**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ**
**РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный**
**технический университет**

**Кафедра «Транспортные системы и технологии»**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**
**РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**Институт проблем региональной экономики**
**Российской академии наук**

***Д. В. Капский***
***Л.А. Лосин***

# *ТРАНСПОРТ В ПЛАНИРОВКЕ ГОРОДОВ:*

## *Транспортное планирование: математическое моделирование*

**Учебно-методическое пособие**

**Минск**
**БНТУ**
**2020**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Транспортные системы и технологии»
**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Институт проблем региональной экономики Российской академии наук**

**Д. В. Капский**

**Л.А. Лосин**

# *ТРАНСПОРТ В ПЛАНИРОВКЕ ГОРОДОВ:*

## *Транспортное планирование: математическое моделирование*

Пособие
для студентов специальности
1-44 01 02 «Организация дорожного движения»

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области транспорта и транспортной деятельности*

**Минск**
**БНТУ**
**2020**

УДК 711.7(075.8)
ББК 85.118я7
К20

Рецензенты:
кафедра градостроительства ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет»,
канд. техн. наук, доцент Е.Е. Шестеров;
кафедра «Строительство дорог транспортного комплекса» ФГБОУ «ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I»,
заведующий кафедрой, канд. техн. наук, доцент А.Ф. Колос;
главный специалист УП «Минскградо» Ф. Г. Глик

К20

Утверждено к печати Ученым советом ИПРЭ РАН Протокол №7 от 4 июня 2019 года.

**Капский, Д. В., Лосин Л.А.**
Транспорт в планировке городов. транспортное планирование : математическое моделирование / пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения» / Д. В. Капский, Л.А.Лосин . – Минск : БНТУ, 2019. – 144 с.
ISBN 978-985-550-650-9.

Пособие рассматривает вопросы применения математических методов для решения задач транспортного планирования городов. Пособие будет полезно для студентов транспортных, градостроительных и дорожных учреждений высшего образования.

**УДК 711.7(075.8)**

**ББК 85.118я7**

**ISBN 978-985-550-650-9**

© Капский Д. В., Лосин Л.А., 2019
© Белорусский национальный технический университет, 2019
© Институт проблем региональной экономики РАН, 2019

## *ВВЕДЕНИЕ*

Непрерывный рост автомобильного парка страны, неудовлетворительное состояние дорожной сети, а также существенные недостатки в организации движения и обеспечении профессионального уровня и дисциплины водителей и пешеходов служат основными причинами дорожно-транспортных происшествий.

Качество планировочных решений, реализованных в населенных пунктах, в большой степени определяет безопасность дорожного движения в целом.

Дисциплина «Транспорт в планировке городов» является одной из профилирующих для специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения». Она базируется на знании общенаучных и специальных дисциплин, в частности дисциплины «Автомобильные дороги. Дорожные условия и безопасность движения».

Цель преподавания дисциплины – формирование у студента знаний и навыков принятия решений в области городских транспортных систем, изучение принципов формирования улично-дорожной сети города и особенностей проектирования городских улиц, а также формирование четкого представления о роли планировки городских поселений и вариантах планировочных решений, путях повышения удобства и безопасности движения транспорта и пешеходов (пассажиров) за счет совершенствования планировочных решений.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен:

знать:

– классификацию городских поселений (и основные планировочные каркасы, их составляющие), городских улиц и проездов, их элементов, а также пешеходных путей;

– особенности проектирования транспортной сети городов, расположенных вдоль водных бассейнов и в других специфических условиях;

– этапы разработки проектной документации по разделу «Генплан и транспорт»;

уметь:

– определять транспортную подвижность населения, транспортную и пешеходную доступность объектов тяготения;

– определять перспективные направления транспортного развития городов и населенных пунктов, организовывать эксплуатацию транспортных сооружений, объектов и систем;

– принимать участие в разработке градостроительных решений и составлять комплексные схемы транспортного развития городов;

– проектировать объекты транспортного назначения, стоянки транспорта, линии трамвая и троллейбуса;

– проводить экспертизу документации, разрабатывать технические задания на проектируемый объект и осуществлять авторский надзор, проводить оценку решений;

– контролировать и проверять состояние транспортных объектов на соответствие эксплуатационных параметров требуемым нормативам, размещение технических средств организации дорожного движения в соответствии с правилами и нормами;

владеть:

– основными методами проектирования транспортных систем городов и населенных пунктов сельского типа, а также методами транспортного математического моделирования;

– методиками исследования транспортной подвижности населения, пешеходной доступности, условий пешеходного и велосипедного движения, транспортного обслуживания различных объектов тяготения и генерации транспортных и пешеходных потоков;

– методами определения потребности в местах для парковки транспортных средств, а также методами обследования работы существующих парковок;

– методами обоснования проектных решений при реконструкции, модернизации, капитальном и текущем ремонте объектов транспортного назначения.

Авторы выражают признательность кандидату физико-математических наук Федорову Владимиру Павловичу и старшему научному сотруднику Института проблем региональной экономики РАН Булычевой Неле Васильевне за помощь в подготовке пособия.

# А. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

## А.1. Темы лекционных занятий и их содержание

### *А.1.1. Введение*

Социально-экономические условия развития городов. Классификация городов. Город как единство трех функций – труда, быта и отдыха. Особенности городского образа жизни и присущая ему мобильность населения. Транспортные проблемы городов. Роль маршрутного пассажирского транспорта в решении транспортных проблем города.

### *А.1.2. Основные принципы планировки городов*

Структура города и его функциональное зонирование. Промышленные районы, общественные центры, жилые районы, места отдыха, свободные и озелененные пространства. Их планировочные характеристики. Улично-дорожная сеть как элемент планировочной структуры города. Инновационное проектирование транспортной сети города как способ управления его развитием.

Классификация населенных пунктов, учет категории населенного пункта при проектировании дорожной сети. Классификация городских улиц и проездов. Типовые планировочные схемы уличной сети города: их достоинства и недостатки. Планировочный каркас и планировочная структура населенного пункта: понятие. Основные структурно-планировочные элементы жилых территорий.

Планировочные схемы уличной сети города. Влияние на планировочное решение природных условий, существующих транспортных узлов, исторически сложившихся частей города, размещения промышленных и жилых районов. Особенности транспортной сети городов, расположенных вдоль водных бассейнов и в других специфических условиях.

Уличная сеть старых городов как следствие их стихийного развития. Принципы рациональной планировки уличных сетей в городах-новостройках. Основные требования современного городского движения к дорогам уличной сети городов.

Методы сдерживания скорости и методы управления доступом на УДС.

Задачи экологической защиты городов. Роль планировочных мероприятий и зеленых насаждений в охране чистоты воздушного бассейна города. Методы снижения транспортного шума. Планировочные мероприятия.

Классификация городских улиц и дорог. Городские скоростные дороги, магистральные улицы общегородского и районного значения, улицы промышленных районов и дороги местного значения, улицы – набережные, парковые дороги, улицы грузового движения. Пересечения улиц. Площади.

Транспортные развязки. Нормативы и проектирование элементов городских улиц. Понятие о подземном хозяйстве города и его увязка с улично-дорожной сетью.

### *А.1.3. Закономерности формирования транспортных и пешеходных потоков на улично-дорожной сети города*

Транспортная подвижность населения. Понятие о транзитных, внутригородских и местных транспортных потоках. Методы расчета ожидаемой интенсивности движения по сезонам года, по дням недели, по часам суток. Структура городских транспортных потоков. Транспортные потоки высокой плотности. Пропускная способность полосы движения, улицы, системы улиц. Методы расчета. Характеристика передвижения городского населения и распределение между различными видами транспорта. Грузовые автомобильные перевозки в городах.

Приспособление уличной сети города для транспортного обслуживания. Принципы прогнозирования интенсивности городского движения. Расчет пробега автомобиля. Расчет пропускной способности улично-дорожной сети города.

Методы математического моделирования в транспортном планировании. Применение математического моделирования для решения транспортно-градостроительных задач. Принципы построения транспортной модели и ее информационно-аналитическое обеспечение. Методика математического моделирования в градостроительстве и транспортном планировании: цели, задачи, оценка вариантов, обработка и интерпретация результатов моделирования.

Технико-экономические обоснования начертания улично-дорожной сети в городах. Размеры транспортных потерь при перевозках по уличной сети. Оценка мероприятий по повышению безопасности движения. Реконструкция улично-дорожной сети города. Методы обоснования реконструкции улицы. Оценка пропускной и провозной способности улицы. Оценка безопасности движения. Приведенные затраты. Транспортная составляющая приведенных затрат. Затраты на реконструкцию и развитие уличной сети. Аудит безопасности. Методы «сдерживания» скорости движения транспортных потоков.

### *А.1.4. Сооружения по обслуживанию городского транспорта*

Основные принципы размещения в городах транспортных предприятий, автовокзалов, станций технического обслуживания, АЗС. Транспортная доступность территории города. Уличные стоянки и парковки. Способы постановки транспортных средств на парковку и параметры машино-места. Методы обследования и основные требования при проектировании стоянок и парковок. Организация

и планировочные характеристики уличных и внеуличных стоянок. Организация стоянок в городах. Автомобильные стоянки в деловой, торговой, промышленной частях города. Стоянки у административных и культурных центров города. Стоянки у спортивных сооружений. Расчет потребной емкости стоянок. Инженерное оборудование стоянок. Расчет потребных площадей. Стоянки для длительного хранения автомобилей. Гаражи и стоянки. Паркинги. Планировка площадей перед гаражами. Перспективные предложения по удовлетворению спроса на стояночные места.

### *А.1.5. Проектирование элементов улично-дорожной сети города*

Расчет геометрических элементов плана, продольного и поперечного профиля улиц с учетом требований пассажирского транспорта. Методы обоснования размеров элементов поперечного профиля улиц. Городские грузовые дороги. Выбор трассы и расчет элементов продольного и поперечного профиля грузовых дорог. Планировка пересечений на грузовых городских дорогах. Пересечения (перекрестки) в одном уровне. Островки безопасности. Обеспечение безостановочного движения транзитных потоков с помощью планировочных решений. Схемы организации движения на пересечениях городских улиц. Пропускная способность нерегулируемых пересечений. Методы оценки безопасности движения. Канализированное движение. Реконструкция и модернизация перекрестков. Планировочные решения. Типы транспортных развязок в разных уровнях. Сложность узловых пунктов на дорогах, методы ее оценки и способы снижения. Типовые принципы планировки транспортных узлов в одном уровне. Элементы поперечного профиля городской улицы, их характеристики.

Кольцевые развязки в городах. Кольцевые пересечения в одном уровне: виды и основные требования при проектировании. Виды и типы кольцевых перекрестков. Преимущества кольцевых перекрестков. Применение кольцевых перекрестков различных типов и видов на УДС городов и населенных пунктов. Расчет элементов планировки развязки. Расчет пропускной способности кольцевых развязок. Оценка транспортных потерь, методы их сокращения. Планировочные мероприятия по организации движения пассажирского транспорта пешеходного движения.

Городские транспортные развязки. Классификация транспортных развязок. Неполные городские транспортные развязки. Пропускная способность съездов неполных транспортных развязок. Полные транспортные развязки. Схемы развязок. Особенности проектирования развязок в городах, в условиях сложившейся застройки, при реконструкции уличной сети. Расчет элементов плана, продольного профиля городской полной развязки. Оценка безопасности движения. Расчет транспортной составляющей приведенных затрат. Инженерное оборудование городских транспортных развязок.

Обеспечение движения городского пассажирского транспорта. Обеспечение пешеходного движения.

Размещение и основные планировочные характеристики остановочных пунктов маршрутных транспортных средств. Размещение остановочных пунктов безрельсовых и рельсовых МПТ. Заездные карманы.

Размещение и планировка контактной сети троллейбусов и трам-ваев. Размещение трамвайного полотна.

Пешеходное движение в городах. Особенности пешеходного движения в городах. Закономерности пешеходного движения. Интенсивность пешеходного движения, методы расчета. Скорость пешеходных потоков. Пропускная способность путей движения пешеходных потоков. Тротуары: расчет их ширины, выбор и обоснование продольных и поперечных уклонов, радиусов закругления. Пешеходные пути и пешеходные переходы. Требования по размещению пешеходных переходов на улицах населенных пунктов. Закономерности формирования пешеходных потоков в населенных пунктах. Уличные пешеходные переходы, их планировка. Расчет пропускной способности. Внеуличные пешеходные переходы. Расчет и выбор параметров лестничных сходов, пандусов, ширины тоннеля. Схемы пешеходных переходов. Оценка безопасности движения. Инженерные мероприятия по повышению безопасности движения. Городские скоростные дороги. Поперечные профили. Расчет элементов плана и продольного профиля скоростных дорог.

Мероприятия по обеспечению высокой скорости движения. Пропускная способность скоростных дорог. Местное движение на скоростных дорогах, движение пассажирского транспорта. Особенности трассирования скоростных дорог в городах. Пересечения с магистральными улицами. Транспортные развязки на скоростных городских дорогах. Глубокий ввод в город. Кольцевые магистрали.

Видимость на дорогах и улицах и способы ее улучшения. Треугольник боковой видимости: виды, параметры, прозрачность. Организация дорожного движения в зоне железнодорожных переездов.

Применение искусственных неровностей и иных мер физического сдерживания скорости движения транспортных средств. Основные мероприятия градостроительного характера для охраны окружающей среды от транспортного воздействия. Классификация требований к эксплуатационному состоянию автомобильных дорог и улиц.

Уличное освещение. Основные требования к размещению опор освещения. Нормированная освещенность.

### *А.1.6. Вертикальная планировка городских улиц*

Методы вертикальной планировки. Исходные данные для вертикальной планировки. Метод проектных горизонталей. Обеспечение поверхностного водоотвода. Вертикальная планировка улиц с малыми продольными уклонами. Вертикальная планировка магистральных улиц, транспортных

развязок. Вертикальная планировка площадей. Подсчет объема земляных работ. Картограмма земляных работ, правила ее построения.

### *А.1.7. Состав и содержание транспортных разделов проектных документов*

Основные стадии градостроительного проектирования – генеральный план города, комплексная транспортная схема, проекты детальной планировки, рабочие чертежи. Цели и задачи проектирования транспортных систем города на каждой стадии проектирования. Решения задач организации дорожного движения на разных стадиях проектирования.

## А.2. Примерный перечень тем лабораторно-практических занятий

1. Функциональное зонирование городской территории.
2. Оценка улично-дорожной сети городского района с классификацией улиц.
3. Анализ схемы планировки магистральных улиц в городе.
4. Экспериментальные исследования транспортных и пешеходных потоков.
5. Определение перспективной интенсивности движения транспорта в городе.
6. Обследование обеспеченности городского района стоянками транспорта.
7. Оценка внутриквартальной транспортной планировки.
8. Оценка условий видимости на конфликтном объекте.
9. Оценка условий работы остановочного пункта маршрутного пассажирского транспорта.
10. Формирование графа улично-дорожной сети и городского общественного транспорта и системы транспортного районирования территории.
11. Оценка и прогнозирование численности населения и количества рабочих мест города (агломерации). Формирование исходного информационного массива транспортной модели.
12. Расчет параметров генерации поездок с учетом подвижности населения, структуры городских передвижений, суточной неравномерности).
13. Расчет матрицы межрайонных корреспонденций методом балансировки (без применения модели).
14. Моделирование матрицы межрайонных корреспонденций на основе энтропийной модели.
15. Моделирование выбора способа передвижения.
16. Моделирование потокораспределения на улично-дорожной сети и в сети городского общественного транспорта.
17. Определение параметров объектов транспортной инфраструктуры на основе анализа спроса на передвижения.

## 1.3. Примерный перечень вопросов к Государственному экзамену

1. Классификации путей сообщения дорожного транспорта в Республике Беларусь.
2. Классификация требований к эксплуатационному состоянию автомобильных дорог и улиц.
3. Искусственные сооружения на автодорожных путях сообщения.
4. Типовые поперечные профили автомобильных дорог.
5. План трассы автомобильной дороги, основные элементы и характеристики.
6. Видимость на автомобильных дорогах и улицах и способы ее улучшения.
7. Продольный профиль автодорожных путей сообщения, основные элементы и способы проектирования.
8. Дорожные одежды, их классификация, виды покрытий.
9. Транспортно-эксплуатационные показатели дорожных одежд и покрытий.
10. Показатели транспортной работы автодорожных путей сообщения.
11. Влияние геометрических характеристик автодорожных путей сообщения на безопасность движения.
12. Транспортные развязки в разных уровнях.
13. Сложность транспортных узлов, методы ее оценки и способы снижения.
14. Пересечения автомобильных дорог и городских улиц с коммуникациями.
15. Элементы поперечного профиля городской улицы, их характеристики.
16. Кольцевые пересечения в одном уровне: виды и основные требования при проектировании.
17. Пересечения автомобильных дорог и городских улиц с железными дорогами
18. Основные принципы вертикальной планировки автомобильных дорог и улиц.
19. Освещение автомобильных дорог и улиц. Основные требования к размещению опор освещения. Нормированная освещенность.
20. Архитектурный проект. Строительный проект. Строительный проект с утверждаемой архитектурной частью.
21. Психологические принципы устройства дорожной инфраструктуры.
22. Классификация населенных пунктов, учет категории населенного пункта при проектировании дорожной сети.
23. Классификация городских улиц и проездов.
24. Функциональное зонирование городских территорий.
25. Типовые планировочные схемы уличной сети города: их достоинства и недостатки.
26. Планировочный каркас и планировочная структура населенного пункта: понятия. Основные структурно-планировочные элементы жилых территорий.

27.Пешеходные пути и пешеходные переходы. Требования по размещению пешеходных переходов на улицах населенных пунктов.

28.Основные мероприятия градостроительного характера для охраны окружающей среды от транспортного воздействия.

29.Правила размещения СТО и АЗС в населенных пунктах.

30.Требования к путям сообщений для организации автобус-ного движения.

31.Требования к путям сообщений для организации движения электротранспорта.

32.Классификация узловых пунктов автодорожных путей сообщения, типы узлов в одном уровне. Типовые принципы планировки транспортных узлов в одном уровне.

33.Треугольник боковой видимости: виды, параметры, прозрачность.

34.Остановочные пункты нерельсовых транспортных средств: характеристики и правила размещения.

35.Остановочные пункты рельсовых транспортных средств: характеристики и правила размещения.

36.Уличные стоянки и парковки. Способы постановки транспортных средств на парковку и параметры машино-места.

37.Методы обследования стоянок и парковок, основные требования при их проектировании. Нормативные требования для определения числа парковочных мест.

38.Организация и планировочные характеристики внеуличных стояночных площадок. Многоуровневые стоянки (паркинги), преимущества и недостатки.

39.«Перехватывающие» стоянки: назначение, общие принципы размещения, планировки, организации работы.

40.Велосипедные дорожки, полосы, велопарковки.

# ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**«Внешний» транспортный район («кордон») –** фиктивный транспортный район, расположенный на границе области моделирования.

**Геоинформационная система** – аппаратно-программный человеко-машинный комплекс, обеспечивающий сбор, обработку, отображение и распространение пространственно-координатных данных, интеграцию информации и знаний о территории для их эффективного использования при решении научных и прикладных задач, связанных с инвентаризацией, анализом, моделированием, прогнозированием, управлением окружающей средой и территориальной организацией общества.

**Городская агломерация** – обладающая отчетливыми признаками территориальной и функциональной целостности, относительно компактная в пространственном отношении совокупность, группа городских и сельских населенных пунктов (поселений) с прилегающими к ним межселенными территориями, объединенных в сравнительно обширную и сложную территориальную систему с многообразными, достаточно устойчивыми и интенсивными взаимосвязями.

**Дуга** – элемент транспортного графа, представляющий участок автомобильной дороги, линии внеуличного транспорта, водного пути и т.д.

**Калибровка модели** – настройка различных параметров модели с целью минимизировать расхождение данных обследований и результатов моделирования.

**Корреспонденции –** устойчивые транспортные связи между двумя пунктами, для которых характерны встречное и (или) возвратное передвижения.

**Матрица корреспонденций –** матрица, элементами которой являются значения количества передвижений между каждой парой транспортных районов.

**Передвижение –** перемещение людей от пункта отправления до пункта назначения.

**Районирование** – процесс таксонирования, при котором идентифицируемые таксоны должны отвечать по меньшей мере двум критериям: критерию специфики данного таксона и критерию единства, целостности районируемых (идентифицируемых) элементов.

**Точность модели –** величина отклонения значений выходных данных модели от реально измеренных значений этих параметров.

**Транспортное районирование –** способ агрегирования индивидуальных потребностей пользователей при использовании транспортной сети в некую общность по определенным параметрам для целей моделирования.

**Транспортный спрос –** количественно определенные потребности в перевозках и дополнительных транспортных услугах.

**Целевая подвижность населения** – показатель, характеризующий среднюю частоту целевых передвижений населения города в течение года.

**Целевое передвижение** – последовательная совокупность элементарных передвижений, осуществляемая человеком для достижения отдельных, достаточно масштабных, значимых целей, определяющих укрупненную структуру его суточного цикла жизнедеятельности.

**Элементарная подвижность населения** – показатель, характеризующий среднюю частоту элементарных передвижений населения города в течение года.

**Элементарное передвижение** – отдельный, «качественно однородный», неделимый акт физического перемещения человека в городском пространстве (за пределами зданий, сооружений) пешком или с использованием транспортного средства конкретного вида транспорта и определенного маршрута

**Центроид (характеристический центр)** – условный центр транспортного района.

# 1. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ

## 1.1. Сфера практического применения методов математического моделирования

Интерес к использованию математического моделирования в сфере градостроительства и транспортного планирования связан в значительной степени с тем, что крупные мероприятия по развитию городской инфраструктуры, как правило, ориентированы на долгосрочную перспективу и имеют практически необратимые последствия. Невозможность проведения предварительных натурных экспериментов требует осуществления на подготовительных этапах планирования таких мероприятий максимально глубокой и всеобъемлющей проработки, затрагивающей не только технические, но также экономические, социальные и прочие аспекты.

