах система управления дорожно-транспортным комплексом сегментирована по нескольким функциональным подразделениям, но *отсутствует единый, постоянно действующий орган управления*, размыта ответственность за принятие решений, не реализован механизм участия граждан в этом процессе. Надежды на реализацию проектов в области автоматизированных систем управления не оправдывают себя.

Предложенные в работе методы и алгоритмы формирования эффективной транспортной системы крупного города невозможно реализовать в системах муниципального управления большинства крупных российских городов. Наличие в оптимальной модели системной связи ограничений с целевой функцией транспортной системы не позволит повышать качественные показатели ее функционирования, осуществляя управленческие воздействия на сферу полномочий и ответственности какого-либо из существующих функциональных блоков управления.

Для решения этой проблемы предложено пересмотреть существующие модели управления: вместо модели организационной системы, созданной по технологическому принципу, предлагается использование управленческой модели, основанной на фазовом принципе, подразумевающим разграничение зон ответственности в принятии реше-



ний между функциональными блоками в зависимости от основных фаз жизненной активности населения городов.

В такой системе предметом управления выступает жизненная фаза, а способом управления – жизненный цикл функционирования любого отдельного объекта, составляющего транспортную систему города.

Не касаясь политического устройства системы муниципальной власти, можно применить предложенный подход ко всем отраслям управления городским хозяйством. В этой сфере целесообразно распространить принятый на федеральном уровне принцип разделения функциональных и операционных подразделений органов управления по примеру министерств и федеральных агентств, конечная структура должна состоять из набора функциональных и операционных подразделений и служб.

Сформулированы шесть базовых приоритетов в управлении транспортной системой крупного города. Особое внимание уделено системе управления в области предоставления транспортных услуг населению.

Предложена новая трактовка термина «услуга» в контексте федерального законодательства: транспортное обслуживание населения городским пассажирским транспортом общего пользования предполагает оказание двух различных по своей сути услуг. В главе определяются состав услуг, потребители и поставщики каждой из них, а также ответственность за их реализацию и оплату.

Стратегия управления транспортной системой крупного города связывает найденные решения оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы города с выработкой, выбором и принятием конкретных управленческих решений, направленных на осуществление мероприятий в области изменения как транспортного спроса, так и транспортного предложения.

Выработка управленческих решений и формирование программы развития транспортной системы города основаны на анализе полученных двойственных оценок математической модели двойственной задачи, а также пределов устойчивости решения модели.

Выбор и принятие управленческих решений основаны на ранжировании программных мероприятий в области развития транспортной инфраструктуры города в соответствии с показателем интегрального эффекта от реализации мероприятий.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный труд – попытка выявить закономерности функционирования транспортных систем в крупных городах. При этом транспорт города представлен как природно-техническая система с ярко выраженной информационной составляющей. С этой позиции описаны ее назначение, цель и ограничения функционирования.

В качестве исходного постулата при поиске закономерностей было принято, что эффективность функционирования транспорта города существенно влияет на качество жизни населения на территории, которое определяется качеством среды обитания и качеством (полнотой) удовлетворения жизненных потребностей людей, в первую очередь, социальных и духовных.

Разработан методический подход, позволяющий с единых системных позиций выстроить в определенной последовательности ряд частных методик, описывающих те или иные частные зависимости отдельных процессов и явлений на пути установления взаимосвязей характеристик транспортной системы и качества жизни населения в городах.

Первой в этой цепочке описания взаимосвязей стоит *методика пространственного анализа территории города* с точки зрения оценки его транспортного потенциала. Разработанные универсальные подходы к оценке характера распределения элементов городской структуры, влияющих на транспортный спрос, позволяют формировать требуемые для создания прогнозных транспортных моделей массивы информации, касающиеся распределения транспортной подвижности населения по территории города. Полученные закономерности функционирования транспортной системы крупного города и транспортного поведения его жителей позволили разработать научно-методические основы построения прогнозных математических моделей транспортного спроса и транспортного предложения в крупных городах..

Анализ распределения *транспортного спроса* по исследуемой территории проведен с использованием показателя – «транспортная зависимость территории». На его основе предложена многоуровневая

система показателей оценки качества функционирования транспортных систем городов, основанная на исследовании транспортной обеспеченности территории. Она позволяет выявить на всей исследуемой территории зоны равной транспортной обеспеченности, а в качестве цели городской транспортной политики задать выравнивание уровня транспортной обеспеченности отдельных городских территорий. Предложено ввести дополнительные характеристики, определяющие специфику функционирования транспортных систем отдельных территорий, а также обобщенные интегральные показатели функционирования транспортной системы города в целом.

Связующим элементом всей работы является *методика постановки оптимизационной задачи* формирования эффективной транспортной системы крупного города. Предложено использовать теорию математического программирования (инструменты постановки и решения оптимизационных задач линейного программирования) для решения задачи формирования транспортной системы крупного города. В качестве примера рассмотрена транспортная система города Перми, для которой построены оптимальные модели прямой и двойственной задачи, приведены решение и анализ оптимальных моделей распределения транспортного спроса. Создан инструмент, позволяющий оценить имеющиеся ресурсы с точки зрения их запасов и вклада (влияния) в эффективность транспортной системы города, а следовательно, и качество жизни.

Важным моментом реализации представленных методик и моделей является разработка принципов управления транспортной системой крупного города. Основу их составляет идея замещения существующей модели управления городским хозяйством, созданной «по технологическому принципу», управленческой моделью, основанной на «фазовом принципе». В такой системе управления предметом управления является «жизненная фаза», а способом управления – «жизненный цикл». Жизненный цикл функционирования любого транспортного объекта и транспортной системы в целом. Стратегические решения в управлении транспортной системой города основаны на анализе решения математических моделей прямой и двойственной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города, а также на разработке программных и плановых мероприятий в соответствии с разработанными критериями качества функционирования системы.

Развитие разработанного методологического подхода применительно к транспортной системе страны в целом и ее отдельных регионов видится в том, что качество и назначение транспортных систем целесообразно рассматривать в двух плоскостях:

- обеспечение транспортной доступности;
- снижение транспортных издержек.

В обоих случаях объектом исследования является транспортная система (транспортная система страны, региона и города), а вот предметом исследования – две стороны функционирования транспортных систем с точки зрения возможности удовлетворять различные потребности современного человека – физиологические либо духовные.

Для каждого предмета исследования должны формулироваться свои цели и ограничения функционирования транспортных систем, а также основные классы создаваемых исследователями транспортных моделей.

Авторы понимают, что на пути выявления достоверных количественных взаимосвязей транспортных систем с качеством жизни населения, социально-экономическим развитием государства предстоит решить много задач, и надеются, что данная работа не останется незамеченной, найдет единомышленников и последователей, работающих в этой активно формирующейся области знаний – науке о развитии транспортных систем городов, регионов, государства.

## Список литературы

1. Большой энциклопедический словарь иностранных слов / сост. А.Ю. Москвин. – М.: Центрполиграф; Полус, 2003. – 816 с.
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ; принят Гос. Думой Федер. Собрания Рос. Федерации 22.12.2004.
3. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ.
4. *Якимов М.Р.* Концепция транспортного планирования и организации движения в крупных городах: монография. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – 175 с.
5. *Михайлов А.Ю.* Анализ прогнозов генерального плана Иркутска и транспортных обследований 1995–1998 гг. // Город: прошлое, настоящее, будущее: сб науч. тр. – Иркутск: Изд-во Иркут гос. ун-та., 2000. – С. 217–220.
6. *Капица С.П.* Гиперболический путь человечества. – М.: Изд. дом «Тончу», 2009. – 128 с.
7. *Якимов М.Р.* Транспортные системы крупных городов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 184 с.
8. *Кондаков И.М., Нилопец М.Н.* Экспериментальное исследование структуры и личностного контекста локуса контроля // Психолог. журн. – 1995. – № 1.
9. *Милютин Н.А.* Соцгород. – Берлин: DOM Publishers, 2008.
10. О разработке предпроектных предложений на строительство в Москве плотного объекта с использованием научных технологий и концепции «ЭлСити»: распоряжение Правительства Москвы № 1176-РП.
11. *Блинкин М.Я., Гордеев С.Э.* Почему этот город едет? Субъективные заметки о транспортной системе города Куригиба.  
<http://www.archnadzor.ru/?p=1240#more-1240>, 2008.
12. *Ваксман С.А.* Проблемы развития и организации функционирования транспортных систем городов // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы VIII Международ. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: АМБ, 2002. – С. 10–15.
13. *Вуцик В.Р.* Транспорт в городах, удобных для жизни. – М.: Территория будущего, 2011. – 576 с.
14. *Высоковский А.А.* Удобный город: три уровня созидания // Рос. экспертное обозрение. – 2007. – № 4–5 (22). – С. 71–74.
15. *Гончарук О.В.* Экономическая эффективность транспортно-технических систем. – М.: Наука, 1991. – 128 с.
16. *Гутнов А.Э., Глазьев В.Л.* Мир архитектуры. Лицо города. – М.: Молодая гвардия, 1990.
17. *Ставицкий Ю.А.* Транспортные системы городов. – М.: Стройиздат, 1990. – 224 с.