Возможности транспортной системы являются наиболее важными и ценными характеристиками городской среды. Транспорт связывает объекты функциональных систем города и тем самым обеспечивает населению доступ к местам приложения труда, объектам культурно-бытового обслуживания и возможность выбора наиболее удобных из них, т.е. организует взаимодействие этих систем. Такие факторы как доступность центра города, доступность мест приложения труда и объектов культурно-бытового обслуживания, объем пассажирооборота, с которыми связана значительная часть дохода предпринимателей, определяются возможностями транспортной системы. Поэтому рассматриваемые нами транспортно-градостроительные модели являются не только инструментом совершенствования транспортной системы, но и одним из основных звеньев в решении еще более крупных проблем, лежащих в сфере экономики недвижимости и связанных с эффективным развитием городских территорий. Так, например, методы моделирования находят свое применение при проведении массовой оценки городской территории и объектов недвижимости, а также при разработке генеральных и комплексных схем размещения объектов различных городских систем.

Интенсивный рост уровня автомобилизации населения, увеличение количества деловых поездок, использование легкового транспорта при небольших объемах грузоперевозок, появление «коммерческих» маршрутов привели в последние годы к резкому увеличению автомобильных потоков в городских транспортных системах, что вызвало существенные перегрузки транспортных сетей, особенно в центральных частях городов. В связи с этим возникает целый спектр задач, связанных с распределением нагрузки между видами транспорта, выбором маршрутов, взаимодействием различных видов транспорта, влиянием стоимости проезда на объемы перевозок. Эффективное решение этих задач напрямую связано с использованием математических методов в транспортно-градостроительном проектировании.

Нужно отметить, что практически все используемые в проектной практике модели предназначены для анализа вариантов территориального развития и размещения объектов транспортной системы и очень редко в них затрагивается проблема синтеза. Это связано с тем, что городская транспортная система при всей ее относительной автономности является очень сложным объектом, развитие которого определяется множеством критериев и ограничений самого разнообразного и зачастую плохо формализуемого характера. Поэтому одним из реальных путей решения проблемы синтеза является организация процесса целенаправленного выбора рационального варианта транспортной системы с использованием опыта эксперта-градостроителя, формирующего эти варианты для отбора.

## 1.2. Математические модели в современной практике транспортного планирования

### *1.2.1. Уровни математического моделирования. Точность моделирования*

Моделирование транспортных потоков проводится на различных уровнях рассмотрения. Как правило, выделяется три уровня: макро-, мезо- и микроуровень (табл.1.1).

Таблица 1.1 – Уровни математического моделирования

| Уровень моделирования | Сфера применения |
|---|---|
| Макроуровень | схемы территориального планирования государств и регионов<br>проекты развития дорожной сети<br>стратегии грузо- и пассажироперевозок |
| Мезоуровень | генеральные планы городов<br>комплексные транспортные схемы<br>программы развития транспортной инфраструктуры<br>комплексные схемы организации движения<br>отраслевые и генеральные схемы<br>проекты планировки территории (уровень крупных планировочных образований)<br>проекты комплексной оценки территории |

| Уровень моделирования | Сфера применения |
|---|---|
| Микроуровень | архитектурно-строительное проектирование<br>проекты планировки территории (уровень квартала)<br>схемы организации движения на перекрестках<br>оперативное управление локальными транспортными системами<br>генеральные планы городов и комплексные транспортные схемы (как вспомогательный инструмент) |

Макроуровень предполагает изучение транспортных потоков в масштабе крупных территориальных единиц: макрорегионов и государств. На мезоуровне (градостроительном уровне) осуществляется моделирование замкнутой системы передвижений в масштабе города (городской агломерации). Такой подход обеспечивает принятие градостроительных и транспортных решений на уровне формирования общего каркаса транспортной сети. Результаты моделирования используются также для получения необходимого набора характеристик территории, например, показателей транспортной доступности.

Микроуровень предполагает моделирование «поведения» отдельных участников движения – пешеходов или транспортных средств – и используется для изучения передвижений на локальных территориях, таких как перекрестки или зоны обслуживания объектов. Сложность в использовании моделирования на микроуровне заключается в необходимости задания во входном потоке матрицы корреспонденций участников движения, расчет которого может оказаться достаточно трудоемкой задачей. Для создания моделей передвижения на микроуровне используются, как правило инструментарий имитационного моделирования. Как и любое компьютерное моделирование, оно дает возможность проводить вычислительные эксперименты с еще только проектируемыми системами и изучать системы, натурные эксперименты с которыми из-за соображений безопасности или дороговизны нецелесообразны. В то же время благодаря своей близости по форме к физическому моделированию этот метод исследования доступен более широкому кругу специалистов. В этих моделях:

- декомпозиция системы на компоненты производится с учетом структуры проектируемого или изучаемого объекта;
- в качестве законов поведения могут использоваться экспериментальные данные, полученные в результате натурных экспериментов;
- поведение системы во времени иллюстрируется заданными динамическими образами [11].

В настоящем учебном пособии будут рассмотрены только вопросы моделирования на мезоуровне (градостроительном уровне) как основном, применяющемся при разработке транспортных разделов генеральных планов городов и основных документов транспортного планирования городов и агломераций.

Наиболее эффективно моделирование может использоваться при разработке генеральных планов, комплексных транспортных схем (КТС), программ комплексного развития транспортной инфраструктуры (ПКРТИ) крупных и крупнейших городов, особенно имеющих сложную планировочную структуру. Для больших, средних и малых городов необходимость в использовании численных методов должна определяться в каждом конкретном случае исходя из особенностей планировочной структуры, положения города в системе расселения и системе транспортных связей. Методики транспортных расчетов, выполняемых для генеральных планов и документов транспортного планирования, таких как КТС и ПКРТИ, как правило, отличаются по своей детализации, несмотря на распространенную практику однотипного подхода к моделированию в рамках этих двух видов документации [27]. На уровне генерального плана зачастую достаточно ограничиться анализом укрупненной матрицы межрайонных корреспонденций. Как пишут известные специалисты в области урбанистики А.Э.Гутнов и В.Л.Глазычев, «использование очень сложных математических моделей неэффективно – слишком велики при этом затраты времени и средств на подготовительные работы, так что традиционное проектирование при всех своих слабостях оказывалось в выигрышном положении. Напротив, относительно простые имитационные или оценочные модели, и, прежде всего транспортной доступности территорий, интенсивности их использования в жизни города, стали реальным и весьма эффективным, но вспомогательным средством при сопоставлении вариантов, формируемых более или менее традиционно» [12].

Особо важным при выборе модели является вопрос точности математического моделирования. Как следует из приведенной выше цитаты, достижение высокого уровня точности в сравнении с натурными значениями не всегда соответствует задачам конкретного проекта. Это связано, в первую очередь, с тем, что сами значения транспортных и пассажирских потоков в городах подвержены флуктуациям в достаточно широких пределах. Разброс значений потоков, измеренных в одни и те же часы, помимо достаточно изученных цикличных изменений по месяцам года и дням недели, может быть обусловлен ситуацией на локальных участках сети (аварии и т.д.), погодными условиями, сбоями в графике работы общественного пассажирского транспорта и другими причинами. Поэтому результаты обследования помимо погрешности собственно процедуры натурного обследования изначально несут в себе информацию, достоверность которой условна. Кроме того, по некоторым оценкам [33], теоретическая точность прогноза «равновесных» моделей по отдельным дугам составляет около 20%.

### *1.2.2. Нормативно-методическая база*

Нормативные документы в сфере градостроительства и транспортного планирования в России, как правило, не обязывают проектировщика применять методы математического моделирования. Использование моделей обеспечивает научное обоснование предлагаемым проектным решениям, а необходимость в нем определяется сложившейся культурой проектирования.

В то же время в последние годы по мере распространения методик и программных продуктов, ориентированных на решение транспортно-градостроительных задач методами моделирования, стали появляться нормативно-методические документы, содержащие рекомендации по использованию моделей при решении различных задач. Ниже приведены некоторые из этих методических документов:

1. СТО АВТОДОР 2.2-2013. Рекомендации по прогнозированию интенсивности дорожного движения на платных участках автомобильных дорог Государственной компании «Автодор» и доходов от их эксплуатации.
2. ОДМ 218.2.072-2016. Методические рекомендации по оценке пропускной способности и уровней загрузки автомобильных дорог методом компьютерного моделирования транспортных потоков.
3. ОДМ 218.2.073-2016. Методические рекомендации по оценке пропускной способности пересечений и примыканий автомобильных дорог в одном уровне для оптимизации их работы с использованием методов компьютерного моделирования.
4. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Использование программных продуктов математического моделирования транспортных потоков при оценке эффективности проектных решений в сфере организации дорожного движения. Москва, 2017.

### *1.2.3. Развитие методов математического моделирования*

Основы математического моделирования закономерностей дорожного движения были заложены еще в 1912 году русским ученым, профессором Г.Д.Дубелиром. Первые разработки, связанные с проблемами функционально-пространственного развития городов, были выполнены в 1960-х годах и посвящены применению математических методов для моделирования процессов транспортно-градостроительного развития.

В 1960-70-е годы достижения в области математического программирования в сочетании с ростом возможностей вычислительной техники создали благоприятные условия для широкого использования математических методов в различных областях социально-экономических исследований. Одним из первых шагов в сфере градостроительного проектирования явилось создание модели транспортной системы. В тот период впервые в ленинградской градостроительной практике при разработке

Генерального плана был проведен расчет матрицы межрайонных корреспонденций. Результаты моделирования были использованы для схем организации движения и развития городского пассажирского транспорта. Расчет матрицы на перспективу позволил спрогнозировать распределение потоков при различных вариантах развития города.

Многие постановки задач, впоследствии ставшие основой компьютерных моделей, появились еще в «докомпьютерную» эпоху и применялись для решения планировочных и транспортных задач. В качестве примера модели, разработанной еще до активного внедрение в практику персональных компьютеров, приведем модель оптимизации транспортных коммуникаций, которая применялась при разработке транспортных разделов генеральных планов городов в прошлом веке (рис.1.1).

Суть метода автор формулирует так: «Считая, что каждая элементарная корреспонденция с наибольшим эффектом в смысле непрямолинейности стремится прийти по кратчайшему направлению по воздушной прямой между объектами отправления и прибытия, можно попытаться отыскать транспортную сеть такой ориентации и плотности, которая обеспечила бы прямолинейное движение для основной массы корреспондирующих. Для этого в каждой ячейке регулярной сетки в плане города определяется неискаженный спектр корреспонденции по восьми направлениям. Скалярная величина транспортной работы в узлах этой сетки служит основанием для назначения плотности сети, а векторное разложение работы определяет рекомендуемую ориентацию магистралей».

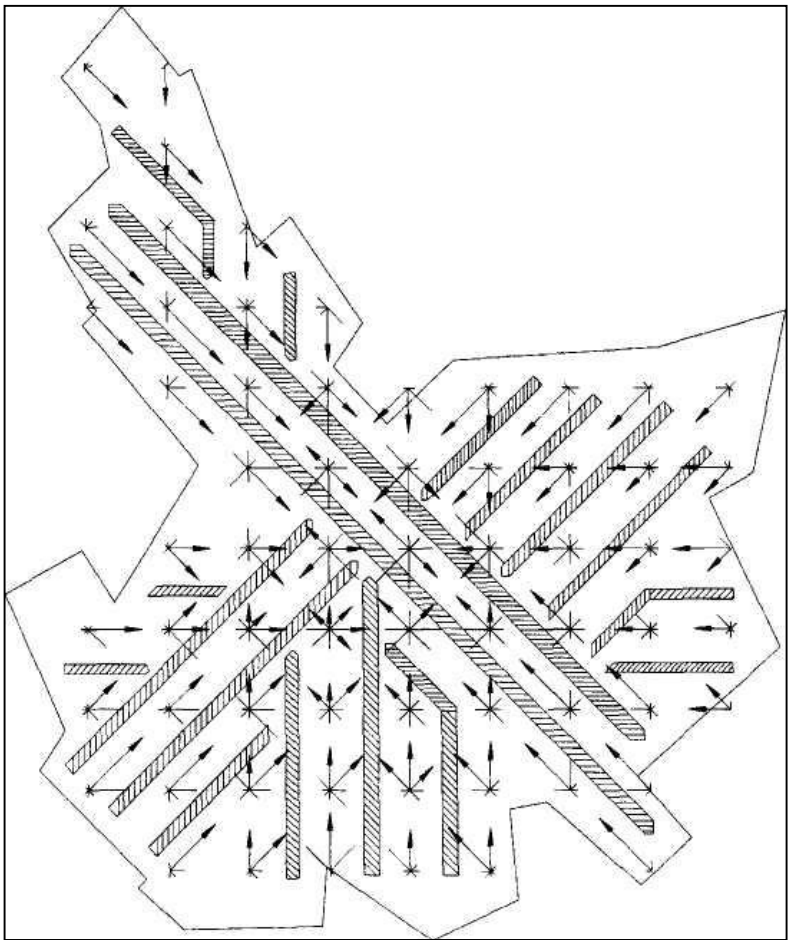


Рисунок 1.1 – Модель оптимизации
транспортных коммуникаций города (по [28])

Задача решается в следующей последовательности. На точечную планограмму распределения населения города накладывается регулярная сетка, в узлах которой строятся координатные оси по восьми направлениям. В пределах каждого из восьми образовавшихся секторов подсчитывается количество населения и полученный результат в принятом масштабе откладывается по оси соответствующего сектора. В результате получается векторная диаграмма тяготения, на которой скалярная величина (длина вектора) определяет интенсивность тяготения в исследуемом узле, а направление вектора – ориентацию этого тяготения.

Полученные в результате построения векторные диаграммы для всех узлов сетки в комплексе показывают основные направления трассировки магистралей и интенсивность потока в каждом узле. Кроме распределения населения в каждом узле могут приниматься в качестве исходных данных основные фокусы транспортного тяготения города – места приложения труда, центры культурно-бытового обслуживания и др. Для решения необходимо знать интенсивность притягиваемых ими потоков, которые фиксируются на плане в виде точечной планограммы [28].

В зарубежной практике прослеживаются те же этапы развития методов транспортно-градостроительного моделирования. Основой большинства

современных моделей признается так называемая четырехэтапная схема моделирования (Four-Step-Model, FSM), которая как подход первоначально появилась в 1950-х годах в рамках исследования транспортной системы Детройта (1953) и транспортной системы региона Чикаго (1955).

В настоящее время в практике транспортно-градостроительного проектирования используется значительное количество программных продуктов, ориентированных на расчет матрицы межрайонных корреспонденций и потоков в сети автомобильного и городского общественного транспорта. В соответствии со спецификой решаемых задач программные средства могут отличаться подходами к построению алгоритмов расчета. Организация пользовательского интерфейса таких программ, как правило, связана с возможностями геоинформационных систем (ГИС), на базе которых производится ввод, обработка и отображение графической информации.

В России такие программы, в основном, разрабатываются в рамках научных исследований или по заказу проектных организаций, поэтому круг пользователей каждого программного продукта ограничен. В то же время, в последние годы на рынке стали появляться программные пакеты зарубежных производителей, реализующие задачи транспортного моделирования и ориентированные на широкий круг пользователей – проектировщиков-градостроителей, сотрудников эксплуатационных организаций и строительных компаний. Следует отметить такие программные комплексы как Aimsun, Emme. Но наибольшую известность в России приобрел программный комплекс PTV Vision® (Германия), который объединяет в себе полный пакет программного обеспечения для планирования, анализа и организации транспортного движения. Для расчета матрицы межрайонных корреспонденций и моделирования потоков на градостроительном уровне (мезоуровне) предназначен программный модуль PTV Vision® VISUM, являющийся составной частью программного комплекса PTV Vision®.

Специалистами российских проектных организаций используются различные программные средства транспортного моделирования. Одним из наиболее известных программных комплексов является информационно-программный комплекс Citraf, разработанный коллективом ленинградских-петербургских разработчиков (руководитель группы разработчиков – кандидат физико-математических наук Владимир Павлович Федоров). Этот комплекс применяется при решении научно-исследовательских и проектных задач, в число которых входят задачи диагностики и прогнозирования спроса на передвижения в городах и интенсивности потокораспределения по транспортной сети. На базе этого комплекса реализовано большое количество разработок в сфере градостроительства, транспортного планирования и территориального анализа. В частности, следует отметить действующий Генеральный план Санкт-Петербурга, в рамках разработки которого обоснование решений в сфере развития транспортной инфраструктуры и функционального зонирования территории производилось с помощью этого

информационно-программного комплекса. Комплекс состоит из следующих модулей [17] (рис.1.2):

- модуль, реализующий сетевой расчет матрицы межрайонных корреспонденций и потокораспределения на улично-дорожной сети (УДС) и на сети городского общественного транспорта (ГОТ);
- модуль, реализующий досетевой расчет матрицы межрайонных корреспонденций;
- модуль, реализующий решение задачи синтеза сети.

Решение задачи синтеза сети на базе данного комплекса является во многом уникальным: под синтезом сети здесь понимается построение обобщенной картограммы потоков, которая может служить основой для последующего проектирования сетевых решений.

Инструменты транспортного моделирования, постоянно совершенствуясь, стали традиционным средством анализа вариантов проектов в сфере градостроительства и транспортного планирования. Практика многолетнего использования моделей, развитие информационного и алгоритмического обеспечения дали толчок к разработке целого ряда новых содержательных постановок задач, уточнению и совершенствованию разработанных ранее.

Направления совершенствования моделей в последние годы связаны с изменениями в функционировании городских транспортных систем, которые, во многом, касаются изменений в структуре передвижений в течение дня. На фоне продолжающегося бурного роста уровня автомобилизации населения наблюдается тенденция к существенной дифференциации корреспонденций не только по целям передвижений, но и по скорости передвижения, стоимости проезда, комфортности и т.д. Например, если раньше средние затраты времени на передвижения на общественном пассажирском транспорте в утренний час пик были достаточно стабильной величиной, а стоимость проезда практически не оказывала влияния на выбор пути следования, то сейчас эти параметры естественно не только учитывать, но рассматривать их зависимость от социально-экономического положения пассажира, уровня его доходов. Таким образом, становится очевидным, что необходимо использовать в практике транспортно-градостроительного планирования модели, в которых предусматривается возможность широкой дифференциации как участников движения, так и транспортных услуг.

# 2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ

## 2.1. Этапы построения модели

В общем виде схема расчета интенсивности транспортных потоков состоит из следующих этапов (четырехэтапная схема):

- генерация поездок;
- распределение поездок по транспортным районам (моделирование матрицы межрайонных корреспонденций);
- выбор способа передвижения;
- распределение поездок по сети (моделирование потокораспределения в сети).

Расчетная схема может включать в себя только часть указанных процедур. Состав операций определяется особенностями поставленной задачи и комплектностью исходной информации. Например, для укрупненной оценки корреспонденций между планировочными районами в рамках разработки генерального плана города бывает достаточно только расчета матрицы корреспонденций. В ряде случаев элементы матрицы корреспонденций могут полностью или частично выступать в качестве исходной информации; например, при наличии данных о передвижении между районами, полученных в ходе социологического опроса, или при наличии информации о транзитных грузопотоках. Три первых этапа данной схемы составляют оценку транспортного спроса.

Следует отметить, что в ряде ранее использовавшихся в проектной практике моделей расчет автомобильных и пассажирских потоков производился раздельно; при таком подходе распределение потоков по видам транспорта может включаться в процедуру подготовки исходных данных для моделирования.

Основными факторами, определяющими количество совершаемых передвижений и их распределение по транспортной сети города, являются [33]:

- потокообразующие факторы, т.е. размещение объектов, порождающих передвижения – места проживания, места приложения труда, объекты культурно-бытового обслуживания;
- характеристики транспортной сети, такие как количество и параметры улично-дорожной сети, параметры организации движения, маршруты и провозные способности городского общественного транспорта;
- поведенческие факторы, такие как мобильность населения, предпочтения при выборе способов и маршрутов передвижения.

## 2.2.Генерация поездок

### *2.2.1. Подвижность населения*

В общем виде процедура генерации поездок состоит в переходе от известных значений потокообразующих факторов (количество проживающих, количество рабочих мест и т.д.) к объемам передвижений по транспортным районам в единицу времени – как правило, в сутки или в час. Формирование массивов генерации спроса («отправлений» и «прибытий» по транспортным районам) производится с учетом ряда факторов. Единица измерения элементов массива: «человек в единицу времени» (в случае отдельного расчета интенсивности автомобильных потоков в качестве единицы измерения может быть «транспортных средств в единицу времени»).

Одним из таких основных факторов, характеризующих транспортное поведение населения, является величина подвижности населения; далее приведены определения и основные подходы к расчету и прогнозированию этого параметра.

Под элементарным передвижением будем понимать отдельный, «качественно однородный», неделимый акт физического перемещения человека в городском пространстве (за пределами зданий, сооружений) пешком или с использованием транспортного средства конкретного вида транспорта и определенного маршрута. Соответственно, элементарная подвижность населения города – это показатель, характеризующий среднюю частоту элементарных передвижений населения города в течение года. Определяется элементарная подвижность путем деления общего количества (числа) совершенных в течение года элементарных передвижений в городе на среднегодовую суммарную численность постоянного и временного населения города.

Можно разделить элементарную подвижность на составляющие по видам транспорта. Различают общую подвижность населения – среднее число всех передвижений по территории города, и транспортную подвижность населения – среднее число поездок на транспортных средствах. Единица измерения подвижности – «поездок на жителя в год».

Для осуществления нескольких последовательных элементарных передвижений одного и того же человека в один и тот же день чаще всего характерна некоторая, объединяющая их (элементарные передвижения) целевая мотивация. Отсюда можно вывести следующее определение: целевое передвижение – это последовательная совокупность элементарных передвижений, осуществляемая человеком для достижения отдельных, достаточно масштабных, значимых целей, определяющих укрупненную структуру его суточного цикла жизнедеятельности. В своем массовом, статистическом смысле целевые передвижения осуществляются для того, чтобы, например, от места жительства попасть к месту приложения труда или к месту учебы. Соответственно сказанному выше, целевая подвижность населения города – это показатель, характеризующий среднюю частоту целевых передвижений населения города в течение года. Определяется такая

подвижность путем деления общего количества (числа) совершенных в течение года целевых передвижений в городе на среднегодовую суммарную численность постоянного и временного населения города.