18. Гольц Г.А. Гужевой транспорт и гужевые пути сообщения России (со II в. до 1917 г.). – М.: ИНП РАН, 2005.
19. Дубелир Г.Д. Городские улицы и мостовые. – Киев, 1912.
20. Дубелир Г.Д. Планировка городов. – СПб., 1910.
21. Зильберталь А.Х. Проблемы городского пассажирского транспорта. – М.; Л.: Гострансиздат, 1937.
22. Зильберталь А.Х. Трамвайное хозяйство. – М.; Л.: Гостехиздат, 1932. – 188 с.
23. Шелейховский Г.В. Композиция городского плана как проблема транспорта. – М., 1946.
24. Серд И. Теория городской дорожной сети, 1861.
25. Горев А.Э. Информационные технологии и средства связи на автомобильном транспорте. – СПб.: Санкт-Петерб. гос. архитектур.-стр. ун-т, 1999. – 162 с.
26. Горев А.Э., Олещенко Е.М. Организация автомобильных перевозок и безопасность движения. – М.: Академия, 2006. – 256 с.
27. Зырянов В.В. Логистические системы управления общественным транспортом: дис. ... канд. экон. наук. – Ростов н/Д, 2001.
28. Зырянов В.В., Кериди П.Г. Применение микромоделирования для прогнозирования развития транспортной инфраструктуры и управления дорожным движением // Дороги России XXI века. – 2009. – № 3. – С. 37–40.
29. Зырянов В.В., Кочерга В.Г. Современные подходы к разработке комплексных схем организации дорожного движения // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 1. – С. 28–33.
30. Зырянов В.В., Миротюк В.П., Шабанов А.В. Методы формирования региональных транспортно-логистических систем: учеб. пособие. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2004.
31. Зырянов В.В., Санамов Р.Г., Голенецкий Ю.В. Опыт развития пассажирского транспорта в Ростове-на-Дону: учеб. пособие. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2003. – 144 с.
32. Информационные технологии на автомобильном транспорте / В.И. Коноплянко, В.М. Богачев [и др.]. – М.: Изд-во Моск. автодорож. ин-та, 2002. – 223 с.
33. Левашев А.Г., Михайлов А.Ю., Головных И.М. К вопросу уточнения критериев, используемых при проектировании режимов регулирования // Вестн. стипендиатов DAAD. – Иркутск: Иркут. гос. техн. ун-т, 2004. – С. 21–26.
34. Миротин Л.Б., Ларин О.Н. Интегрированная модель транспортной системы регионов Российской Федерации // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 1. – С. 25–27.
35. Миротин Л.Б., Ларин О.Н. Концептуальные основы развития транзитного потенциала автотранспортной системы региона // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 3. – С. 5–6.
36. Логистика. Общественный пассажирский транспорт: учеб. для студ. эконом. вузов / Л.Б. Миротин, В.Д. Герами [и др.]; под общ. ред. Л.Б. Миротина. – М.: Экзамен, 2003. – 224 с.
37. Миротин Л.Б., Покровский А., Эгембердиев А. Логистическая основа функционирования систем // Мир транспорта. – 2007. – № 4. – С. 16–22.
38. Миротин Л.Б., Кузнецов С.А. Особенности логистического сервиса при функционировании систем товародвижения // Интегрированная логистика. – 2009. – № 4. – С. 18–20.