Как правило, совмещение поездок на индивидуальном и общественном транспорте происходит достаточно редко (хотя во многих городах наблюдается рост комбинированных передвижений), поэтому целевую подвижность можно разделить на группы по видам транспорта, включая пешие передвижения и передвижения на велосипедах. У разных видов целевой подвижности наблюдаются различные закономерности, зависящие от многих факторов (рис.2.1).

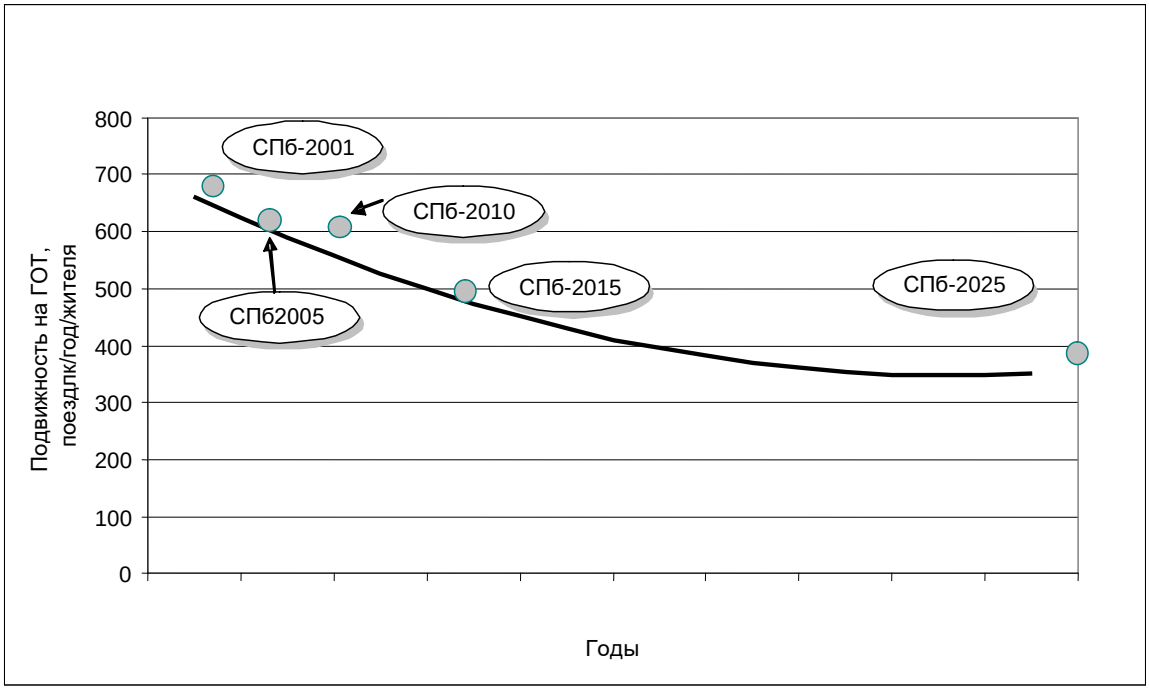



Рисунок 2.1 – Динамика подвижности населения на общественном транспорте (С.-Петербург)

Ряд проведенных исследований [19] указывают на то, что на структуру подвижности существенно влияет величина среднечасового дохода населения и плотность населения города. Величина подвижности на городском общественном транспорте увеличивается по мере возрастания плотности населения и уменьшения величины его душевого дохода (рис.2.2, 2.3). В городах с высокой плотностью населения уменьшаются расстояния перемещения, что делает население менее восприимчивым к невысоким скоростям сообщения на ГОТ. По мере роста душевого дохода повышаются требования населения к скорости перемещения при одновременном росте возможностей личной автомобилизации. Это приводит к снижению потребности в относительно менее скоростном и менее комфортабельном общественном транспорте и переориентации на индивидуальный транспорт.

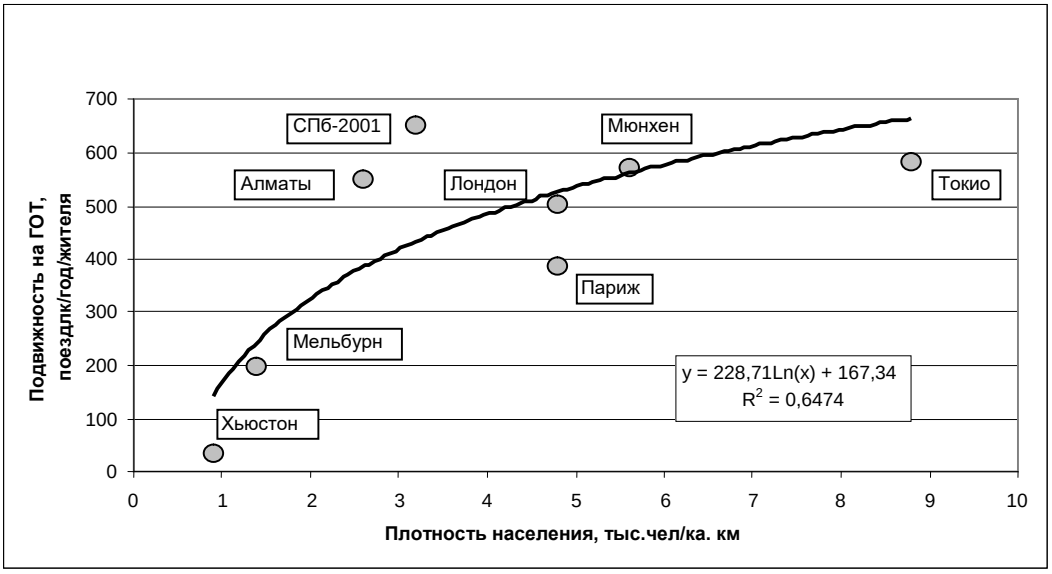



Рисунок 2.2 – Зависимость подвижности на общественном транспорте от плотности населения

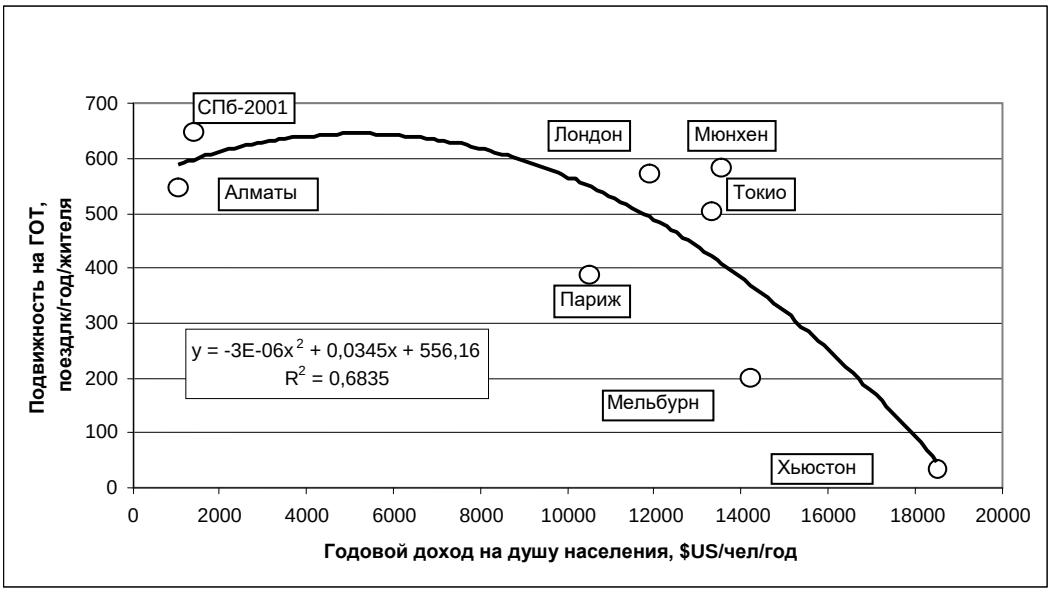



Рисунок 2.3 – Зависимость подвижности на общественном транспорте от дохода

Задачу прогнозирования подвижности населения города можно разделить на две подзадачи: это прогнозирование общей величины подвижности и ее структуры по видам осуществления. Один из методов количественной оценки уровня подвижности – социологический. Сбор данных о транспортной подвижности населения основан на домашнем интервьюировании респондентов, распределенных по территории города согласно принципам квотной выборки в соответствии с пространственным распределением населения и его половозрастной структурой.

Но подвижность на индивидуальном транспорте и, соответственно, на общественном транспорте, зависит от уровня автомобилизации населения (под уровнем автомобилизации понимают количество зарегистрированных автомобилей на 1000 жителей). Уровень автомобилизации на перспективу определяется документами территориального планирования на основе значений, предлагаемых нормативами. Нужно отметить, что нормативные показатели уровня автомобилизации в ряде случаев могут оказаться сильно заниженными, так как при их определении не всегда учитывают современные тенденции резкого увеличения количества автомобилей в личном пользовании. Частота использования личного транспорта при передвижении по городу и, в частности, для ежедневных трудовых поездок, зависит от множества факторов и не может быть поставлена в прямую зависимость от уровня автомобилизации населения. Для определения объемов «отправлений» и «прибытий» на индивидуальном и общественном транспорте значение уровня автомобилизации целесообразно использовать совместно с системой поправочных коэффициентов, например, коэффициента использования индивидуального транспорта.

Все известные модели коэффициента использования индивидуального транспорта представляют попытку связать его значение с 1-2 факторами городской системы передвижений. Но реальный процесс его формирования намного сложнее и происходит под влиянием целой системы факторов. Принятие решения о использовании транспорта или отказе от него у субъекта перемещения происходит при ассоциированном действии таких параметров транспортной системы как плотность сети, интервал движения, ценовые и качественные характеристики транспорта и т.д. Выбор зависит от свойств самого субъекта и его перемещения: уровня его доходов, наличия личного автомобиля, расстояния перемещения и т.д. Оказывает свое влияние и среда: например, величина эксплуатационных расходов существенно определяет решения о пользовании личным автомобилем.

### *2.2.2. Структура городских передвижений*

Как указывалось выше, при решении задачи генерации поездок происходит переход от численности населения, количества рабочих мест, мощности объектов притяжения, других характеристик территории в количественные параметры, приведенные к некоторому временному диапазону. Как правило, расчет «отправлений» и «прибытий» производится для каждой группы участников передвижения отдельно, таким образом, необходимо изучить структуру городских (агломерационных) передвижений применительно к конкретному проекту с учетом точности моделирования. Обычно все передвижения подразделяются на четыре основных группы:

1. Передвижения по трудовым и учебным целям – передвижения работающих по найму лиц (рабочих и служащих) и предпринимателей от мест жительства к местам приложения труда и обратно, передвижения студентов и учащихся учреждений высшего,

среднего и начального профессионального образования к местам учебы и обратно, передвижения школьников к школам и обратно.

2. Передвижения по культурно-бытовым целям – передвижения населения всех социальных групп к предприятиям культурно-бытового обслуживания (зрелищным учреждениям, торговым центрам и т. п.) и обратно.
3. Рекреационные передвижения – передвижения населения всех социальных групп к местам длительного или кратковременного отдыха и обратно.
4. Деловые передвижения – передвижения лиц, работающих по найму (рабочих и служащих) и предпринимателей в течение рабочего дня в связи с производственными, деловыми нуждами предприятий, учреждений, организаций.

Если в 1980-е годы при проведении расчетов с помощью модели можно было ограничиться учетом только трудовых корреспонденций, то при расчетах современных и, особенно, перспективных потоков, необходимо учитывать, как минимум, трудовые и деловые передвижения. В некоторых моделях при необходимости более детального учета целевых передвижений могут также выделяться транзитные передвижения, передвижения, «внешние» по отношению к территории рассмотрения, грузовые передвижения и т.д.

### *2.2.3. Выбор расчетного периода для моделирования*

Выбор интервала времени для моделирования осуществляется на основе определения периода максимальной загрузки сети, что требует исследования часовой, суточной и сезонной цикличности автомобильных или пассажирских потоков. В проектной практике для периода моделирования часто выбирается утренний час «пик». Он имеет наиболее простую структуру, с той точки зрения, что в утренний максимальный час перевозок значительную долю составляют трудовые корреспонденции («дом – работа»), которые хорошо поддаются формализации: трудовые корреспонденции являются наиболее устойчивыми по направлению и величине, наиболее концентрированными по времени суток и наиболее обязательными.

В то же время, за последние годы график зависимости потока от времени суток претерпел значительные изменения: если ранее наблюдались ярко выраженные утренние и вечерние пиковые нагрузки, то сегодня во многих городах наблюдается «сглаживание» пиков, выражающееся в расширении интервала пиковых нагрузок при одновременном уменьшении доли максимального часа в суточном объеме перевозок. Причем по территории города эти закономерности могут варьироваться в зависимости от преобладающего функционального назначения территории, удаленности от центра, социального состава населения и других факторов. Для нивелирования указанных различий в характере цикличности потоков в качестве интервала времени для моделирования иногда целесообразно выбирать условный

(расчетный) час. В качестве же расчетного часа может быть принят утренний среднемаксимальный час, в пределах которого величины потоков представляют собой 40% от максимального утреннего трехчасового потока. Такой подход позволяет, в том числе, нивелировать «волну», когда период максимальной загрузки сети в утренний час «пик» «перемещается» от периферии к центру города.

## 2.3.Моделирование матрицы межрайонных корреспонденций

### *2.3.1. Понятие транспортного спроса*

Транспортный спрос – это количественно определенные потребности в перевозках и дополнительных транспортных услугах. Транспортный спрос может измеряться в количестве автомобилей, пассажиров или грузов в единицу времени. Спрос на услуги конкретного вида транспорта определяется, в частности, развитием в регионе различных видов транспорта, степенью их интеграции, уровнем транспортных тарифов, качеством сервиса, предоставляемого потребителям различными видами транспортных предприятий и организаций. Спрос же на грузовые перевозки во многом определяется двумя факторами: динамикой и структурой изменения объемов производства, а также платежеспособностью предприятий и организаций всех отраслей экономики.

Как и в рыночной ситуации, в сфере транспортных услуг действует так называемое рыночное равновесие (равновесие спроса и предложения). Потокораспределение в транспортной сети является аналогом рыночной ситуации равновесия, в которой участники движения создают спрос на использование элементов транспортной системы, возможности этих элементов выступают как предложение, а ценой являются затраты (времени, стоимости, уровня комфорта) участников движения, возникающие при использовании этих элементов. В случае, когда спрос превышает возможности предложения, происходит ухудшение условий движения, приводящее к росту таких затрат. Суммарный прирост таких затрат может использоваться как один из показателей общей перегрузки транспортной системы. Для отдельных участков сети такой рост может служить индикатором их недостаточной пропускной (провозной) способности. Кроме того, известно, что улучшение условий движения провоцирует увеличение трафика – проявляется так называемый индуцированный спрос.

Нужно отметить, что в последние годы в практике градостроительного планирования транспортный спрос зачастую стал рассматриваться не как заранее заданная величина, определяющая структуру потокораспределения, а как инструмент управления транспортной системой города. В частности, за последние десятилетия накоплен опыт использования целого комплекса регулирующих мер, направленных на снижение спроса на использование индивидуального транспорта, особенно в ареалах плотной городской застройки.

### *2.3.2. Общие подходы к моделированию корреспонденций*

Моделирование матрицы межрайонных корреспонденций – основной этап расчета параметров транспортного спроса. Задача распределения передвижений (корреспонденций) между парами транспортных районов при известных значениях «отправлений» и «прибытий», определенных на этапе генерации поездок, имеет бесконечное множество решений. На рис.2.4 представлена табличная форма матрицы корреспонденций, каждый элемент которой представляет собой количество передвижений между парами транспортных районов – из района *i* в район *j*.

| | Прибытия | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Отправления | 1 | 2 | … | n | Сумма |
| 1 | | | | | P1 |
| 2 | | ? | | | P2 |
| … | | | | | … |
| m | | | | | Pm |
| Сумма | Q1 | Q2 | … | Qn | |

Рисунок 2.4 – Табличная форма матрицы корреспонденций

Значения матрицы корреспонденций невозможно непосредственно измерить, поэтому для их определения используют различные косвенные подходы, например, социологические исследования или метод восстановления значений матрицы на основе известных параметров потокораспределения. В рамках данного учебного пособия рассматриваются модели, основанные на изучении индивидуальных предпочтений жителей города; именно такие модели нашли широкое распространение в составе многих известных программных комплексов транспортно-градостроительного моделирования.

Модели расчета межрайонных корреспонденций подразделяются на две большие группы: агрегированные и дезагрегированные. Агрегированные модели построены на усредненных значениях переменных, определяющих спрос на передвижения. Количество передвижений, определяемых агрегированными моделями, рассчитывается пропорционально размеру территории, генерирующей спрос, а спрос оценивается пропорционально населению, проживающему в транспортном районе. Количество передвижений, привлекаемых в тот или иной транспортный район, рассчитывается пропорционально количеству источников притяжения, располагающихся на рассматриваемой территории.

Однако, межрайонные корреспонденции – это совокупный результат индивидуальных передвижений городских жителей. Поэтому логично пользоваться дезагрегированными моделями как инструментом,

чувствительным к индивидуальному транспортному поведению респондентов. Дезагрегированные модели описывают транспортное поведение индивида, учитывая влияние на него социально-экономических и градостроительных факторов.

Поведенческие принципы связаны с двумя возможными ситуациями.

1) Пользователи сети независимо друг от друга выбирают маршруты следования, соответствующие их минимальным транспортным расходам (время, деньги).

2) Пользователи сети выбирают маршруты следования исходя из минимизации общих транспортных расходов в сети.

Данные поведенческие принципы получили названия соответственно первого и второго принципов Вардропа. В первом случае каждый стремится достигнуть конечного пункта своей поездки как можно выгоднее для себя и из имеющихся возможных вариантов следования выбирает тот маршрут, по которому будет нести минимальные затраты (временные, финансовые, моральные и т. п.) на проезд. Поэтому данный принцип также называют пользовательской оптимизацией.

Второй принцип Вардропа предполагает централизованное управление движением в сети. Соответствующее ему распределение транспортных потоков называют системным оптимумом, а сам принцип – системной оптимизацией. Примером пользователей, передвигающихся согласно второму принципу, служат водители маршрутного транспорта [8].

В классической (сетевой) схеме расчета спроса подразумевается выбор корреспондентами районов прибытия исходя из возможностей транспортной сети, т.е. затраты времени на передвижения между районами рассчитываются с учетом возможных скоростей передвижения. При разработке же проектов на перспективу, даже когда речь идет о сложившихся городах, такой подход не всегда приемлем. Например, близко расположенные районы, разделенные водной преградой и потому практически недоступные в настоящее время друг для друга по сети, вполне могут быть взаимно привлекательны для жителей при строительстве мостового перехода.

При расчете же матрицы корреспонденций в сетевой модели получится, что затраты на такое передвижение оказываются велики, и, как следствие, число корреспондентов между этими районами будет небольшим, из чего можно будет сделать вывод о нецелесообразности строительства переправ на связи этих районов. Говоря же о 20-30-летней перспективе, на которую разрабатываются многие проекты, нельзя ориентироваться на конфигурацию сети, так как построение ее и является одной из основных целей разработки таких проектов. Таким образом, возникает потребность в разработке досетевых моделей формирования межрайонных корреспонденций, которые учитывали бы общий уровень транспортного обслуживания, скоростные параметры сети, но были бы менее подвержены влиянию геометрических особенностей и ограничений сети. Такие модели позволят более адекватно выявлять потенциальный спрос на межрайонные передвижения.

Определяющим фактором при моделировании распределения корреспонденций на досетевом уровне становится взаимное расположение ареалов расселения и ареалов размещения мест приложения труда, то есть на первый план выходят такие факторы как параметры конфигурации городской территории, плотность размещения населения и мест приложения труда, а также взаимное расположение функциональных зон (табл.2.1).

Досетевые модели предоставляют проектировщику информацию о направлениях развития транспортной сети в условиях заданного размещения функциональных зон. Моделирование распределения корреспонденций на досетевом уровне позволяет просчитать ситуацию наиболее полного раскрытия потенциала территории путем предложения рациональной структуры тяготения, которая может быть поддержана сетевыми решениями.