39. *Миротин Л.Б.* Технологии мультимодальных и интермодальных перевозок // Грузовое и пассажирское автохозяйство. – 2007. – № 8. – С. 26–28.
40. Управление грузовыми потоками в транспортно-логистических системах: монография / Л.Б. Миротин, В.А. Гудков [и др.]; под ред. Л.Б. Миротина. – М: Горячая линия – Телеком, 2010. – 704 с.
41. *Михайлов А.Ю.* Анализ прогнозов генерального плана Иркутска и транспортных обследований 1995–1998 гг. // Город: прошлое, настоящее, будущее: сб науч. тр. – Иркутск: Иркут. гос. техн. ун-т, 2000. – С. 217–220.
42. *Михайлов А.Ю.* Восстановление матриц корреспонденций на основе данных интенсивности движения // Транспорт: наука, техника, управление: сб. обзор информации ВИНИТИ. – 2003. – № 7. – С. 30–34.
43. *Михайлов А.Ю.* Интегральный критерий оценки качества функционирования улично-дорожных сетей // Изв. ИГЭА. – Иркутск: БГУЭП, 2004. – С. 50–53.
44. *Михайлов А.Ю.* Проектирование городских улиц и дорог: учеб. пособие. – Иркутск: ИрГТУ, ИрДУЦ, 1998. – 111 с.
45. *Михайлов А.Ю., Головных И.М.* Модель оценки пропускной способности улично-дорожной сети // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: сб. докл. 5-й Междунар. конф. – СПб.: Санкт.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2002. – С. 229–231.
46. *Михайлов А.Ю., Головных И.М.* Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов. – Новосибирск: Наука, 2004. – 267 с.
47. *Михайлов А.К., Головных И.М., Лагереv Р.Ю.* Оценка существующей матрицы корреспонденции на основе данных интенсивности движения // Вестн. Краснояр. гос. техн. ун-та. – Вып. 35. – 2004. – С. 183–190.
48. *Михайлов А.Ю., Лагереv Р.Ю.* Робастное восстановление матриц корреспонденции // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: сб. докл. 6-й Междунар. конф. – СПб.: Санкт.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2004. – С. 232–234.
49. *Бабков В.Ф.* Дорожные условия и безопасность движения: учеб. для вузов. – М.: Транспорт, 1993. – 271 с.
50. *Бабков В.Ф., Андреев О.В.* Проектирование автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1979. – 407 с.
51. *Луканин В.Н., Трофименко Ю.В.* Промышленно-транспортная экология: учеб. для вузов / под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 2003. – 273 с.
52. Автотранспортные потоки и окружающая среда – 1, 2 / В.Н. Луканин, А.П. Буслаев [и др.]. – М.: ИНФРА-М, 1998, 2001. – 408 с.
53. *Сильянов В.В.* Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977.
54. *Сильянов В.В., Домке Э.Р.* Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учеб. для студ. вузов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 352 с.
55. *Герaми В.Д.* Методология формирования системы городского пассажирского общественного транспорта: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2001. – 416 с.
56. *Герaми В.Д., Дукаревич Г.В.* Организация и управление городскими пассажирскими автомобильными перевозками: учеб. пособие. – М.: Моск. автодорож. ин-т, 1994. – 144 с.



57. *Герامي В.Д., Миротин Л.Б., Ташибаев Ы.Э.* Логистика: общественный пассажирский транспорт: учеб. для студ. экон. вузов / под общ. ред. Л.Б. Миротина. – М.: Экзамен, 2003. – 222 с.
58. *Самойлов Д.С.* Городской транспорт. – М.: Стройиздат, 1983. – 384 с.
59. *Самойлов Д.С.* Научные основы организации пассажирского транспорта в городах: автореф. дис. д-ра техн. наук. – М., 1972. – 40 с.
60. *Сафронов Э.А.* Транспортные системы городов и регионов: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2005. – 272 с.
61. *Семенов В.В.* Математическое моделирование динамики транспортных потоков. – М., 2004.
62. *Александр К.Э., Руднева Н.А.* Скоростной рельсовый транспорт в градостроительстве. – М.: Стройиздат, 1985. – 140 с.
63. Развитие транзитного потенциала автотранспортных систем регионов: научная монография / О.Н. Ларин, А.П. Приходько [и др.]. – М.: ВИНТИ РАН, 2010. – 344 с.
64. *Ложкин В.Н.* Загрязнение атмосферы автомобильным транспортом: справ.-метод. пособие. – СПб.: НПК «Атмосфера», 2001.
65. *Трофименко Ю.В., Якимов М.Р.* Отчет по проекту № 2.1.2/2654 «Разработка научной методологии обеспечения техносферной безопасности автотранспортного комплекса». – М.: Моск. автодорож. ин-т, 2009. – 236 с.
66. *Донченко В.В.* Проблемы обеспечения устойчивости функционирования городских транспортных систем: монография. – М.: ИКФ «Каталог», 2005. – 184 с.
67. *Корчагин В.А.* Инновационная экоекономика: монография: в 2 ч. – Липецк: Изд-во Липецк. эколого-гуманит. ин-та, 2009. – Ч. I: Фундаментальные основы равновесия между окружающей средой и экоекономикой. – 130 с.
68. *Трофименко Ю.В., Якимов М.Р.* Новый подход к транспортному планированию и организации дорожного движения в крупных городах (на примере г. Перми) // Проблемы устойчивого развития городского транспорта в Российской Федерации: материалы конф., посв. 80-летию ОАО «НИИАТ». – М., 2011. – С. 80–95.
69. Анализ проблем транспортной системы центра крупного города: опыт применения методов математического моделирования / В.П. Федоров, О.М. Пахомова [и др.] // Управление развитием территории. – 2009. – № 4. – С. 18–25.
70. *Филимонов С.* Аварийность в денежном измерении // Грузовое и пассажирское автохозяйство. – 2007. – № 2.
71. *Власов В.М., Ефименко Д.Б., Постолиит А.В.* Информационное обеспечение автотранспортных систем: учеб. пособие / под ред. В.М. Власова. – М., 2004. – 242 с.
72. Телематика на автомобильном транспорте / В.М. Власов, С.В. Жанказиев [и др.]. – М.: Моск. автодор. ин-т, 2003. – 173 с.
73. Информационные технологии на автомобильном транспорте / В.М. Власов, А.Б. Николаев [и др.] / под общ. ред. В.М. Приходько. – М.: Наука, 2006. – 283 с.
74. *Кажаяев А.А., Ларин О.Н., Томилов С.В.* Вопросы моделирования движения общественного транспорта в муниципальных образованиях // Транспорт Урала. – 2011. – № 3(30). – С. 24–27.

75. *Клинковштейн Г.И., Афанасьев М.Б.* Организация дорожного движения. – М.: Транспорт, 2001. – 247 с.
76. *Поляков А.А.* Городское движение и планировка улиц. – М.; Л.: Госстройиздат, 1953. – 251 с.
77. *Поляков А.А.* Организация движения на улицах и дорогах. – М.: Транспорт, 1965. – 376 с.
78. *Фишельсон М.С.* Критерии оценки качественного уровня работы городского пассажирского транспорта. – М.: Транспорт, 1974. – 119 с.
79. *Фишельсон М.С., Михайлов А.Ю.* К вопросу выбора критерия оценки качества организации движения на регулируемых пересечениях магистральных улиц // Пути повышения эффективных мероприятий по повышению безопасности дорожного транспорта: материалы семинара. – Л., 1981. – С. 40–44.
80. *Хейт Ф.* Математическая теория транспортных потоков: пер. с англ. – М.: Мир, 1966.
81. Экономическая эффективность новых технологий в развитии наземного транспорта. Препринт / Т.А. Владимирова [и др.]. – Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. ун-та путей сообщения, 2004. – 72 с.
82. *Гасанова М.А.* Транспорт в региональном народнохозяйственном комплексе. – М.: Наука, 1989. – 96 с.
83. *Донченко В.В., Кунин Ю.И., Сазонова Г.М.* Влияние автодорожного комплекса на окружающую природную среду Российской Федерации в 2006 г.: аналит. материалы к разделу «Транспорт и связь» Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2006 году». – М.: Автополис-плюс, 2008. – 76 с.
84. *Корчагин В.А., Лятин С.А.* Методические основы управления потоковыми процессами на автомобильном транспорте: учеб. пособие. – Липецк: Липецк. гос. техн. ун-т, 2007. – 246 с.
85. *Корчагин В.А., Ушаков Д.И., Филоненко В.Ю.* Оценка эколого-экономической эффективности автомобильного транспорта. – Липецк: Липецк. эколого-гуманит. ин-та, 2007. – 160 с.
86. *Трофименко Ю.В., Якимов М.Р.* Постановка оптимизационной задачи распределения транспортного спроса в транспортных системах городов // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов: сб. тез. докл. II Междунар. эколог. конгресса. – Тольятти: Тольят. гос. ун-т, 2009. – С. 11–22.
87. *Трофименко Ю.В., Якимов М.Р.* Постановка, результаты и анализ решения математической модели формирования эффективной транспортной системы крупного города (на примере Перми) // Вестн. Моск. автодорож. ин-та. – 2011. – № 3 (26). – С. 60–65.
88. *Трофименко Ю.В., Якимов М.Р.* Постановка, результаты, и анализ решения математической модели формирования эффективной транспортной системы крупного города на примере Перми // Вестн. Моск. автодорож. ин-та. – 2011. – № 3 (26). – С. 60–65.
89. *Кондратьев В.Д.* Модели и методы управления безопасностью дорожного движения: дис. ... д-ра техн. наук. – Воронеж, 2008. – 213 с.
90. *Лобанов Е.М.* Транспортная планировка городов. – М.: Транспорт, 1990. – 240 с.