Таблица 2.1 – Сравнение подходов к расчету матриц

| **Метод расчета матриц межрайонных передвижений** | **Сетевой метод** (модель сетевого уровня) | **Досетевой метод** (модель досетевого уровня) |
|---|---|---|
| Подход к определению затрат времени между пунктами отправления и прибытия | С учетом скоростных параметров элементов транспортной сети | На основе среднего уровня транспортного обслуживания |
| Факторы, влияющие на распределение корреспонденций | ❖ Взаиморасположение потокообразующих и потокопоглощающих центров<br>❖ Конфигурация и параметры транспортной сети<br>❖ Поведенческие факторы (функция тяготения) | ❖ Взаиморасположение потокообразующих и потокопоглощающих центров<br>❖ Поведенческие факторы (функция тяготения) |

**В С Т А В К А**

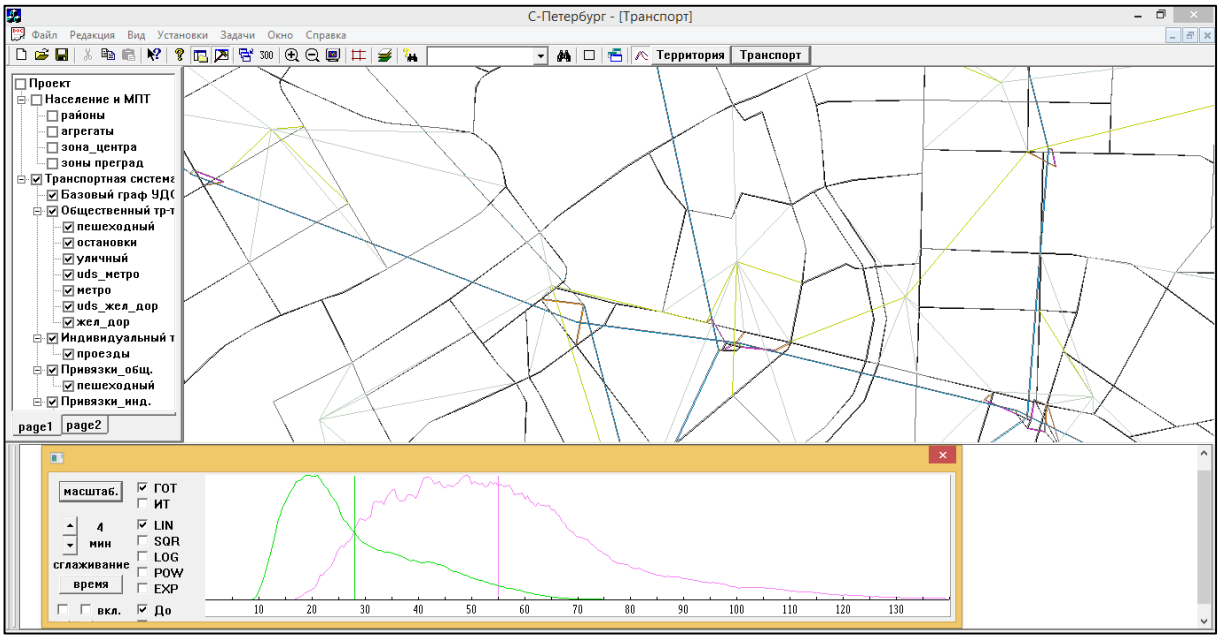



Рисунок 1.2 – Интерфейс программного комплекса Citraf

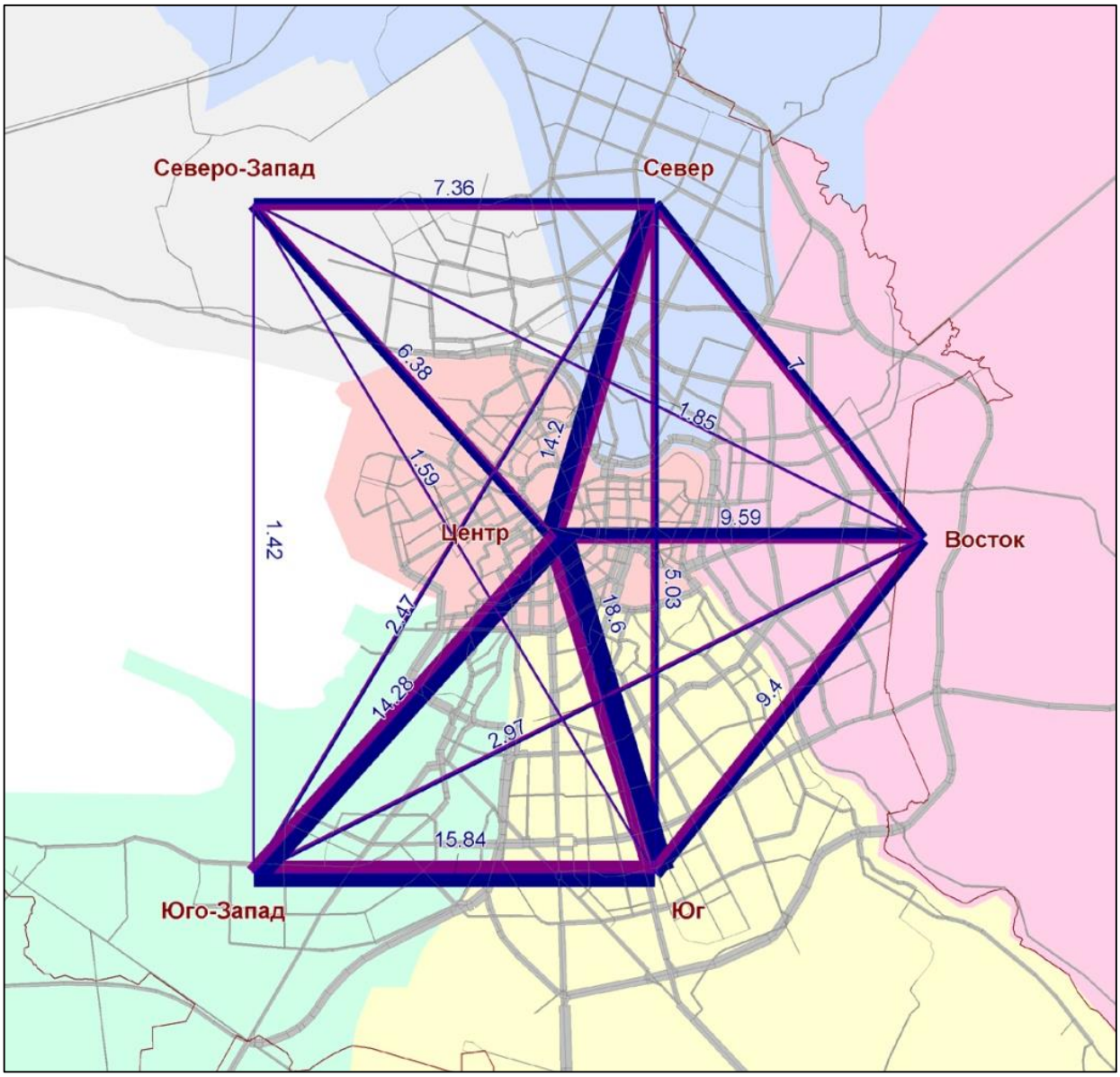



Рисунок 2.6 – Матрица межрайонных корреспонденций на автомобильном транспорте (С.-Петербург)

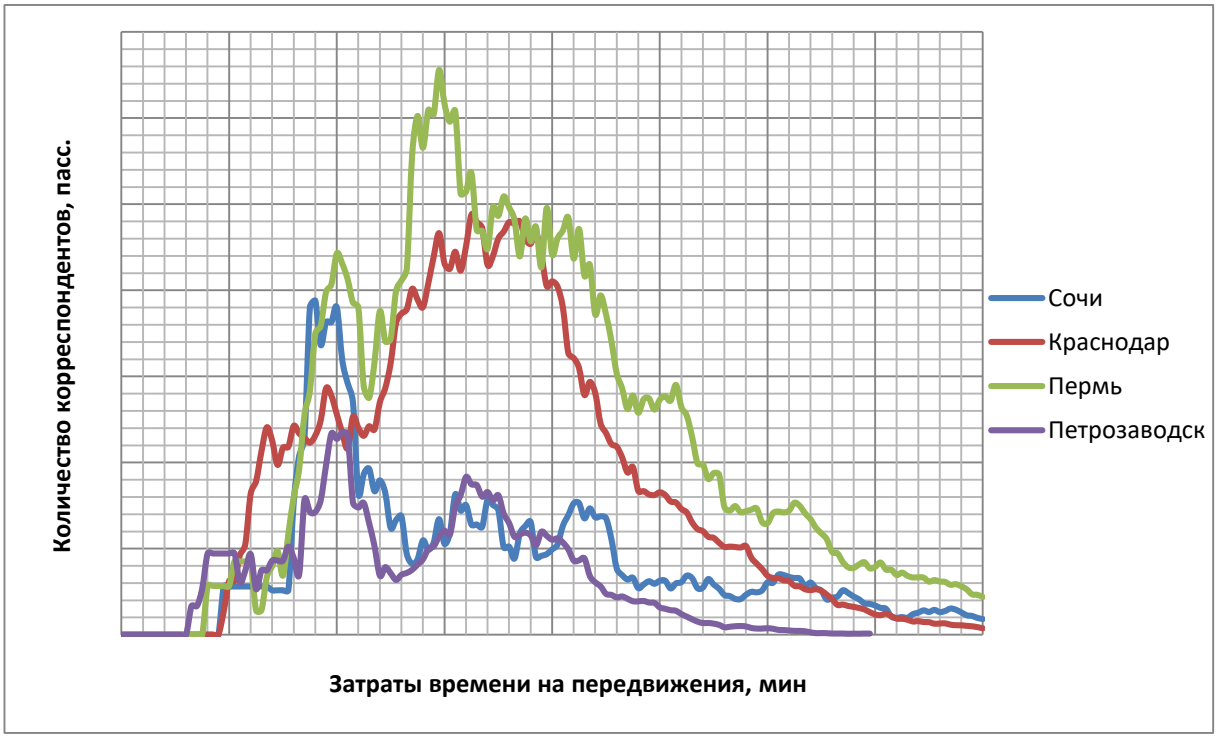



Рисунок 2.7 – Расчетные «кривые расселения» для ряда городов (агломераций) РФ

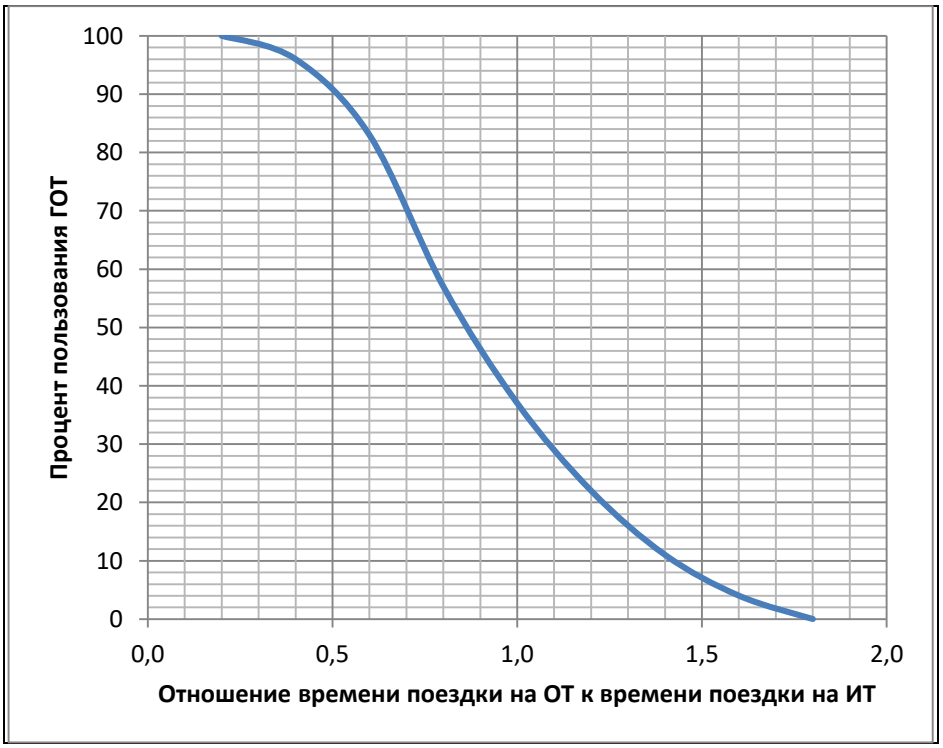
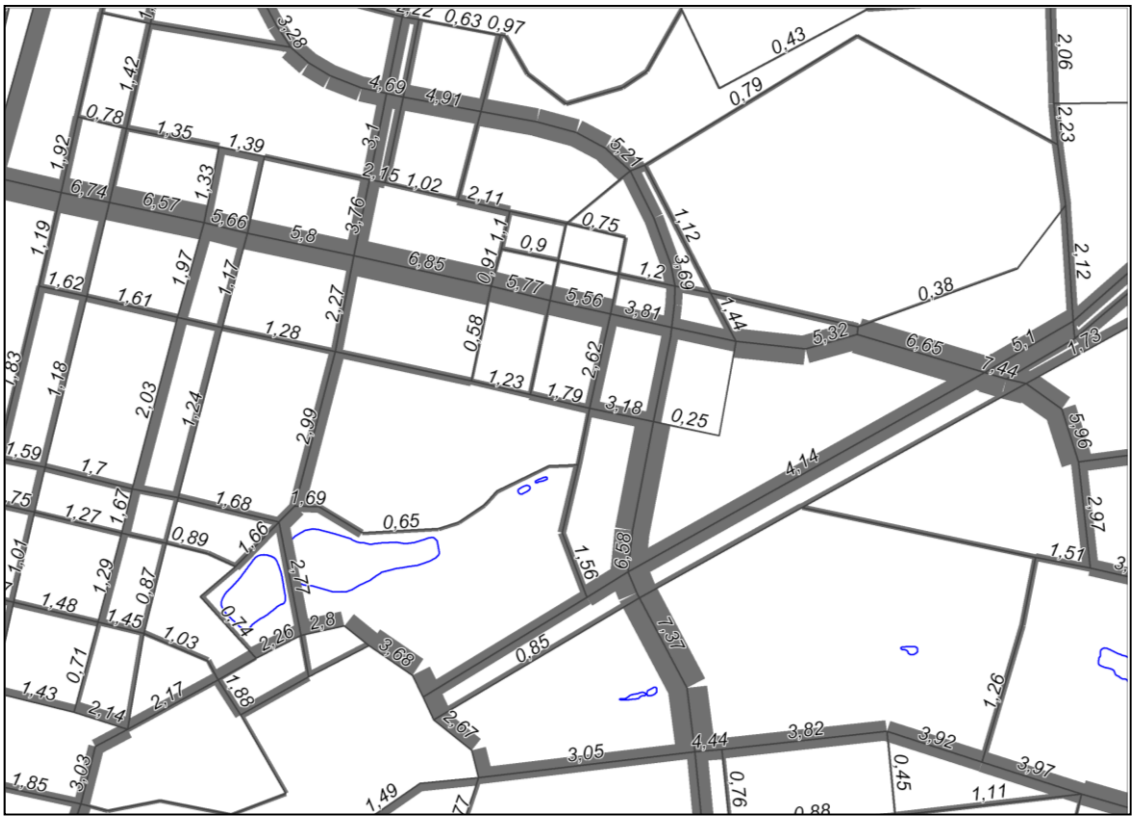
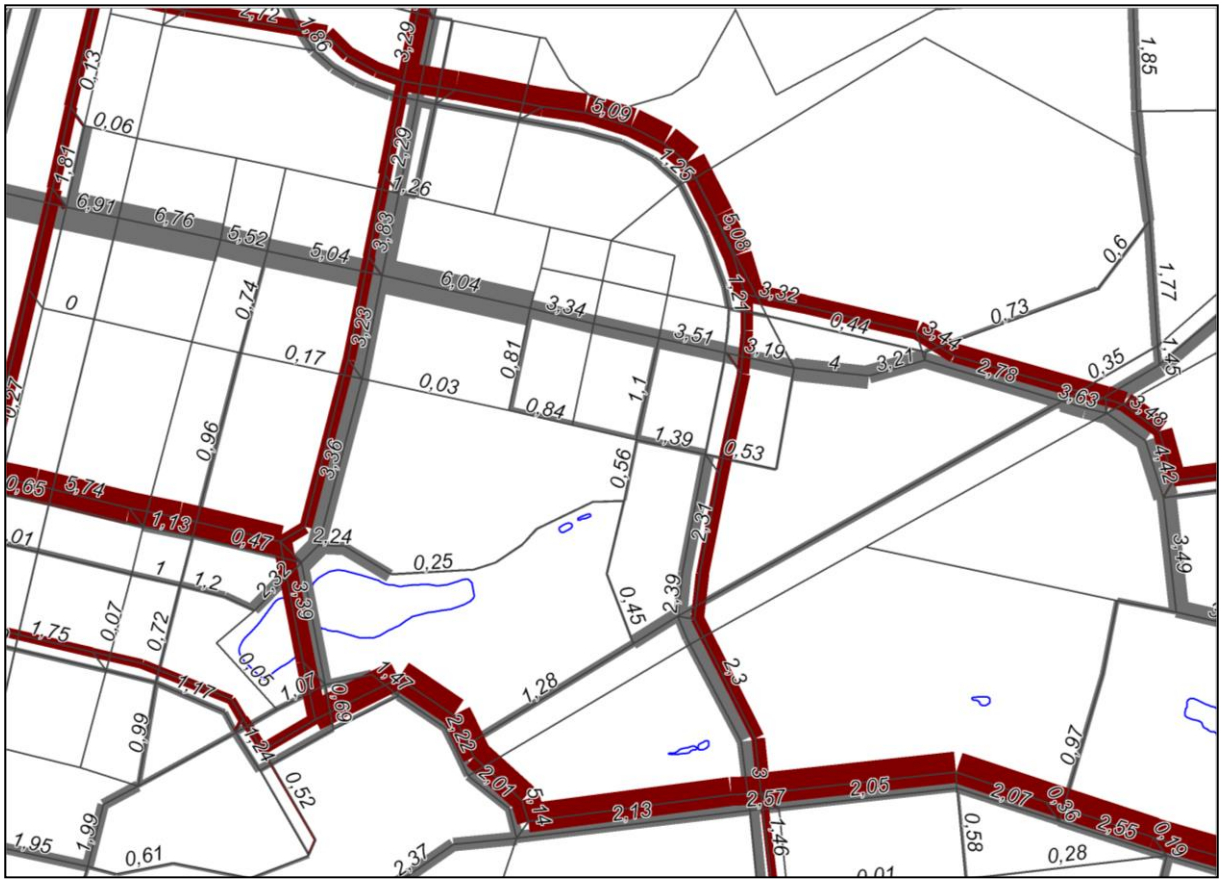



Рисунок 2.8 – Простейшая модель распределения спроса по способам передвижений



а)



б)

Рисунок 2.9 – Прогнозная картограмма потокораспределения на индивидуальном (а) и общественном (б) транспорте (г.Краснодар)

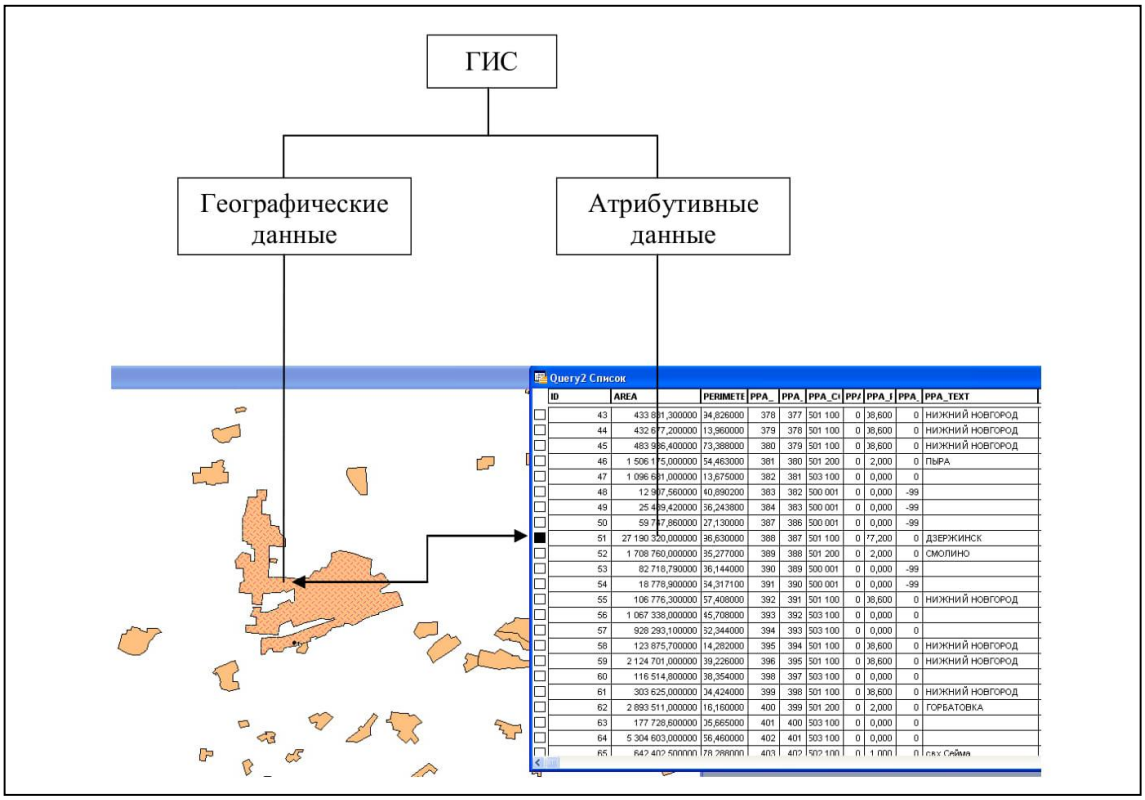
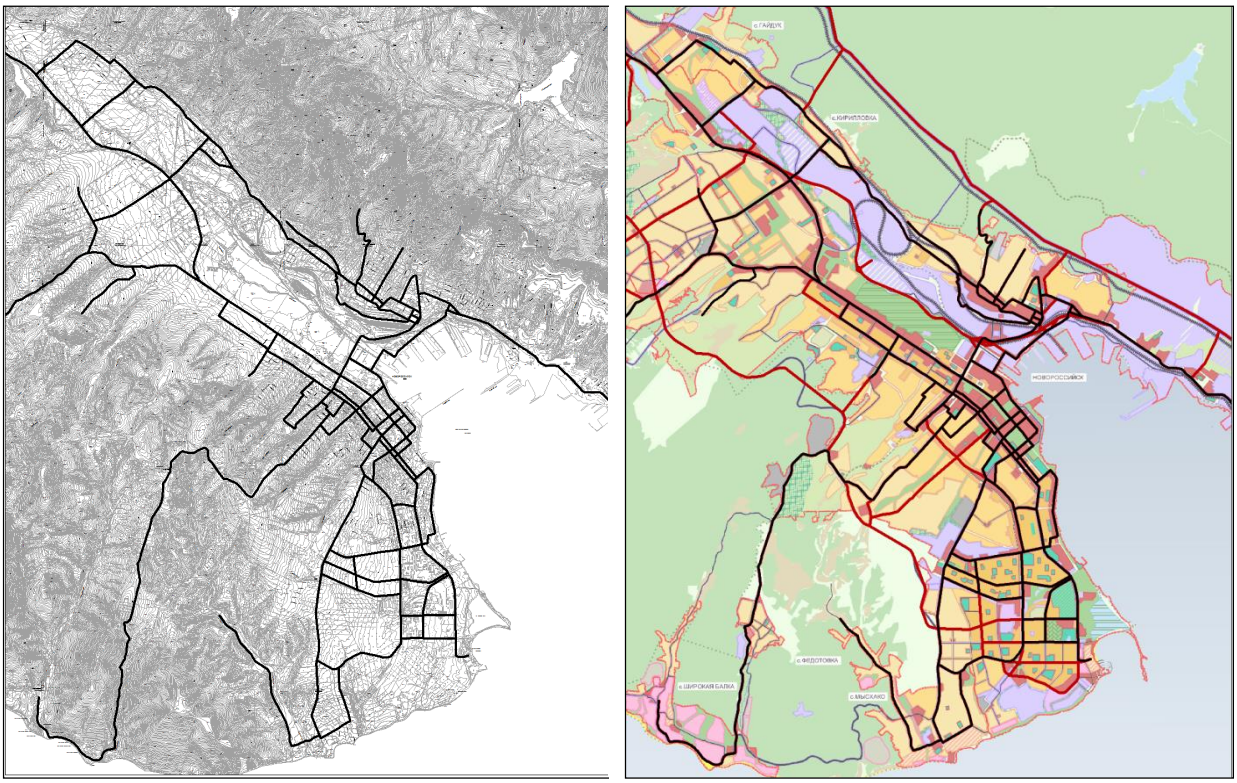