91. *Бугаев А.С., Буслаев А.П., Яшина М.В.* Дорожное движение в мегаполисах: проблемы и перспективы решения. Ч. 1. Общие вопросы. – М.: Технополиграфцентр, 2009. – 184 с.

92. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автотранспортного движения / А.П. Буслаев, А.В. Новиков [и др.]. – М.: Мир, 2003.

93. *Ларин О.Н., Смолин В.Н.* Совершенствование принципов формирования тарифов на муниципальные пассажирские перевозки общественным транспортом // Транспорт Урала. – 2010. – № 2 (25). – С. 96–98.

94. *Дрю Д.* Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972.

95. *Иносэ Х., Хамада Т.* Управление дорожным движением. – М.: Транспорт, 1983.

96. *Коноплянко В.И.* Организация и безопасность дорожного движения. – М.: Высш. шк., 2007. – 384 с.

97. *Швецов В.И., Алиев А.С.* Математическое моделирование загрузки транспортных сетей. – М.: URSS, 2003. – 64 с.

98. Математическое моделирование динамики автотранспортных потоков и вызываемого ими загрязнения атмосферного воздуха в автомобильных тоннелях / Н.Н. Смирнов, А.Б. Киселев [и др.] // Научные технологии. – 2003. – Т. 4. – № 9. – С. 29–43.

99. Математическое моделирование автомобильных потоков на магистралях / Н.Н. Смирнов, А.Б. Киселев [и др.] // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Матем. Механ. – 2000. – № 4. – С. 39–44.

100. Математическое моделирование автотранспортных потоков на регулируемых дорогах / А.Б. Киселев, А.В. Кокорева [и др.] // Прикл. матем. и механ. – 2004. – Т. 68. – Вып. 6. – С. 1047–1054.

101. *Киселев А.Б., Кокорева А.В., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н.* Математическое моделирование движения двухполосного автотранспортного потока, регулируемого светофором / А.Б. Киселев, А.В. Кокорева [и др.] // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Матем. Механ. – 2006. – № 4. – С. 35–40.

102. Математическое моделирование движения автотранспортных потоков методами механики сплошной среды. Исследование влияния искусственных дорожных неровностей на пропускную способность участка дороги / А.Б. Киселев, А.В. Кокорева [и др.] // Современные проблемы математики и механики. – Т. I: Прикладные исследования / под ред. В.В. Александрова и В.Б. Кудрявцева. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. – С. 311–322.

103. *Стрельников А.И.* Моделирование транспортных систем на начальных стадиях градостроительного проектирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1978.

104. *Кирзнер Ю.С.* Измерение эффективности системы пассажирского транспорта города // Городской транспорт и организация движения. – Свердловск, 1973. – С. 123–130.

105. *Кирзнер Ю.С.* Оценка качества транспортного обслуживания населения города и его районов. – М.: ЦБНТИ Минавтогнп РСФСР, 1976. – 44 с.

106. *Ставицкий Ю.А.* Цели и задачи разработки транспортных систем на различных стадиях градостроительного проектирования // Повышение качества транспортно-планировочных решений в градостроительном планировании. – М., 1977.

107. Левашев А.Г., Михайлов А.Ю. К вопросу об организации движения на регулируемых пересечениях // Роль предприятий и отраслей транспортной системы и связи в социально-экономическом развитии региона: сб. науч. тр. – Иркутск: БГУЭП, 2003. – С. 89–96.
108. Пугачёв И.Н. Развитие транспортной инфраструктуры города – путь вывода экономики на траекторию уверенного роста // Изв. Самар. науч. центра РАН. Спец. выпуск: Перспективы и направления развития транспортной системы. – 2007. – С. 57–61.
109. Модели и методы теории логистики: учеб. пособие / В.С. Лукинский [и др.]; под ред. В.С. Лукинского. – СПб.: Питер, 2008. – 448 с.
110. Транспортировка в логистике: учеб. пособие / В.С. Лукинский [и др.]. – СПб.: СПбГИЭУ, 2005. – 109 с.
111. Лукинский В.С., Пластуняк И.А., Штин А.А. Использование логистических принципов для повышения эффективности внутригородских автомобильных перевозок // Экономический механизм регулирования инвестиционной деятельности в сфере городского хозяйства и недвижимости: сб. на-уч. тр. – СПб.: СПбГИЭУ, 2004. – С. 192–194.
112. Смирнов И.В. Городские автобусные перевозки: справочник. – М.: Транспорт, 1991. – 238 с.
113. Смирнов И.В. Организация и управление пассажирскими автомобильными перевозками: учеб. для студ. учреждений сред. проф. образования. – 5-е изд., перераб. – М.: Академия, 2010. – 400 с.
114. Смирнов И.В. Перевозки пассажиров городским транспортом: справ. пособие. – М.: Академкнига, 2004. – 413 с.
115. Попов А.М., Никитин Н.Н. Оценка эффективности некоторых новых технологий развития транспортных систем северных районов России // Безопасность и логистика транспортных систем: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Самара: СГАПС, 2004. – С. 131.
116. О федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы России (2010–2015 годы)»: Постановление Правительства Рос. Федерации от 5 декабря 2001 г. № 848 // СПС «Гарант».
117. Медоуз Д.Х., Рандерс Й., Медоуз Д.Л. Пределы роста. – М.: Академкнига, 2008. – С. 344.
118. Ставничий Ю.А. Транспортные системы крупных городов США: обзор ЦНТИ. – М., 1979.
119. Якимов М.Р. Движущие силы и ограничения развития транспортных систем городов // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы юбил. XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2010. – С. 104–114.
120. Троицкая Н.А., Чубуков А.Б. Единая транспортная система? – М.: Академия, 2009. – 240 с.
121. Maslow A. Motivation and personality. Rev. ed. – New York: Harper and Row, 1970.
122. Высоковский А.А. Уют – не-герой // Жилище в России: век XX. Архитектура и социальная история: монограф. сб. – М.: Три квадрата, 2001. – С. 116–121.
123. Ваксман С.А. Изучение подвижности населения для обоснования градостроительных решений // Социально-экономические проблемы развития

транспортных систем городов и зон их влияния. – Екатеринбург, 2006. – С. 38–40.

124. Якимов М.Р. Расчетный метод формализации исходных данных для построения модели транспортного спроса на передвижения с учебными целями // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 3 (51). – С. 132–138.

125. Статистические данные параметров подвижности и уровня использования различных видов транспорта для городов Германии (предст. комп. Poугу) // [http://www.shell.de/home/content/deu/aboutshell/our\\_strategy/mobility\\_scenarios](http://www.shell.de/home/content/deu/aboutshell/our_strategy/mobility_scenarios).

126. Якимов М.Р. Исследование параметров транспортной подвижности населения городов Германии, Италии и России // Вестн. транспорта Поволжья. – 2011. – № 4 (28). – С. 21–28.

127. Fancello Distribuzione commerciale e trasporti in Italia. Metodo e manual per le previsioni di mobilita. – Milan, 2005. – P. 340.

128. Петров В.Ю., Якимов М.Р. Транспортные модели городов – современное состояние и инновации транспортного комплекса: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Пермь, 17–18 апр. 2008 г.): в 2 т. – Пермь, 2008. – Т. II. – С. 234–246.

129. Петров В.Ю., Петухов М.Ю., Якимов М.Р. Анализ режимов работы улично-дорожной сети г. Перми. – Пермь: ПГТУ, 2004.

130. Петров В.Ю., Якимов М.Р. Геоинформационная система по эксплуатации и развитию транспортного комплекса региона // Научные разработки и изобретения Пермского государственного технического университета: реферативный сборник. – Пермь, 2003.

131. Regirer S.A., Smirnov N.N., Chenchik A.E. Mathematical model of moving collectives interaction: Public transport and passengers // Automation and Remote Control. – 2007. – Vol. 68. – № 7. – P. 1225–1238.

132. Якимов М.Р. Анализ влияния различных сценариев развития транспортной системы крупного города на возможные варианты нарушения целостности городской структуры // Вестн. транспорта Поволжья. – 2011. – № 1 (25). – С. 18–24.

133. Якимов М.Р. Методика оценки транспортного потенциала городской территории // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: материалы Междунар. конф. – СПб.: Санкт-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т, – 2010. – С. 333–337.

134. Якимов М.Р., Трофименко Ю.В. Методика оценки эффективности реализации транспортного спроса на урбанизированной территории // Транспорт Урала. – 2010. – № 3. – С. 34–39.

135. Канторович Л.В., Горстко А.Б. Оптимальные решения в экономике. – М.: Наука, 1972. – 231 с.

136. Линейное и нелинейное программирование: учеб. пособие / И.Н. Ляшенко, Е.А. Карагодова [и др.] ; под общ. ред. И.Н. Ляшенко. – Киев: Вища школа, 1975. – 372 с.