Рисунок 3.1 – Организация данных в ГИС (по [14])



а) б)

Рисунок 3.2 – Агрегированный транспортный граф: современное состояние (а) и расчетный срок (б); красным цветом показаны проектные элементы (г.Новороссийск)

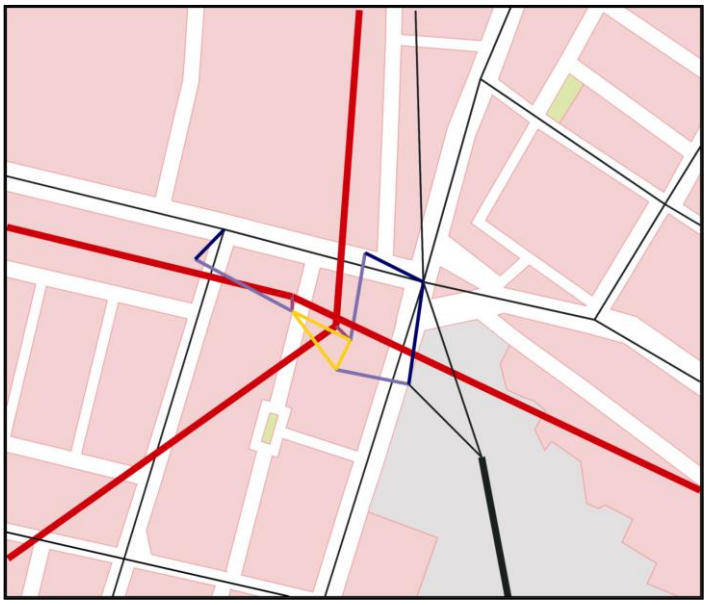


Рисунок 3.3 – Модель пересадочного узла

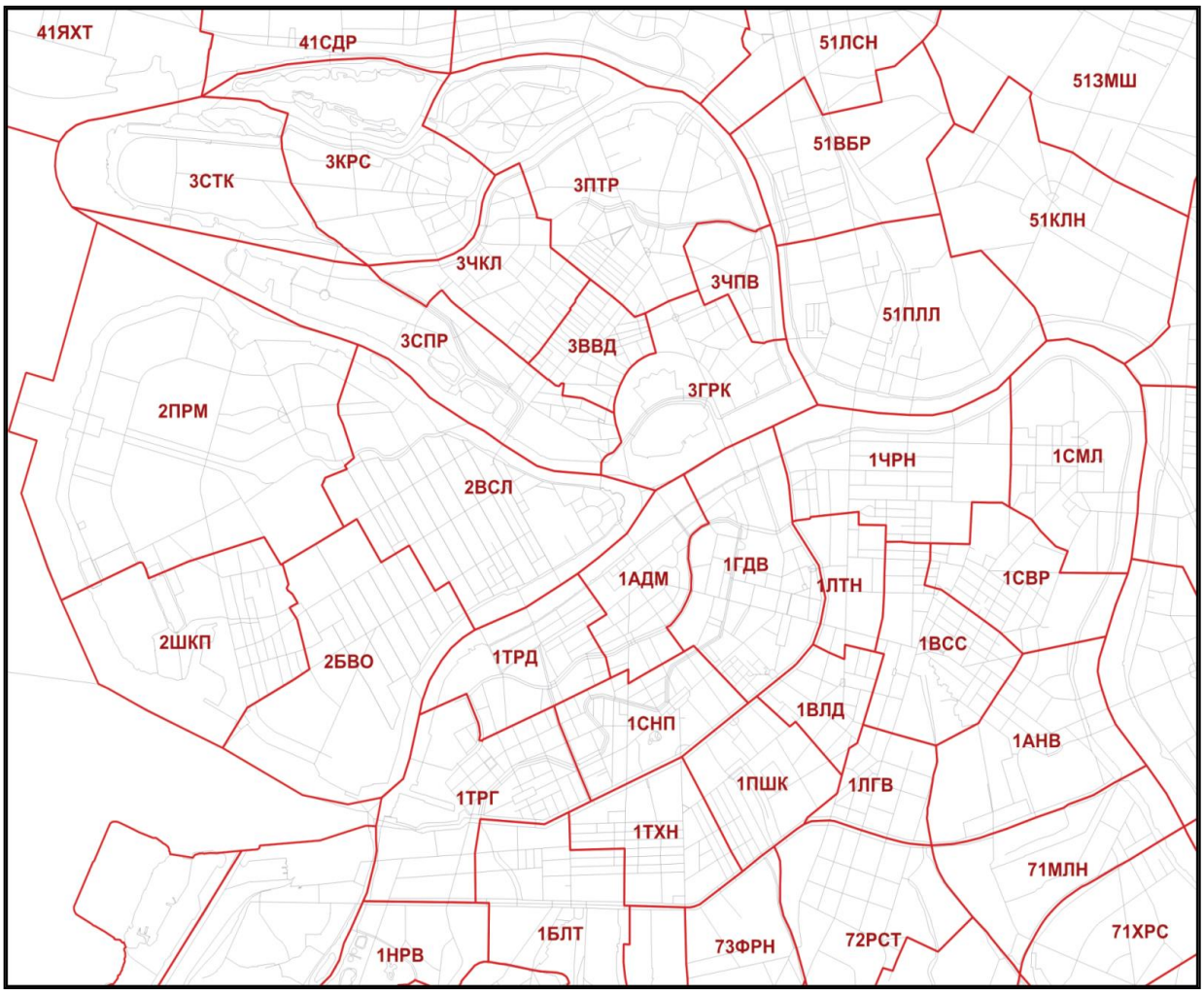
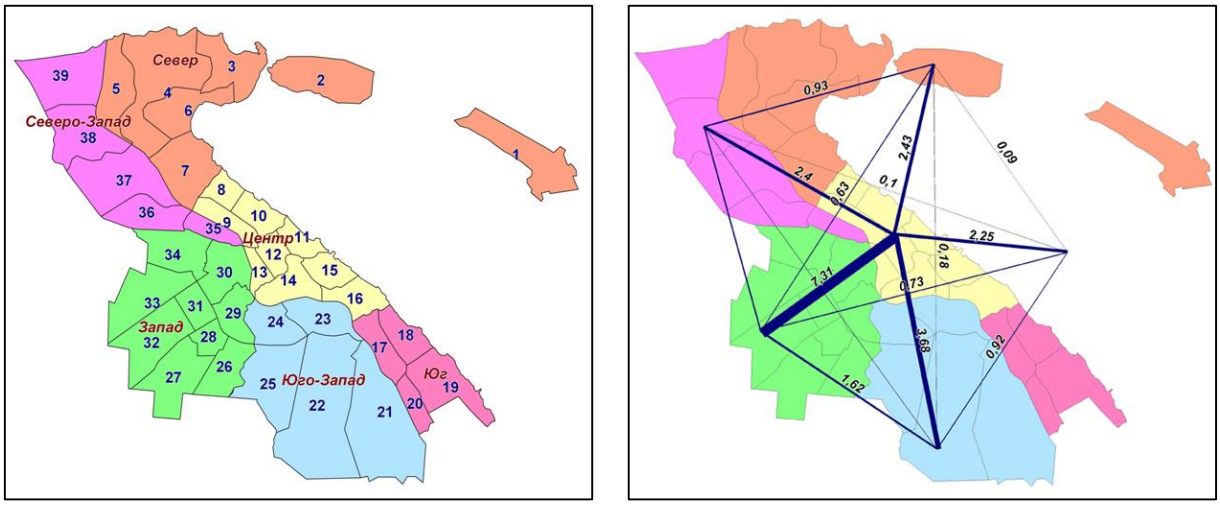



Рисунок 3.4 – Система транспортного районирования С.-Петербурга (фрагмент)




а) б)

Рисунок 3.5 – Построение матрицы межрайонных корреспонденций (б) в системе агрегированного транспортного районирования (а), г.Петрозаводск

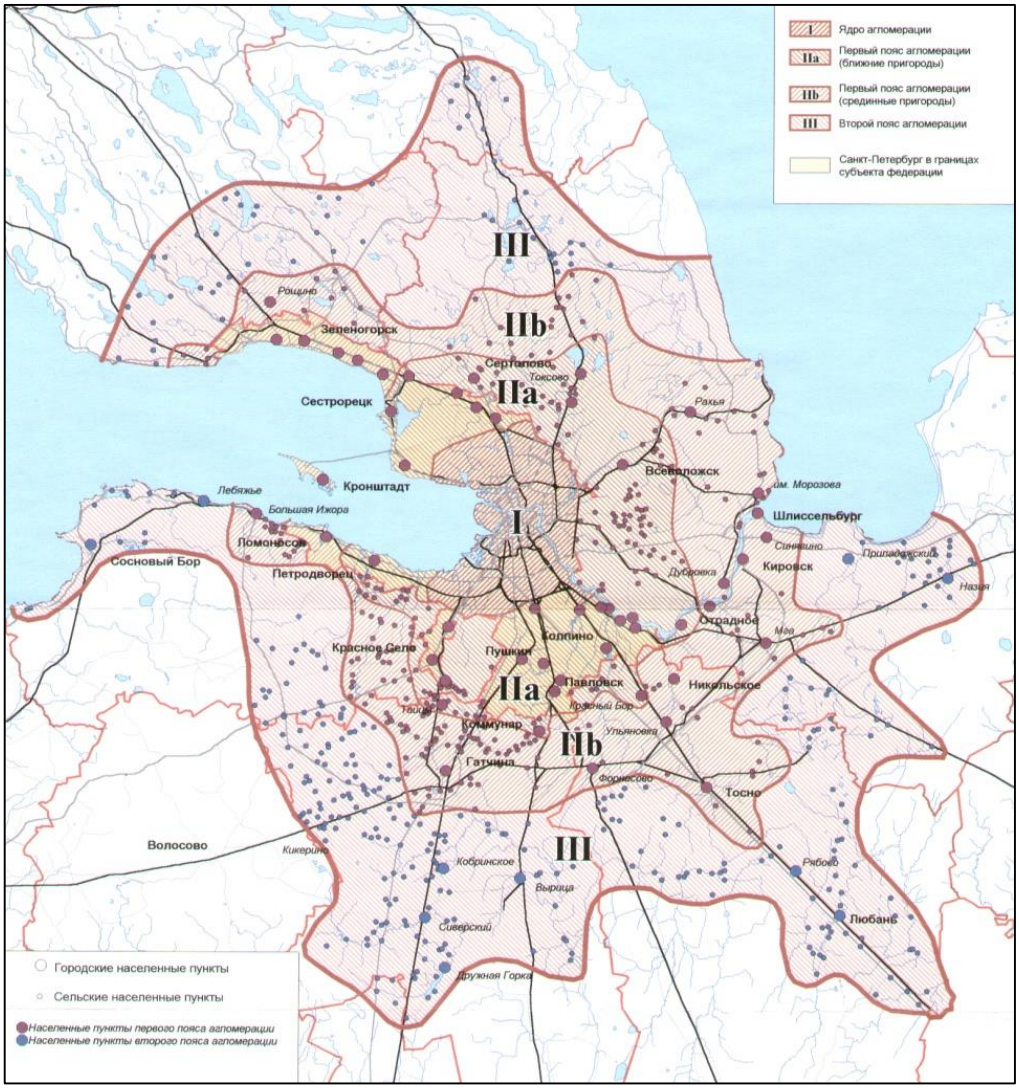



Рисунок 3.6 – Структура С.-Петербургской агломерации (по [3])

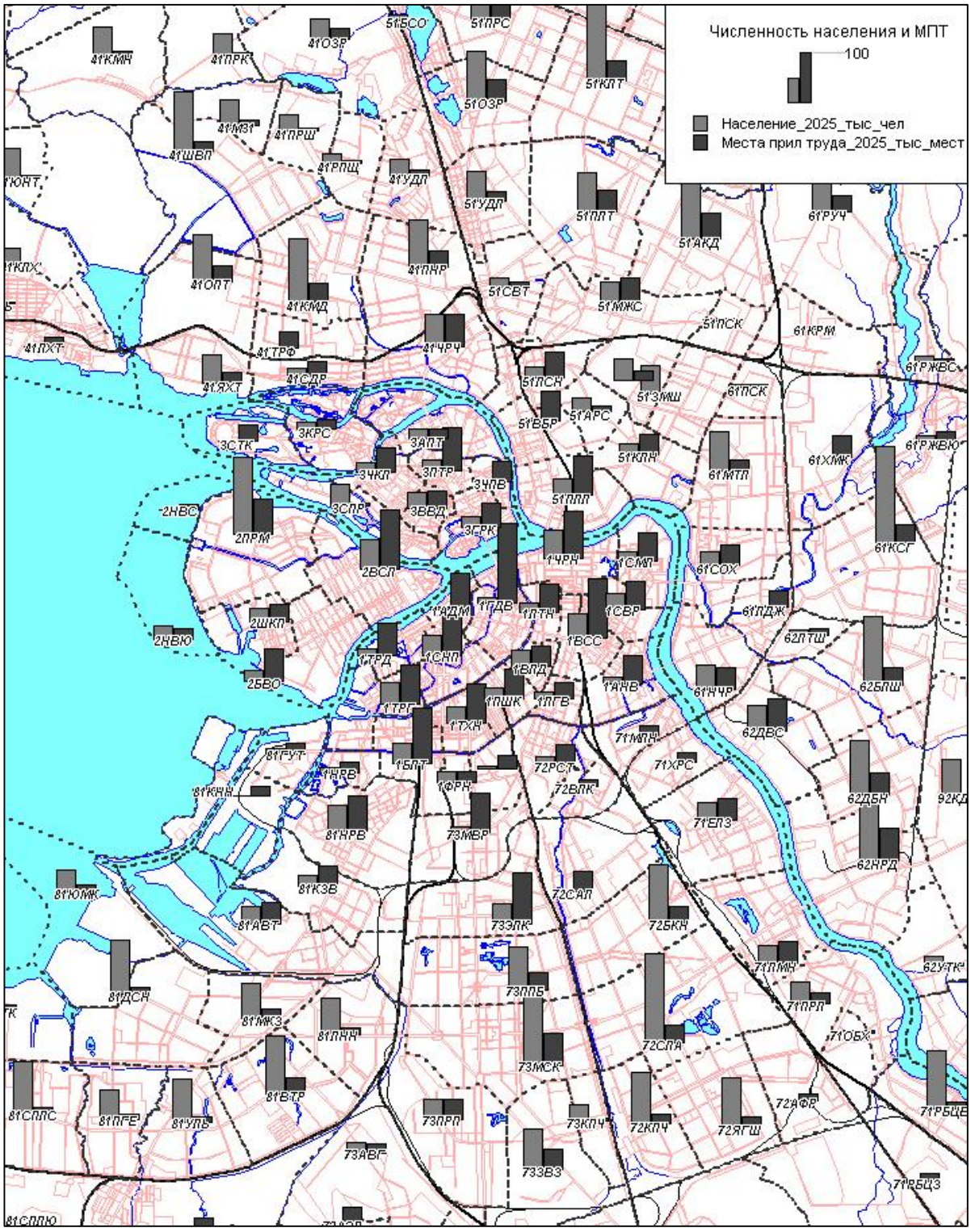



Рисунок 3.7 – Прогнозное распределение населения и мест приложения труда по транспортным районам в соответствии с Генеральным планом С.-Петербурга

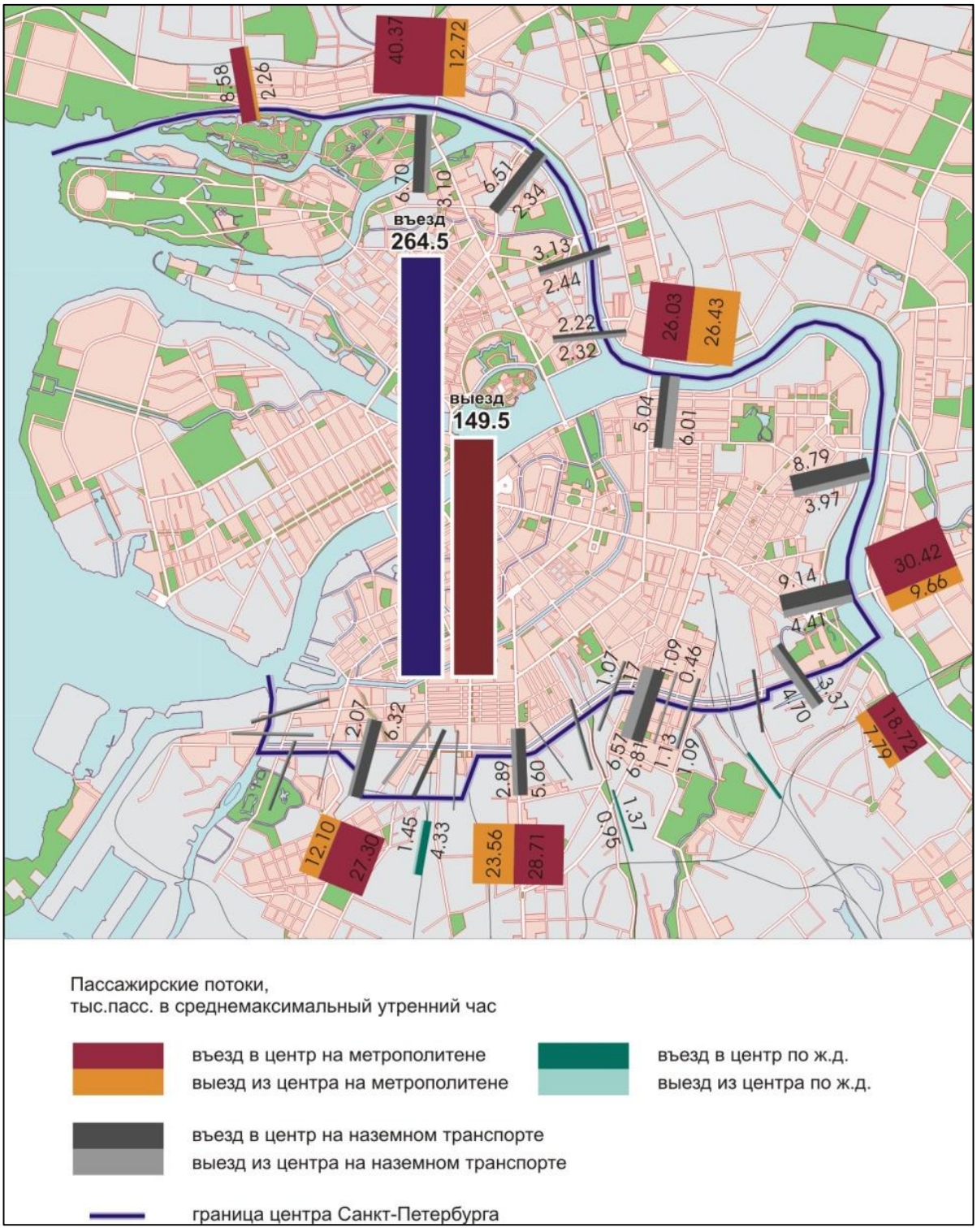



Рисунок 3.8 – Картограмма результатов комплексного обследования пассажиропотоков на границе центра С.-Петербурга