137. Гасс С. Линейное программирование (методы и приложения). – М.: Физматгиз. 1999. – 299 с.

138. Якимов М.Р., Левда Н.М. Оптимальные модели формирования и развития транспортной системы города // Вестн. ИНЖЕКОНа. Сер. Экономика. – 2010. – Вып. 3 (38). – С. 231–238.

139. Якимов М.Р. Математическое моделирование распределения транспортного спроса в транспортной системе города // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 10. – С. 7–13.
140. Якимов М.Р. Разработка системы мониторинга выбросов автомобильного транспорта в атмосферу крупных городов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2004. – 24 с.
141. Якимов М.Р. Система прогнозирования состояния загрязнения атмосферы г. Перми выбросами автомобильного транспорта // Изв. ТулГУ – 2003. – Вып. 7. – С. 46–52.
142. Handbook Emission Factors for Road Transport version 3.1 [www.hbefa.net](http://www.hbefa.net). Методика, разработанная Федеральным управлением по окружающей среде Швейцарии (BAFU).
143. Директива 2002/49/ЕС Европейского парламента и совета от 25 июня 2002 г. относительно оценки и контроля шума окружающей среды.
144. Правила и стандарты по защите от шума на дорогах, издание 1990 года (RLS-90)
145. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения: в 2 ч. – Минск: Белорус. фонд безопасности дорожного движения, 1996. – Ч. 2. – 326 с.
146. Врубель Ю.А., Капский Ю.А., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении: монография. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
147. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
148. Жданов В.Л. Метод оценки техногенной опасности транспортных потоков на улично-дорожной сети города. – М., 2008.
149. Воронин А.А., Мишин С.П. Оптимальные иерархические структуры. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 210 с.
150. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.: УРСС, 2005.
151. Новиков Д.А. Институциональное управление организационными системами. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 68 с.
152. Новиков Д.А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем. – М.: Фонд «Проблемы управления», 1999. – 150 с.
153. Новиков Д.А., Цветков А.В. Механизмы стимулирования в многоэлементных организационных системах. – М.: Апостроф, 2000. – 184 с.
154. Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексивные игры. – М.: Синтег, 2003. – 160 с.
155. Вагнер Г. Основы исследования операций: в 3 т. – М.: Мир, 1972. – Т. 1. – 335 с. – Т. 2. – 488 с. – Т. 3. – 501 с.
156. Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами. – М.: Синтег, 2002. – 148 с.
157. Караваев А.П. Модели и методы управления составом активных систем. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 151 с.
158. Новиков Д.А. Стимулирование в организационных системах. – М.: Синтег, 2003. – 312 с.
159. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. – М.: МПСИ, 2005. – 584 с.
160. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 102 с.

161. Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации: Федер. закон от 6 октября 2003 г. № 131-ФЗ.

162. О безопасности дорожного движения: Федер. закон от 10 декабря 1995 г. № 196-ФЗ.

163. Организация дорожного движения в городах: метод. пособие / Ю.Д. Шелков, Б.А. Ткаченко [и др.] / под общ. ред. Ю.Д. Шелкова. – М.: Транспорт, 1995.

164. О Правилах дорожного движения: Постановление Правительства Рос. Федерации от 23 октября 1993 г. № 1090.

165. О защите прав потребителей: Закон Российской Федерации (с изм. на 23 нояб. 2009 г.)

166. О лицензировании отдельных видов деятельности: Федер. закон от 4 мая 2011 г. № 99-ФЗ.

167. Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта: Федер. закон от 8 ноября 2007 г. № 259-ФЗ.

168. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30 декабря 2001 г. № 195-ФЗ.

169. Уголовный кодекс Российской Федерации от 13 июня 1996 г. № 63-ФЗ.

*Научное издание*

**Юрий Васильевич Трофименко  
Михаил Ростиславович Якимов**

ТРАНСПОРТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ:  
формирование эффективных транспортных систем  
крупных городов

*Монография*

Редактор *С.А. Ардашева*  
Корректор *Ю.В. Халфина*  
Компьютерная верстка *Ю.В. Халфиной*  
Оформление *А.В. Ероховой*

Подписано в печать 10.01.2013. Формат 60×90/16.  
Печать офсетная. Печ. л. 28.  
Тираж 300 экз. Заказ №

Издательство «Логос»  
111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 55, корп. 31

Отпечатано с готового оригинал-макета