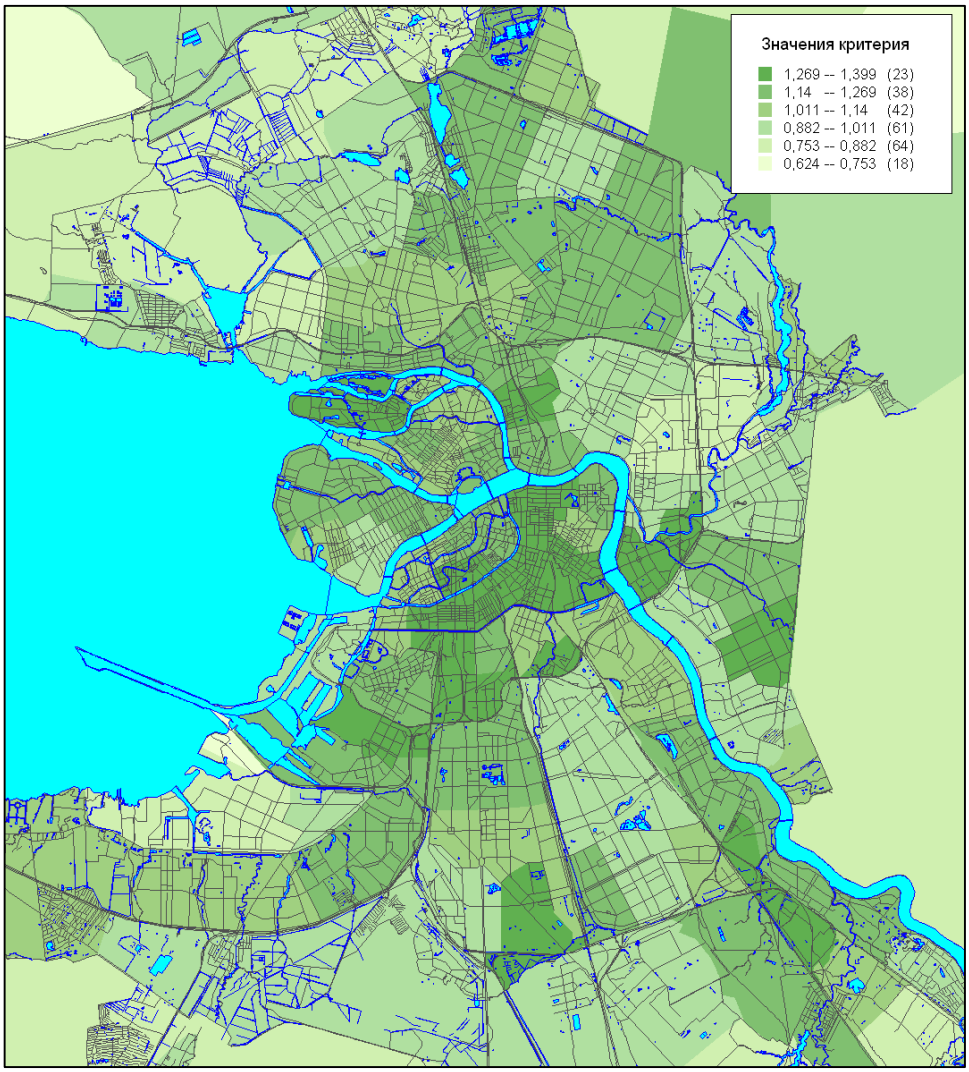



Рисунок 4.1 – Картограмма обеспеченности территорий общественным транспортом, полученная методом досетевого моделирования (С.-Петербург)

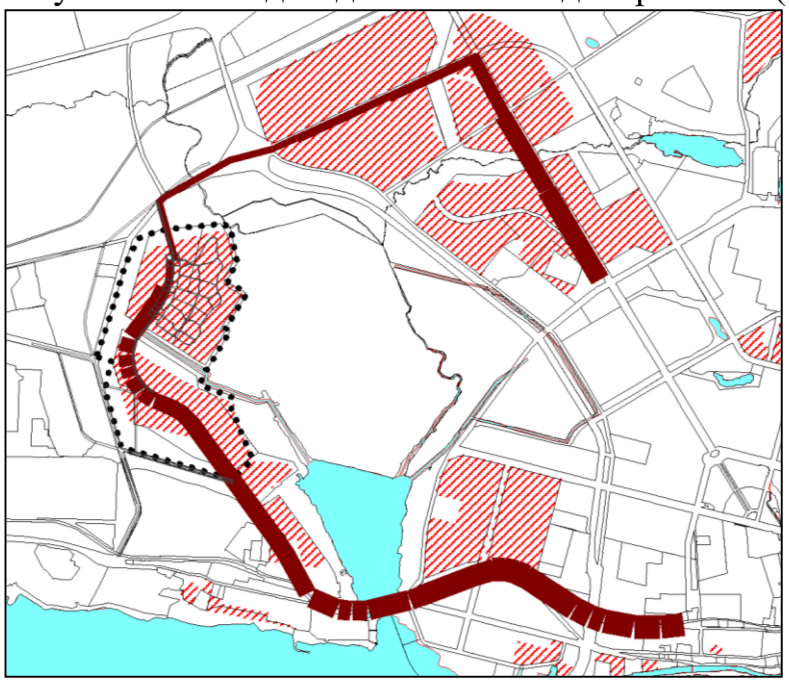


Рисунок 4.3 – Расчетная картограмма спроса на пассажироперевозки по проектируемой трамвайной линии

### *2.3.3. Гравитационная модель*

Гравитационная модель основана на следующем положении: корреспонденция из района *i* в район *j* пропорциональна общему объему отправления из центра *i*, общему объему прибытия в центр *j* и некоторой функции, зависящей от транспортного расстояния между центрами *i* и *j*. Транспортное расстояние отражает степень близости районов с учетом скорости и удобства передвижений, предоставляемых транспортной сетью. Способ определения этой величины может различаться в разных вариантах модели.

По сути, гравитационная модель основана на аналогии между взаимным притяжением двух масс и «притяжением» выезжающих из района *i* к местам прибытия в районе *j* [25], т.е. предполагается, что

$$x_{ij} = k\, P_i\, Q_i / c^2_{ij}, \qquad (2.1)$$

где $x_{ij}$ – объем корреспонденций между районами *i* и *j*, тыс.чел.;
$P_i$ – объем отправлений из района *i*, тыс.чел.;
$Q_j$ – объем прибытий в район *j*, тыс.чел.;
$c_{ij}$ – обобщенная стоимость передвижения между районами *i* и *j* (аналог расстояния);
*k* – некоторая константа.

На $x_{ij}$ накладываются естественные ограничения:

$$\Sigma_i\, x_{ij} = P_i,\ \Sigma_j\, x_{ij} = Q_j$$

### *2.3.4. Энтропийная модель*

Наибольшее распространение в современной практике моделирования получили энтропийные модели; этот подход к определению матриц корреспонденций реализован и в программном комплексе Citraf. Энтропийный подход основан на представлении функции априорного предпочтения, которая описывает характер ежедневных трудовых передвижений (основы описываемого подхода были заложены А.Дж.Вильсоном и М.Дж.Вебером [37, 38]). Принятие за основу именно этого подхода во многих моделях объясняется тем, что традиционно качество городской транспортной системы определяется, прежде всего, ее способностью эффективно обслуживать именно ежедневные пассажирские перевозки с трудовыми целями. Например, согласно действующему в России СП 42.13330 «СНиП 2.07.01-89*. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений», затраты времени в городах на передвижение от мест проживания до мест работы не должны превышать определенный норматив, устанавливаемый в зависимости от численности населения города. Каждый крупный город характеризуется своим показателем средних затрат времени на трудовые передвижения. В то же время, массовое

поведение в городском пространстве обладает рядом устойчивых характеристик, к которым относятся примерное постоянство средних затрат времени на трудовые передвижения в течение длительного периода [10].

Рассмотрим случай, когда участниками транспортного процесса являются отдельные жители города, причем каждый из них принимает решение о выборе пути следования сообразуясь, прежде всего, со своими индивидуальными целями и предпочтениями в условиях той транспортной ситуации, которая возникает в системе под влиянием поведения всей массы участников передвижений (принцип пользовательской оптимизации). Таким образом, формирование корреспонденций, транспортных и пассажирских потоков носит достаточно стихийный характер, на процесс этого формирования можно влиять, изменяя параметры и структуру транспортной системы, но нельзя непосредственно управлять им.

Пусть перед жителем города имеется некоторый набор альтернативных возможностей распределения и задан ряд ограничений, стесняющих способы распределения по этим альтернативам [21]. Известно также априорное предпочтение жителей города той или иной альтернативы. Иначе говоря, пусть жители города разбиты на группы и все жители, принадлежащие к одной группе, имеют одинаковое априорное предпочтение. Предпочтение является априорным, потому что оно не учитывает ограничений, стесняющих множество возможных распределений. Понятно, что распределение групп только в соответствии с их априорными предпочтениями, как правило, является недопустимым с точки зрения задаваемых ограничений.

Предположим, что мы распределили всех жителей города с учетом заданных ограничений, не обращая внимания на априорные предпочтения, а затем предоставили им возможность меняться друг с другом местами в соответствии с их предпочтениями, но так, чтобы не нарушалось выполнение ограничений. Можно ожидать, что при таких обменах мы должны получить распределения, в большой степени отвечающие априорным предпочтениям жителей. Оказывается, что при достаточно естественных предположениях такой многошаговый обменный процесс приводит к некоторому стационарному (наиболее вероятному) распределению, которое обладает следующим свойством: это допустимое распределение является ближайшим к априорному в смысле специальной меры близости – «взвешенной» энтропии распределения [24]. Нахождение расчетного распределения сводится к решению специальной задачи на отыскание максимума «взвешенной» энтропии распределения при заданных ограничениях.

При моделировании корреспонденций предполагается, что каждый житель города осуществляет альтернативный выбор места работы, возможность реализации которого ограничена численностью рабочих мест на выбираемых предприятиях. В результате моделирования корреспонденций происходит объединение отдельных жителей, имеющих идентичный спрос на транспортные услуги, в однородные группы – корреспонденции, количество которых, как правило, на порядок меньше чем численность жителей, что существенно облегчает в дальнейшем моделирование потоков.

Общая постановка задачи, решаемой при построении матриц корреспонденций, выглядит следующим образом:

$$\sum_{i,j} x_{ij}\ ln\ (y_{ij}/x_{ij}) \Rightarrow \max \qquad (2.2)$$

$$\sum_{j} x_{ij} = P_i,\ i=1,\ldots,nr \qquad (2.3)$$

$$\sum_{i} x_{ij} = Q_j,\ j=1,\ldots,nr \qquad (2.4)$$

$$x_{ij} \geq 0.$$

Здесь $i,j$ – номера транспортных районов, $x_{ij}$ – элементы искомых матриц корреспонденций,

$\sum_{i,j} x_{ij}\ ln\ (y_{ij}/x_{ij})$ – «взвешенная» энтропия распределения,
$P_i$ – объем отправлений из района $i$,
$Q_j$ – объем прибытий в район $j$.

Естественно предполагается, что $\sum P_i = \sum Q_j$.

Значения $y_{ij}$ связаны с величиной вероятности реализации корреспонденции между районами $i$ и $j$. Анализ фактического расселения трудящихся по отношению к месту работы, проведенный в ряде городов, позволил установить определенную закономерность в этом явлении. Эта закономерность получила наименование «закона трудового тяготения», согласно которому трудящиеся по мере удаления от места работы расселяются во все меньших количествах, следуя кривой убывающей прогрессии. Указанный характер расселения диктуется естественным стремлением человека минимизировать затраты времени на передвижения к месту работы и обратно. На практике убывание вероятности совершения корреспонденции с ростом затрат времени описывают так называемой функцией тяготения, в качестве которой обычно используют функцию вида $exp(-\gamma t)$, где $\gamma>0$ – «параметр расселения», который калибруется по результатам натурных обследований передвижений. Таким образом, $y_{ij} = exp(-\gamma t_{ij})$, где $t_{ij}$ – затраты времени на передвижение из района $i$ в район $j$ (рис.2.5).

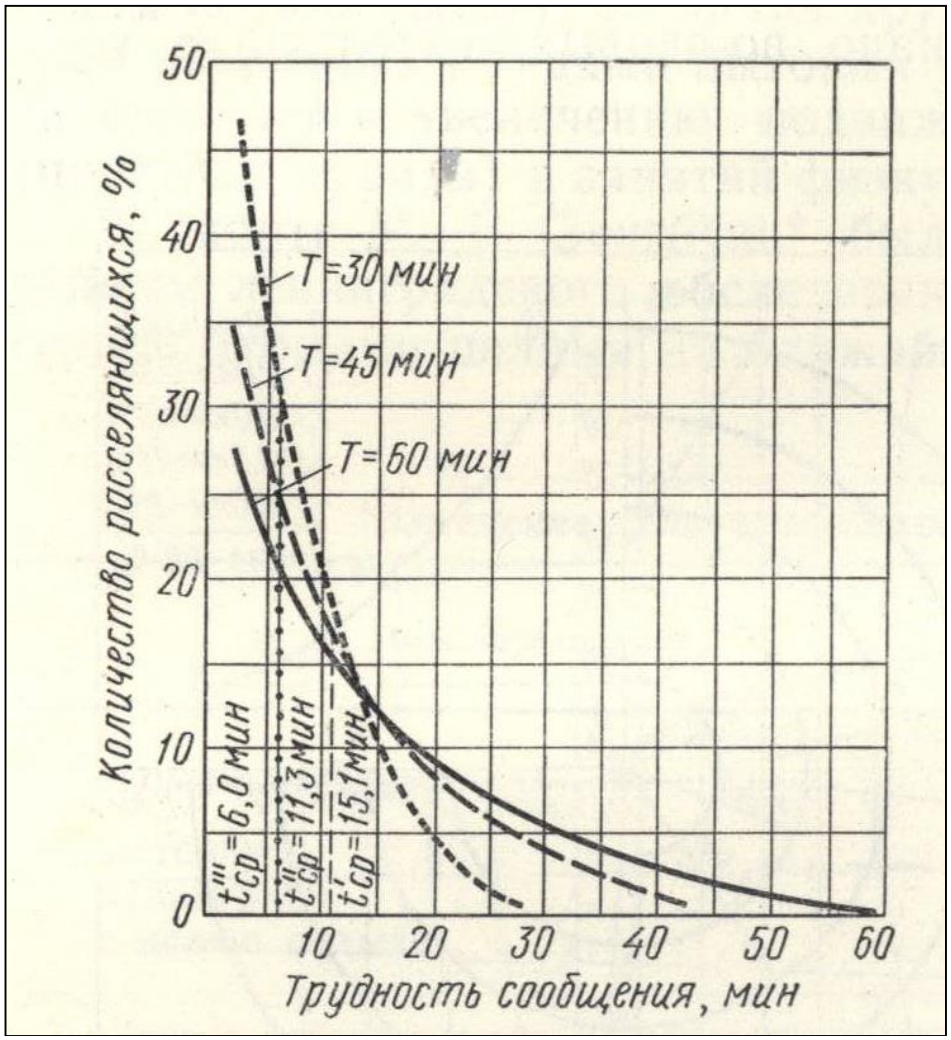



Рисунок 2.5 – Гипотеза расселения по Г.В.Шелейховскому (по [22])

Нужно заметить, что скорость убывания вероятности корреспонденции с ростом затрат времени, определяемая функцией тяготения, оказывается довольно низкой. Это объясняется тем, что на влияние затрат времени накладывается очень сильный «фон», связанный с семейной структурой расселения, профессиональными предпочтениями при выборе места работы и т.п. Пример графического представления матрицы корреспонденций представлен на рис.2.6.

Замечательным обстоятельством, связанным с энтропийным подходом, является то, что его практическое использование возникло задолго до его теоретического рассмотрения. Еще в начале прошлого века использовался метод построения матриц корреспонденций, в котором сначала величины корреспонденций задавались в соответствии с функцией тяготения, а затем проводилась серия итераций по поочередной балансировке строк и столбцов матрицы, чтобы получить с приемлемой точностью для каждого района заданные объемы отправлений и прибытий. И только несколько десятилетий спустя было установлено, что матрица, полученная в результате работы такого

алгоритма является решением задачи (2.2)–(2.4), был получен общий вид и исследованы свойства этого решения.

При моделировании распределения корреспондентов по способам передвижений традиционно учитывают передвижения на общественном и индивидуальном видах транспорта, считая, что доля иных способов передвижения достаточно мала и ей можно пренебречь. Таким образом, для каждой пары районов можно говорить о двух величинах затрат времени на корреспонденцию $t_{ij}^1$ при передвижении на общественном транспорте и $t_{ij}^2$ при использовании легкового индивидуального транспорта. В этом случае житель города выбирает не только район прибытия, но и способ передвижения (на индивидуальном или на общественном транспорте). Такой подход к моделированию корреспонденций приводит к решению задачи выпуклого программирования следующего вида:

$$\sum_{i,j,k} x_{ij}^k \, ln\,(y_{ij}^k / x_{ij}^k) \Rightarrow \max, \qquad (2.5)$$

$$\sum_j x_{ij}^k = P_i^k,\ i=1,\ldots,\mathrm{nr},\ k=1,\ldots,\mathrm{L} \qquad (2.6)$$

$$\sum_{i,k} x_{ij}^k = Q_j,\ j=1,\ldots,\mathrm{nr},\ k=1,\ldots,\mathrm{L} \qquad (2.7)$$

$x_{ij}^k \geq 0$.

Поскольку выбор индивидуального вида транспорта предполагает наличие автомобиля, общий объем таких передвижений ограничен и зависит от уровня автомобилизации. Именно поэтому ограничения на объемы отправлений разделены по способам передвижения $k$.

Возможна более простая постановка задачи, в которой объемы отправлений в каждом из районов не разделены по способам передвижения, а ограничения на объемы передвижений по городу в целом $A^k$, для каждого способа $k$ вводятся путем добавления дополнительных ограничений вида:

$$\sum_{i,j} x_{ij}^k = A^k,\ k = 1,\ldots,\mathrm{L} \qquad (2.8)$$

Ограничения (2.6) в этом случае приобретают вид:

$$\sum_{j,k} x_{ij}^k = P_i,\ i = 1,\ldots,\mathrm{nr},\ k=1,\ldots,\mathrm{L} \qquad (2.9)$$

В результате решения задачи (2.5)–(2.7) или (2.5)–(2.8) множество корреспонденций $\{x_{ij}^k\}$ «расслаивается» на $L$ отдельных матриц корреспонденций (в нашем случае $L$=2), каждая для своего вида передвижения.

Различия в распределении по территории мест приложения труда для разных отраслей занятости, а также неоднородность населения по уровню автомобилизации и отношению к параметрам передвижения приводят к необходимости разделения корреспонденций по отдельным отраслям. Если, например, не отделить студентов высших и средних учебных заведений и их места обучения в отдельную отрасль, возникает возможность заметного искажения корреспонденций, связанная с тем, что для некоторой части студентов окажется более удобным работать на близлежащих предприятиях, а их места в учебных заведениях займут трудящиеся, живущие в окрестности этих заведений. Поэтому при проведении транспортных расчетов, как правило, одновременно осуществляется разделение объемов прибытий и отправлений по отраслям и построение соответствующего множества пар матриц корреспонденций.

Несмотря на то, что традиционным показателем затрат при межрайонных корреспонденциях являются затраты времени на передвижение, в настоящее время не менее существенную роль играют и денежные затраты. Схема моделирования корреспонденций, основанная на энтропийном подходе, позволяет ввести в модель учет влияния таких затрат, аналогично учету затрат времени. Кроме того, стремительный рост индивидуального транспорта и связанных с этим проблем может вызвать появление различного рода комбинированных способов передвижения и дополнительному «расслоению» корреспонденций.

Распределение корреспонденций по величине затрат времени, задаваемое функцией тяготения, с учетом ограничений, налагаемых функционально-планировочной структурой города, представляется в виде «кривой расселения», рассчитываемой на этапе моделирования межрайонных корреспонденций. Вид «кривой расселения» индивидуален для каждого города; также он может варьироваться в зависимости от параметров транспортной системы, системы расселения и распределения мест приложения труда (рис.2.7). Как видно на приведенных графиках, характер «кривых расселения» для агломераций Перми и Краснодара свидетельствует, что здесь системы расселения, мест приложения труда и транспортная система сбалансированы в целом достаточно хорошо, т.е. города представляют собой упорядоченный «пространственно-временной» комплекс. Это характерно для крупных городов с исторически сложившимся сильным центром и сбалансированными системами жизнедеятельности, когда только небольшой удельный вес корреспонденций совершается с затратами времени до 10-15-минут и более часа.

Другой пример пространственной организации демонстрируют агломерации Сочи и Петрозаводска. Значительная протяженность городской территории, изрезанность ландшафта и «поселковость» функционально-планировочной структуры порождают несколько пиков на «кривой расселения». Так, Сочи, по сути, представляет собой двухъядерную агломерацию. Петрозаводск же, в свою очередь, в планировочном отношении распадается на несколько достаточно изолированных крупных жилых

массивов, а небольшие размеры города не позволяют нивелировать эти особенности, что и отражается на форме «кривой расселения».

Важной характеристикой городской среды, которую необходимо учитывать как при подготовке исходных данных, так и при классификации передвижений, является многообразие видов деятельности, представленных в городе. Если в XIX веке число возможных видов занятий достигало 5 тысяч, в XX веке превышало 20 тысяч [10], то в XXI веке виды деятельности стали еще многообразнее. В течение длительного времени при разработке транспортных моделей принималось упрощающее предположение о том, что система мест приложения имеет однородную структуру. То есть отраслевая структура мест приложения труда в разных районах принималась одинаковой, и считалось, что все жители города, занятые в разных отраслях, одинаково реагируют на затраты, связанные с межрайонными передвижениями. Сейчас, в частности, в информационно-программном комплексе Citraf, учитываются не только особенности территориального размещения мест приложения труда разных отраслей и времени осуществления корреспонденций, но и различия в уровнях автомобилизации, подвижности и других показателях. Например, разные социальные группы и профессии характеризуются различиями в долях передвижений на индивидуальном транспорте при трудовых и деловых поездках ($Ku$). В экспериментальных расчетах для уровня автомобилизации равного 0,21 получены следующие значения этого показателя для шести отраслевых групп: промышленность ($Ku$=0,12), торговля (0,35), социальное и культурно-бытовое обслуживание населения, образование (0,18), банки и управление (0,44), студенты (0,10), прочие (0,20).

При моделировании отраслевой структуры мест приложения труда предполагается, что для каждого жителя города взаимозаменяемыми являются рабочие места только той отрасли $m$, в которой он занят, следовательно, возможность его выбора ограничена не общим количеством рабочих мест в районе $b_j$, а только количеством рабочих мест района в соответствующей отрасли $b_j^m$. Соответственно, и в районе отправления $i$ этот выбор осуществляют только $a_i^m$ жителей, которые заняты в отрасли $m$. В результате, как было сказано выше, в модели формируется набор матриц корреспонденций по числу принятых отраслевых групп и способов передвижения внутри каждой группы [30].

## 2.4.Выбор способа передвижения

Современная практика развития городов мира демонстрирует все возрастающую взаимосвязь между подсистемами индивидуального и общественного транспорта, поэтому одним из определяющих параметров при построении моделей транспортных систем городов становится распределение передвижений по видам транспорта. При этом в ряде случаев необходимо учитывать также возрастающую роль пешеходного и велосипедного движения

в городах. Величина доли передвижений на индивидуальном транспорте варьируется по территории и зависит от социального и профессионального состава проживающего и работающего населения, средней дальности поездки, возможностей парковки и т.д.

Можно выделить основные факторы, влияющие на выбор вида передвижения, главным образом, между индивидуальным и общественным транспортом:

1. Характеристики человека совершающего поездку
- Владение автомобилем,
- Наличие водительского удостоверения,
- Структура семьи,
- Уровень дохода,
- Потребность в автомобиле в течение дня.

2. Характеристики поездки
- Цель и тип поездки,
- Время совершения поездки.

3. Характеристики транспортного предложения
- Время в пути,
- Стоимость поездки,
- Доступность парковок,
- Комфорт и удобство,
- Надежность и регулярность,
- Защищенность и безопасность.

В упрощенном виде в модели может задаваться зависимость предпочтений жителей в выборе видов транспорта (процент пользования ГОТ) в зависимости от соотношения затрат времени на передвижение на общественном и индивидуальном транспорте (рис.2.8).

## 2.5.Моделирование потокораспределения в сети

На четвертом этапе моделирования городской транспортной системы строятся потоки, реализующие полученные ранее матрицы корреспонденций. Основной содержательной предпосылкой модели расчета потокораспределения является следующая гипотеза: выбор участниками движения пути следования определяется затратами на передвижение и осуществляется последовательным выбором в каждом промежуточном узле транспортной сети направления, обеспечивающего наилучшие условия дальнейшего движения. Другими словами, выбор пути следования определяется предстоящими затратами и не зависит от предыстории движения. Из этого следует, что участники движения, имеющие общий район прибытия и выбравшие одинаковый способ передвижения, попав в любой промежуточный узел сети, объединяются в общий поток и в дальнейшем ведут себя одинаково, независимо от того, как они в этот узел попали (такие потоки на графах называют однопродуктовыми).

Принципиально важным является то обстоятельство, что каждый из участников движения самостоятельно принимает решение о выборе пути следования. Таким образом, формирование общего потокораспределения носит стихийный характер. Возникающий при этом «стихийный спрос» на использование отдельных элементов транспортной сети может превысить их возможности, в результате чего условия движения по ним могут заметно ухудшиться, и участники движения будут вынуждены искать альтернативные пути следования.

При такой предпосылке прогнозным потокораспределением в модели оказывается равновесное потокораспределение, то есть такое распределение потоков по дугам сети, что при порожденных им затратах времени на дугах ни один из участников движения не может уменьшить затрат времени на передвижение к пункту назначения, изменив путь следования. Если бы пропускные способности участков сети были неограничены или, что то же самое, например, затраты времени на проезд по участкам сети не зависели от величины потока, то реализация матрицы корреспонденций по кратчайшим путям, связывающим фокусы потокообразования и потокопоглощения, определила бы решение задачи. Учет нагрузочного эффекта, т.е. учет зависимости времени проезда по дуге от величины нагрузки на нее требует решения специальной задачи на поиск равновесия. Для отыскания равновесного потока в ситуации зависимости времени проезда от величины потоков разработан специальный расчетный алгоритм, реализующий итеративную схему отыскания неподвижной точки некоторого специального отображения. Потокораспределение на первой итерации формируется по кратчайшим путям в условиях незагруженной сети, то есть время движения по каждой дуге вычисляется исходя из ее длины и максимально разрешенной скорости.

Рассмотрим упрощенную схему построения потоков на следующем примере с одной матрицей корреспонденций. Транспортная сеть представляется в виде графа $G=(N,A)$, где множество вершин $N$ соответствует основным узлам транспортной сети, а множество дуг $A=\{n,m\}$ соответствует элементам улично-дорожной сети. Выбор корреспондирующих районов уже состоялся при построении матриц.

Для учета провозной способности транспорта и пропускной способности магистралей сети предполагается, что затраты времени $t_{nm}$ на переход по дуге $(n,m)$ транспортного графа зависят от интенсивности потока $z_{mn}$ на нем (т.е. $t_{nm} = t(z_{mn})$) и монотонно увеличиваются с ростом $z_{mn}$. Заметим, что

$$z_{mn} = \sum z_{mn}^{l},\ l = 1 \ldots nr,$$

поскольку мы имеем дело с многопродуктовым потоком $Z=\{z_{mn}^{l}\}$, в котором каждый район-сток $l$ порождает индивидуальный тип потока. Таким образом,

каждый поток $Z=\{z_{mn}^{l}\}$ порождает на дугах графа затраты времени $T=\{t_{mn}\}$, т.е. $T=T(Z)$.

Будем считать, что каждый из участников движения стремится выбрать для себя кратчайший путь, ориентируясь на затраты времени, являющиеся, как следует из сказанного выше, результатом аналогичного поведения всех остальных участников движения. В результате возникает поток, формирование которого обусловлено затратами времени $T=\{t_{mn}\}$ т.е. $Z=Z(T)$. Результатом расчета является поток $Z^*$, обладающий свойством равновесия т.е. поток $Z^*$ формирует на дугах графа такие затраты времени, при которых каждый отдельный участник движения в этом потоке движется по кратчайшему для себя пути и не заинтересован в его изменении, поскольку при этом он может только проиграть т.е. $Z^*=Z(T^*=T(Z^*))$. Обозначим через $T_n^l(Z)$ наименьшие затраты времени необходимые для достижения из узла $n$ потоком типа $l$ своего стока. В соответствии с вышесказанным искомый поток $Z^*$ должен обладать следующим свойством:

из $z^*_{mn}{}^{l} > 0$ следует $T_m^l(Z^*) = t(z^*_{mn}) + T_n^l(Z^*)$ (2.10)

Поскольку $Z^*$ является потоком, то естественно предполагается, что для множества чисел $\{z^*_{mn}{}^{l}\}$ должны выполняться условия неразрывности в вершинах графа (т.е. сумма всех втекающих в вершину потоков равна сумме всех потоков покидающих ее). Интересно отметить, что при сделанных относительно $t_{nm}=t(z_{mn})$ предположениях и справедливости условий (2.10), искомый равновесный поток является решением выпуклой задачи на минимизацию функционала:

$$\sum_{(n,m)} \int_0^{z_{mn}} t_{nm}(s)\, ds \Rightarrow \min, \qquad (2.11)$$

$$z_{mn} = \sum z_{mn}^{l},\ l = 1 \ldots \mathrm{nr}$$

при выполнении для $\{z_{mn}^{l}\}$ условий неразрывности потока. Для решения задачи (2.11) можно использовать итеративные алгоритмы, реализующие метод возможных направлений.

Несмотря на ее простоту, описанная схема является достаточно универсальной. В частности, переход к моделированию отраслевых корреспонденций увеличивает только степень «многопродуктовости» т.е. количество индивидуальных типов потока, которые нужно пропустить по сети. Более существенные сложности возникают при моделировании различных способов передвижения. При моделировании передвижений на общественном транспорте мы имеем дело с потоком пассажиров, а на индивидуальном транспорте – с потоком автомобилей. В этом случае прямое суммирование таких потоков для получения общей нагрузки $z_{mn}$, в частности,

на дугах улично-дорожной сети, должно быть заменено более сложной процедурой, в которой потоки будут приведены сначала к неким общим условным единицам и только потом просуммированы. Другое усложнение связано с вычислением затрат времени на передвижение по дуге. Функция $t(z_{mn})$ также должна быть заменена процедурой, которая будет генерировать две величины затрат времени, каждую для своего способа передвижения, поскольку скорости передвижения на общественном и индивидуальном транспорте в общем потоке на дуге улично-дорожной сети, как правило, существенно отличаются.

На рис.2.9 представлен пример картограммы интенсивности потоков.

Методика расчета потоков в сети общественного пассажирского транспорта имеет свои особенности. Для наземного общественного транспорта временные задержки на сети зависят не столько от пассажиропотока, сколько от суммарного автомобильного потока на дугах и технических характеристик транспортных средств перевозки пассажиров. Кроме того, дополнительные задержки в сети как наземного, так и внеуличного транспорта проявляются, главным образом, в местах посадки пассажиров.

При расчете транспортных потоков с участием грузового и общественного пассажирского транспорта необходимо учитывать влияние их габаритов и маневренности на характеристики потока, что осуществляется через использование коэффициентов приведения транспортных средств к легковому автомобилю (коэффициенты приведения в России регламентируются, в частности, СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги»; рекомендуемые значения приведены в ОДМ 218.2.020-2012 «Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог»).

Модели, описываемые в настоящем издании, относятся к классу статических, для которых загрузка моделируется в терминах усредненных характеристик движения на выбранный период времени. В случае, когда динамика выезда меняется достаточно быстро, а маршруты движения достаточно длинные, необходимо учитывать, что разные участники движения загружают участки сети в разное время. Такие модели, в которых явно описывается динамика расчетных величин в течение периода моделирования, называются динамическими.

# 3. ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ

## 3.1. Применение геоинформационных технологий в транспортном моделировании

В отличие от транспортно-градостроительных моделей прошлых лет, когда разработчики сами создавали графический интерфейс для работы с данными, в настоящее время программные средства транспортно-градостроительного моделирования зачастую разрабатываются на базе геоинформационных систем. Нужно отметить, что как в научно-технической литературе, так и в лексиконе проектировщиков понятие ГИС имеет двоякое толкование – ГИС как информационная система и ГИС как программное средство [9]. Согласно одному из классических определений, геоинформационная система – это аппаратно-программный человеко-машинный комплекс, обеспечивающий сбор, обработку, отображение и распространение пространственно-координатных данных, интеграцию информации и знаний о территории для их эффективного использования при решении научных и прикладных задач, связанных с инвентаризацией, анализом, моделированием, прогнозированием, управлением окружающей средой и территориальной организацией общества. ГИС по своему назначению являются аналитическим инструментом и должны обладать развитыми средствами анализа данных, на основе результатов которого может быть получена новая информация, построена новая карта, созданы базы географических данных.

ГИС классифицируются [14]:

1. по аппаратному обеспечению и функциям:
   - универсальные (полнофункциональные) ГИС; предполагают различные предметные области, обширный функционал, сетевую эксплуатацию. Примеры – Intergraph, ArcGIS;
   - специализированные ГИС; применяются для решения определенных задач;
   - информационно-справочные ГИС (включая учебные): не обладают развитыми средствами анализа. Пример – MapInfo.
2. По проблемной ориентации:
   - экологические и природопользовательские;
   - отраслевые (водных ресурсов, лесопользования, геологические, туризма и т.д.);
   - инженерные (проектирование сооружений);
   - имущественные (для обработки кадастровых данных);
   - инвентаризационные;
   - для тематического и статистического картографирования.
3. По архитектуре: закрытые (нет возможностей расширения, встроенных языков) и открытые.

ГИС используются во многих отраслях деятельности, в том числе в городском планировании и управлении землепользованием, в навигационных системах, здравоохранении, местном и национальном управлении, экологическом моделировании и анализе, сельском хозяйстве, метеорологии, океанографии и моделировании атмосферных явлений, бизнес-планировании, архитектуре, телекоммуникации, криминологии, в авиации и на морском транспорте.

В российских проектных организациях, занимающихся проблемами градостроительства и транспортного планирования, используются ГИС как зарубежных, так и отечественных производителей. Наиболее распространенные программные продукты – MapInfo (MapInfo Corporation, США), ArcGIS (ESRI, США), Zulu (ООО «Политерм», С.-Петербург), ИнГео (ЦСИ «Интегро», Уфа).

Данные в ГИС могут представляться в векторной или растровой форме. Векторная форма предполагает послойное хранение территориально распределенной информации в виде графических примитивов (точечные, линейные, полигональные объекты); пространственные объекты в этом случае представляются в виде набора координатных пар в выбранной системе координат. Свойства объектов могут описываться числовыми или символьными атрибутами, поставленными в соответствие графическим объектам (рис.3.1).

Функциональные возможности ГИС предоставляют ряд преимуществ как для подготовки исходных данных, так и для анализа результатов моделирования. При работе с информационной базой моделирования используются все типы векторных графических объектов – точечные объекты («привязки» и «центроиды» транспортных районов), линейные объекты (элементы графа транспортной сети), полигональные объекты (транспортные районы). Возможность работы с атрибутивной информацией также активно используется при подготовке и анализе данных модели.

## 3.2.Моделирование территориально-транспортной системы

Единая модель структуры улично-дорожной сети и сети общественного пассажирского транспорта строится на основе транспортных графов (рис.3.2).

В геоинформатике используется следующее определение графа [9]: граф – это конечное множество вершин, соединенных ребрами. В транспортно-градостроительном моделировании используются связные ориентированные графы. Граф называется ориентированным, если каждое ребро имеет определенное направление; ребро, допускающее движение в обоих направлениях, называется симметричным. Граф является связным, если любые две его вершины могут быть соединены цепочкой ребер. Наряду с терминами «граф», «вершина», «ребро» используются соответственно термины-синонимы «сеть», «узел», «дуга». Поскольку словосочетание

«транспортная сеть» является более привычным чем «транспортный граф», употребление указанных синонимов весьма распространено. Поэтому в дальнейшем возможно употребление и тех и других терминов, что никак не меняет содержательного смысла изложения.

В ГИС графы представляются в виде слоев, дуги графа моделируются с помощью полилиний. Одна полилиния соответствует, как правило, одной дуге графа, представляющей участок улично-дорожной сети или перегон скоростного рельсового транспорта. Важным свойством дуги является ее направленность; от начального узла к конечному направление считается «прямым», от конечного к начальному – «обратным». Поскольку, как правило, дуги являются симметричными, в атрибутивных данных слоя организуются две группы параметров: первая – для прямого направления, вторая – для обратного. Перед началом построения графа рекомендуется определить общие правила установления направлений улиц и дорог с учетом планировочной структуры города (например, с юга на север и с востока на запад, от центра и по часовой стрелке относительно центра, вдоль течения реки и от берега реки).

Для представления в городской транспортной модели улично-дорожной сети и сети ГОТ, как правило, проводится агрегирование транспортного графа, т.е. выделение наиболее значимых в транспортном отношении элементов. Для получения первоначального варианта агрегированного графа целесообразно пользоваться имеющейся классификацией улиц и дорог.

Дуги графа, имитирующие пересекающиеся с образованием узлов элементы транспортной сети, должны быть стянуты в месте пересечения (примыкания) в одну точку. Дугам графа ставятся в соответствие параметры, представленные в числовом или текстовом формате данных, например:

- код дуги;
- название улицы;
- название участка;
- максимально разрешенная скорость движения;
- ширина проезжей части для каждого из направлений;
- признак одностороннего / двустороннего движения;
- наличие трамвайных путей, совмещенных с проезжей частью.

Метрополитен, железная дорога и другие виды внеуличного пассажирского транспорта представляются, как правило, в виде отдельных подграфов, т.е. подмножеств транспортного графа. При этом для обеспечения их связности между собой и с другими подграфами модели используются условные дуги пересадочных узлов, которые имитируют задержки на ожидание и подход к вестибюлю метро или железнодорожной станции. В качестве примера на рис.3.3 представлена модель пересадочного узла на площади Восстания в С.-Петербурге, в котором пересекаются пригородная железная дорога, метрополитен и наземный пассажирский транспорт. Здесь, помимо дуг, имитирующих линии метрополитена, железных дорог и наземного транспорта, представлены 6 типов условных дуг:

- дуги, имитирующие передвижение на эскалаторах;
- дуги, имитирующие подходы к наземным вестибюлям станций метрополитена;
- дуги, имитирующие переходы от эскалатора в подземный вестибюль;
- дуги, имитирующие подземные пешеходные переходы между линиями метро;
- дуги, имитирующие подходы к станциям железной дороги;
- дуги, имитирующие пересадки со станций метро на станции железной дороги.

Аналогично в виде отдельных подграфов в модели могут быть представлены скоростные дороги, магистрали непрерывного движения, а также проектируемые линии скоростного трамвая, ЛРТ, монорельсовой железной дороги и т.д. Трассы маршрутов наземного общественного транспорта также могут представляться в виде отдельных подграфов, однако подобный подход редко используется в моделях градостроительного уровня. Точность моделирования, особенно на средне- и долгосрочную перспективу, невысока, поэтому использование в модели трасс маршрутов может оказаться избыточным. Кроме того, в ряде транспортно-градостроительных проектов, таких как генеральные планы городов, проработка маршрутной сети не предполагается.

Все подграфы, используемые в модели, образуют многоуровневую структуру; нагрузка на транспортную сеть из транспортных районов поступает на уровень подграфа пешеходных передвижений и затем «растекается» по другим подграфам в соответствии со структурой связей между ними.

Каждая дуга графа должна иметь уникальный код. Система кодировки может быть условной, использующей, например, порядковый номер дуги, и формироваться автоматически. Практика показывает, что удобнее пользоваться системой кодировки, включающей в себя шифры названий улиц и перегонов: трудоемкость первичного наименования всех дуг в дальнейшем скомпенсируется удобством ориентирования в транспортной сети при оперативной работе с моделью.

## 3.3.Моделирование функционально-планировочной структуры

### *3.3.1. Транспортное районирование*

Согласно определению [2], под районированием понимается процесс таксонирования, при котором идентифицируемые таксоны должны отвечать по меньшей мере двум критериям: критерию специфики данного таксона и критерию единства, целостности районируемых (идентифицируемых) элементов. Выбор методов районирования зависит главным образом от целей, от объема и качества информации.

В модели для задания численных характеристик территории строится система расчетного транспортного районирования (рис.3.4). При этом нужно

отметить, что иногда в литературе, посвященной моделям, вместо терминов «транспортный район» и «транспортное районирование» могут использоваться соответственно термины «транспортная зона» и «транспортное зонирование».

В целях районирования рассматриваемая территория разбивается на районы таким образом, чтобы размеры каждого из них позволяли пренебречь объемами внутрирайонных передвижений. Каждый из транспортных районов объединяет территорию, тяготеющую к крупному транспортному узлу, назначаемому экспертным путем. Желательно, чтобы система транспортного районирования в той или иной степени поддерживала сетку административно-территориального и муниципального деления: такой подход удобен для сбора статистической информации, а также для анализа результатов моделирования. Система транспортных районов также может быть согласована с системой планировочных образований, выделяемых в рамках проекта. Каждый транспортный район имеет уникальный код; последовательность нумерации районов обычно осуществляется по правилу меандра или спирали.

Еще в 1973 году, в эпоху расцвета транспортно-градостроительных исследований в СССР, были сформулированы следующие важнейшие принципы транспортного районирования, не потерявшие своей актуальности и сейчас:

- принцип автономности района, которая определяется относительной изоляцией его от прилагающих территорий (наличие соответствующих естественных и искусственных рубежей) и обеспеченностью доступности для значительной части внутрирайонных передвижений: следует стремиться к тому, чтобы все внутрирайонные передвижения были пешеходными;
- принцип функциональной однородности использования территории района (преобладание жилой, общественной, либо промышленной застройки);
- принцип размещения «центра тяжести» района на основных транспортных магистралях: это предопределяет их прохождение через центральную часть района, а не по его периферии.

В целом же, как отмечают авторы [5], принципами транспортного районирования являются:

- универсальность с точки зрения решения разнохарактерных задач;
- перспективность (учет территориального развития);
- информативность (возможность использования отчетно-статистических данных, использования в организации и обработке результатов транспортных обследований);
- оптимальность для получения достоверных исходных данных при минимизации трудозатрат;
- увязка с административной и планировочной структурой города.

Не всегда очевиден вопрос, какие элементы планировочной структуры должны являться границами транспортных районов: очень часто в качестве границ выступают условные линии, проходящие между магистральными улицами, узлы которых являются характеристическими центрами (фокусами, «центроидами») транспортных районов.

Для построения и анализа структуры межрайонных корреспонденций рекомендуется использовать систему агрегированных транспортных районов, формируемую путем объединения расчетных транспортных районов в группы по некоему территориальному признаку (рис.3.5). В этом случае характеристические центры агрегированных районов будут выступать как узлы, для которых строится матрица корреспонденций между агрегатами. Удобство такого подхода связано с возможностью наглядного представления межагрегатных корреспонденций в виде потоковой картограммы («брошки»), в то время как слишком большое число элементов межрайонной матрицы (оно составляет $n^2$, где n – число транспортных районов) лишает такое представление наглядности (это представление иногда называют «картограмма-паук»).

В соответствии с поставленной задачей в рамках проекта агрегирование транспортных районов может осуществляться по-разному, в некоторых случаях в рамках одного проекта может использоваться несколько систем агрегирования. Например, при разработке раздела развития транспортной инфраструктуры в составе Генерального плана С.-Петербурга для анализа транспортных связей между основными планировочными районами было сформировано две системы агрегированных транспортных районов:

1. Центр Петербурга + 5 секторов по направлениям: для анализа внутригородских связей.
2. Ядро Петербургской агломерации + 5 секторов по направлениям: для анализа внешних и агломерационных связей.

Подача нагрузки от транспортных районов, полученных на этапе генерации передвижений, на граф сети может осуществляться посредством условных дуг «привязки», соединяющих условные центры районов, являющиеся источниками (фокусами потокобразования) и стоками (фокусами потокопоглощения), с узлами транспортной сети. Затраты времени на этих дугах можно интерпретировать как затраты на пеший подход к узлам сети. Дуги «привязки» могут назначаться как экспертным путем с учетом неравномерности внутрирайонного распределения мест проживания и мест приложения труда, так и автоматически – в этом случае нагрузка равномерно распределяется между всеми узлами сети в пределах транспортного района.

В применявшихся до недавнего времени методиках транспортно-градостроительных расчетов использовалось упрощающее предположение, состоящее в том, что нагрузка поступает в сеть в центрах транспортно-планировочных районов. Такой подход приводил, как правило, к неоправданному завышению потоковой нагрузки на участках сети,

примыкающих к центрам районов. Напротив, задание слишком большого количества центров потокообразования нерационально в вычислительном отношении и затруднительно с точки зрения формирования исходной информации.

### *3.3.2. Определение внешних границ территории моделирования*

Поскольку, как было сказано выше, на градостроительном уровне моделируется замкнутая система передвижений, в первую очередь, трудовых, система транспортного районирования того или иного города обычно строится в пределах городской агломерации. Существует множество определений понятия агломерации, также как и критериев ее выделения; в России, за редким исключением, граница агломерации не совпадает с административной (муниципальной) границей города.

Так, в соответствии с определением [23], под агломерацией понимается группа близко расположенных городов, поселков и других населенных мест с тесными трудовыми, культурно-бытовыми и производственными связями, особое значение среди которых приобретают маятниковые поездки. Согласно определению, принятому при разработке Генерального плана С.-Петербурга, городская агломерация – это обладающая отчетливыми признаками территориальной и функциональной целостности, относительно компактная в пространственном отношении совокупность, группа городских и сельских населенных пунктов (поселений) с прилегающими к ним межселенными территориями, объединенных в сравнительно обширную и сложную территориальную систему с многообразными, достаточно устойчивыми и интенсивными взаимосвязями.

Поскольку городская агломерация имеет поясную структуру (рис.3.6), то, в соответствии с заданными границами проектирования в качестве внешней границы территории моделирования (системы транспортных районов) выбирается тот пояс агломерации, который позволит наиболее полно учесть все внутренние связи, которые влияют на ежедневные передвижения населения, с требуемой точностью. Для учета внеагломерационных связей система районирования дополняется несколькими условными «внешними» районами («кордонами»), имитирующими связи с территорией, расположенной за пределами внешней границы системы транспортных районов. Таким образом, система становится полностью замкнутой, и обеспечивается баланс между численностью трудящихся и количеством мест приложения труда.

Особенность «внешних» районов состоит в том, что

- районы отправления и/или прибытия этих корреспонденций расположены в неопределенных местах за пределами области моделирования;

- для этих корреспонденций не определена обобщенная цена пути, поскольку неконтролируемая часть путей находится за пределами области моделирования;
- объемы прибытия и отправления для «внешних» районов не рассчитываются, а оцениваются на основе обследований интенсивности в близких сечениях.

### *3.3.3. Формирование исходной базы данных модели*

Основными данными, которые ставятся в соответствие транспортным районам, являются данные по численности населения и количеству мест приложения труда. К местам приложения труда кроме собственно рабочих мест относятся и учебные места в высших и средних учебных заведениях. Это связано с тем, что, в отличие от учащихся школ, для студентов этих учебных заведений, как правило, место учебы не связано с местом проживания, а это значит, что они участвуют в ежедневных передвижениях наряду с работающим населением.

Основным источником информации о современном распределении населения и мест приложения труда по территории являются данные статистики; возможно использование в работе иных источников, например, данных по избирательным округам и участкам. Для получения более детальной информации о размещении мест приложения труда, в частности, могут использоваться справочные издания, содержащие информацию о размещении объектов различного функционального назначения на городской территории, в которых проведена подробная функциональная рубрикация объектов и указаны адреса их расположения, что позволяет «привязывать» объекты к территории и к отраслям. Используя рубрикаторы, можно сформировать для объектов разных отраслей нормативные показатели количества рабочих мест в зависимости от функционального использования территории.

Формирование исходных информационных массивов на перспективу производится на основании принятых документов территориального планирования, отраслевых программ и другой проектной документации. Для каждого транспортного района прогнозируется численность населения на последующие годы, для которых будут рассчитываться параметры потокораспределения в модели (рис.3.7). Используя нормативные показатели плотности использования территории для этих функций, можно прогнозировать численность населения. Источником информации о размещении мест приложения труда на перспективу также может служить схема функционального зонирования территории в составе генерального плана города; территориальное распределение жилых, общественно-деловых, производственных и иных зон предполагает свою специфику землепользования, на основании чего может прогнозироваться размещение рабочих мест по отраслям.

Помимо указанной выше информации во входном информационном массиве модели могут использоваться данные социологических обследований населения, по результатам которых можно получить информацию о структуре целевых передвижений, предпочтениях населения при выборе способа передвижений, уровне подвижности населения на индивидуальном и общественном транспорте и т.д.

Исходные информационные массивы транспортных моделей также содержат блок общих параметров, описывающих основные закономерности формирования транспортных потоков. К таким параметрам относятся, например, зависимость скорости движения от величины потока, параметры функции тяготения и т.д.

### 3.4.Калибровка модели

В целях получения достоверных результатов моделирования для решения транспортно-градостроительных задач необходимо провести калибровку модели современного состояния транспортной системы по результатам натурных и социологических обследований, а также иной информации («модель базового года»). Калибровка модели проводится как на уровне интегральных показателей функционирования транспортной системы (статистика по средним затратам времени на передвижение, средним скоростям, данные по суммарным пассажирооборотам по видам ГОТ, интегральные результаты социологических опросов и т.д.), так и на уровне объектных параметров (данные по интенсивности автомобильных и пассажирских потоков, пассажирообороты узлов и т.д.). По результатам калибровки уточняются параметры входного информационного массива модели, используемые для всего цикла модельных расчетов в рамках конкретного проекта. Опыт моделирования показывает, что оптимальной стратегией является двухэтапная схема калибровки: на первом этапе калибруются интегральные показатели, на втором – объектные.

Калибровка на уровне интегральных показателей – это контроль ряда параметров, характеризующих работу транспортной системы в целом или ее укрупненных составных частей. Процедура калибровки состоит в итеративном изменении параметров модели для выявления оптимальных значений параметров по критерию соответствия достоверным интегральным параметрам функционирования транспортной системы. Калибровка модели на этом уровне состоит из следующих этапов:

- анализ достоверным интегральным параметрам функционирования транспортной системы;
- выбор калибруемых параметров и принятие их величины на основании предыдущего опыта моделирования;
- проведение серии расчетов потоков с назначением калибруемых параметров с некоторым шагом вокруг принятого значения;
- сравнение результатов моделирования с достоверными данными;

- определение значений калибруемых параметров.

Следует отметить, что количество калибруемых параметров определяется числом используемых для калибровки критериев, набор которых ограничен числом взаимосвязанных моделей, используемых в рамках проекта.

На уровне объектных показателей калибровка осуществляется путем подбора и корректировки параметров улично-дорожной сети, сети общественного пассажирского транспорта, а также транспортных районов для достижения достоверных значений транспортных и пассажирских потоков на сети, а также на перегонах и пересадочных узлах внеуличного транспорта. Помимо подбора значений численных характеристик на данном этапе возможна также корректировка топологии сети и «привязок» транспортных районов. Нужно отметить, что если задача калибровки на уровне интегральных показателей может решаться как в ручном, так и в автоматическом режиме, то калибровка локальных показателей требует работы эксперта, который сможет правильно оценить реакцию модели на изменения параметров конкретных элементов сети.

Выбор же методики обследования для получения необходимой информации для калибровки основывается на достижении требуемого уровня точности с учетом допущений, принятых при формировании модели. При всех методах обследования для уменьшения трудоемкости сбора необходимо максимально ограничивать объем получаемой первичной информации, обеспечивая в то же время достаточную степень достоверности и надежности получаемых результатов.

Наиболее ценную комплексную информацию для калибровки можно получить при организации тотальных исследований транспортного поведения населения города. Например, в 1970 году единственный раз при проведении переписи населения в опросные листы была включена форма, фиксировавшая трудовые передвижения между местами жительства и работы, что позволило в то время получить детальную информацию о составе и количественных характеристиках межрайонных корреспонденций. В последние годы активно внедряются технологии автоматического контроля автотранспортных и пассажирских потоков, например, сбор информации об автомобильных потоках путем установки специальных датчиков на улично-дорожной сети, отслеживание всех входящих пассажиров с использованием валидаторов и т.д. В ряде стран в качестве источника информации для калибровки модели используются данные сотовых операторов, что позволяет не только получить информацию о распределении населения (эта информация используется для формирования исходного массива модели), но и сразу построить достоверную матрицу ежедневных передвижений; в России применение такого подхода находится в начальной стадии.

Как показывает практика, для исследования интенсивности автомобильных и пассажирских потоков в целях калибровки модели города (агломерации) эффективно использование результатов обследования,

проводимого одновременно на всех видах транспорта вдоль протяженных границ крупных планировочных зон города. При этом посты обследования организуются на всех входах, пересекающих указанные границы, включая железные дороги и метрополитен. Преимущество такого метода заключается в том, что при сравнительно небольших затратах можно получить суммарный объем автомобильных и пассажирских корреспонденций между укрупненными зонами (центр города, ядро агломерации, пригородная зона) [31]. Результатом обследования автомобильных потоков при таком подходе являются объемы автомобильных перевозок по типам транспортных средств. Результатом обследования пассажиропотоков являются объемы пассажироперевозок, осуществляемых пригородным железнодорожным транспортом, метрополитеном, наземным пассажирским транспортом, а также индивидуальным автомобильным транспортом (рис.3.8). Такой подход применялся, в частности, в рамках работ по аналитическому обеспечению принятия проектных решений в области транспортной инфраструктуры в составе Генерального плана С.-Петербурга.

В дополнение к натурному обследованию в ряде случаев целесообразно предпринимать социологические исследования потребности жителей в использовании индивидуального и городского пассажирского транспорта. Например, такое исследование, проведенное в рамках разработки Генерального плана С.-Петербурга, было основано на домашнем интервьюировании респондентов, распределенных по территории города и пригородов согласно принципам квотной выборки в соответствии с пространственным распределением населения и его половозрастной структуры.

# 4. МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВЕ И ТРАНСПОРТНОМ ПЛАНИРОВАНИИ

## 4.1. Задачи, решаемые с помощью методов математического моделирования

### *4.1.1. Группы решаемых задач*

С помощью методов математического моделирования решается широкий круг задач в области транспортно-градостроительного проектирования. С точки зрения организации работы с моделью можно выделить следующие группы решаемых задач [16]:

1. Выявление существенных особенностей действующей транспортной системы.
2. Оценка последствий принятия решений по развитию транспортной системы.
3. Определение параметров объектов транспортной инфраструктуры на основе анализа спроса на передвижения.

Также моделирование может использоваться и для решения других задач в сфере транспортно-градостроительного проектирования и территориального анализа.

В целом, стадия постановки задачи, решаемой с использованием методов математического моделирования, включает [1]:

- уяснение целей поставленной задачи и предварительную оценку возможных результатов ее решения;
- определение соответствующего целевого критерия (критерия эффективности, показателя качества, целевой функции);
- формулировку задачи в соответствии с поставленными целями.

### *4.1.2. Выявление существенных особенностей действующей транспортной системы*

Определение основных параметров действующей городской транспортной системы проводится на этапе анализа современного состояния и комплексной оценки территории в составе градостроительной документации и документации транспортного планирования. В ходе решения этой задачи посредством моделирования определяется ряд интегральных и зональных (относящихся к планировочной зоне или административной единице) показателей функционирования транспортной системы, таких как: средние затраты времени на передвижение по сети, общий объем передвижений, доля использования индивидуального транспорта, среднее время достижения центра города и т.д. Анализ картограмм транспортных потоков и численных объектных показателей позволяет определить неудовлетворенный спрос на передвижения, выявить «узкие места», т.е. те участки и узлы транспортной сети, которые могут испытывать нагрузки близкие к их пропускной

(провозной) способности. Анализ результатов моделирования позволяет оценить современное состояние транспортной системы для определения приоритетов в разработке проектных мероприятий, как в отношении самой транспортной системы, так и в отношении функционально-планировочной структуры города (рис.4.1).

Решение таких задач актуально для различных видов документации: генеральные планы, отраслевые схемы, ПКРТИ, КСОДД и т.д.

### *4.1.3. Оценка последствий принятия решений по развитию транспортной системы*

Экспертиза проектных решений по развитию транспортной системы – наиболее часто встречающаяся задача, возникающая в ходе работы решения задач транспортного планирования. Эта задача решается посредством анализа полученных в ходе прогнозирования показателей функционирования транспортной системы. Как правило, использование модели направлено на выбор оптимального с точки зрения заданных критериев проектного решения путем сравнения нескольких вариантов, подготовленных в рамках одного проекта – так называемый сценарный или вариантный подход.

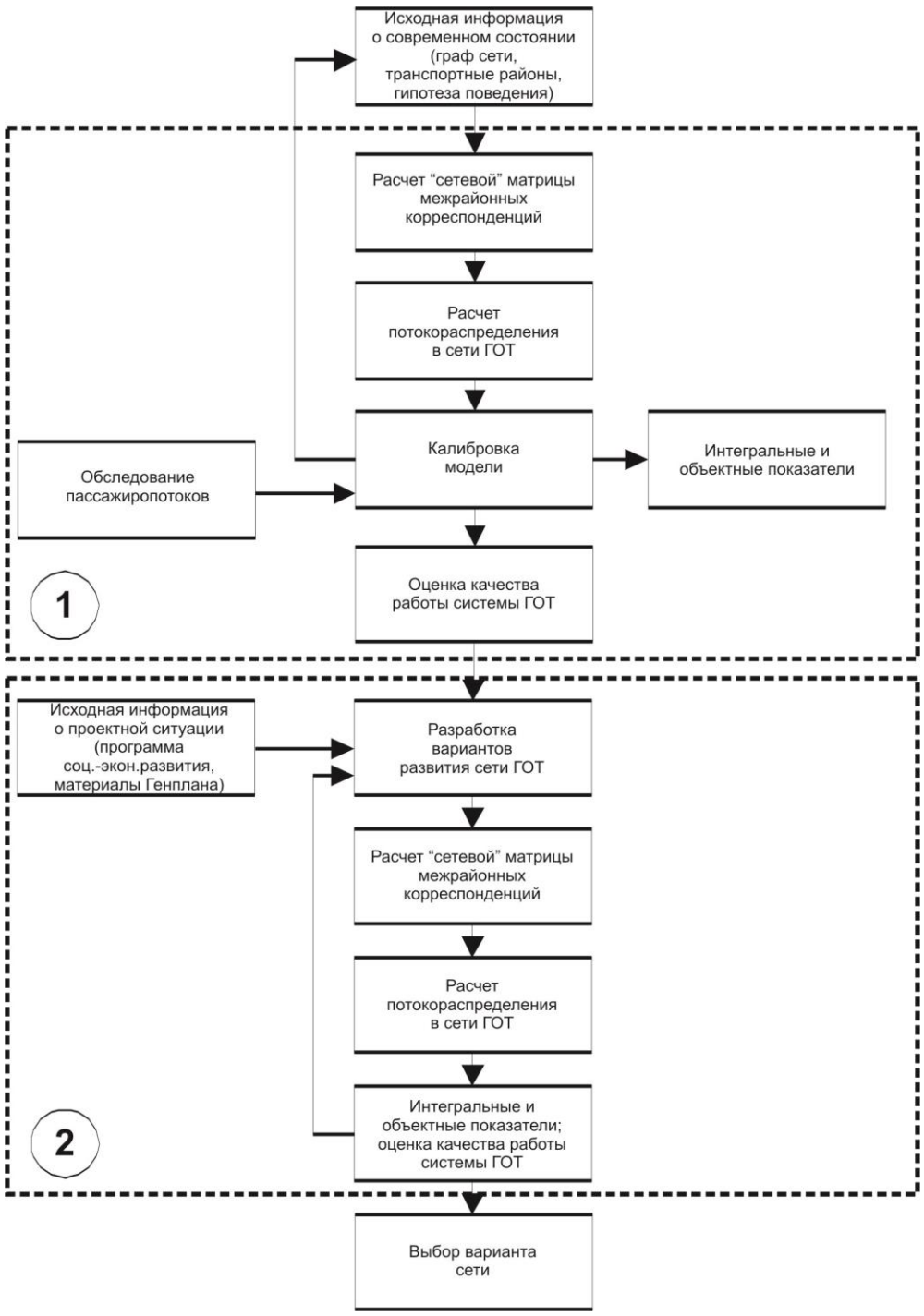



Рисунок 4.2 – Методика моделирования в рамках транспортно-градостроительных проектов (модуль 1 – моделирование современного состояния транспортной системы и оценка качества ее работы, модуль 2 – разработка вариантов развития сети на перспективу и выбор оптимального варианта по ряду критериев)

Иногда применяется сравнение с существующей ситуацией или между альтернативными проектами. Для сравнения также могут использоваться варианты развития системы расселения и мест приложения труда, оцениваемые с позиции транспортных и градостроительных факторов. Важно, чтобы варианты были сравнимыми, т.е. использование одних и тех же

критериев могло дать адекватную оценку функционирования транспортной системы во всех рассматриваемых случаях.

На рис.4.2 приведена общая схема применения моделей в рамках разработки транспортно-градостроительной документации.

Последствия принятия тех или иных проектных решений оцениваются на основе системы критериев, выработку которой целесообразно осуществлять с учетом особенностей целей и задач конкретного проекта. Критерии могут отражать как реакцию транспортной системы (нагрузка на транспортную сеть и ее элементы, факторы времени, показатели транспортной работы и т.д.), так и изменения параметров доступности территории. Для проектов уровня генерального плана города сравнение вариантов возможно на основе параметров матрицы межрайонных корреспонденций, которые, в отличие от подробных картограмм потоков, отражают расчетную нагрузку в сечениях сети на одну, а чаще – в сумме – на несколько магистральных улиц или линий общественного транспорта, соединяющих планировочные районы по альтернативным трассам [27].

### *4.1.4. Определение параметров объектов транспортной инфраструктуры на основе анализа спроса на передвижения*

Одним из направлений применения методов математического моделирования является анализ спроса на передвижения и определение на его основе параметров объектов транспортной инфраструктуры. В качестве таких параметров могут выступать: требуемое количество полос движения, предпочтительное размещение мостов и путепроводов, требуемое количество эскалаторов на станциях метрополитена, необходимая частота движения общественного пассажирского транспорта и т.д. Отличием данной задачи от предыдущей является то, что на параметры искомых элементов (участки УДС, мосты, линии ГОТ) не накладывается ограничений по пропускной и провозной способности. То есть для участков улиц в модели задается «бесконечная» ширина, для эскалаторов – «бесконечное» количество, для линий ГОТ – «бесконечная» частота движения (рис.4.3). Иногда в целях изучения планировочной структуры города даже снимаются ограничения по всем элементам сети, за счет чего можно определить наиболее востребованные направления потоков, в частности, транзита.

Задачи по определению спроса возникают, как правило, при работе над проектами планировки крупных планировочных образований, проектировании объектов массового посещения или крупных производственных зон. Тем не менее, во всех этих случаях важно использовать модель, построенную для всей городской агломерации, а не для локального участка, тяготеющего к проектируемой территории или объекту. Только так можно обеспечить адекватное распределение корреспондентов между пунктами тяготения на этапе построения матрицы корреспонденций.

## 4.2.Обработка результатов моделирования

Как было сказано выше, по результатам моделирования транспортной системы города (агломерации) определяются следующие три группы показателей, которые являются основой для анализа ее функционирования:

- интегральные показатели;
- зональные показатели;
- объектные показатели.

Важным элементом анализа результатов моделирования является вопрос оценки качества работы транспортной системы. Каким образом, анализируя полученные численные показатели, можно дать качественную оценку сложившейся или проектируемой транспортной системе? И каков приоритет показателей при такой оценке?

При ответе на эти вопросы можно ориентироваться на действующие нормативные документы. В то же время, нормируемые параметры охватывают далеко не весь спектр показателей, характеризующих состояние транспортной системы. Поэтому проектировщику при проведении качественной оценки необходимо ориентироваться не только на нормативы, но и на особенности выполняемого проекта, современные представления о качестве транспортных услуг, социально-экономическую эффективность, а также учитывать объемы капиталовложений в строительство и реконструкцию тех или иных транспортных объектов, факторы безопасности движения и влияния на окружающую среду.

Существуют много исследований, посвященных отбору и классификации критериев оценки качества функционирования транспортной системы. Так, согласно [7], общая система показателей состояния транспортных систем городов включает семь групп: планировочные, показатели интенсивности движения, финансовые, перевозочные, показатели подвижности, показатели соотношения общественного и частного транспорта, показатели воздействия транспорта на внешнюю среду.

Многие из градостроительных, социальных, транспортных, экономических и экологических факторов оценки вариантов развития транспортных систем в городах при разработке генеральных планов и другой документации могут быть оценены только в баллах. В качестве примера приведем результаты исследования [32], в ходе которого методом экспертной оценки, были получены приоритеты основных показателей качества работы сети ГОТ и магистральной УДС. Так, при оценке значимости работы магистральной УДС показатели выстроились в следующем порядке приоритета в соответствии с набранными баллами по десятибалльной шкале (табл.4.1).

Таблица 4.1 – Показатели качества работы магистральной УДС

| Показатели | Баллы |
|---|---|

| | |
|---|---|
| Суммарные затраты времени на передвижения, мин | 8 |
| Часовая суммарная пропускная способность, тыс.авт.в час | 8 |
| Затраты времени на поездку, мин | 7 |
| Количество индивидуальных автомобилей на 1000 жителей, авт./1000 жит. | 6 |
| Перевезено пассажиров на индивидуальных автомобилях, тыс.пасс.в год | 6 |
| Работа автотранспорта в пасс-км год | 6 |
| Экономическая составляющая по развитию, млн. руб. | 6 |
| Накладные затраты времени, мин. | 5 |
| Сводная экологическая оценка (по шумам и загазованности) | 5 |
| Сводная оценка по безопасности движения (количество ДТП) | 5 |

При оценке значимости показателей работы сети ГОТ получены следующие результаты (табл.4.2).

Таблица 4.2 – Показатели качества работы ГОТ

| Показатели | Баллы |
|---|---|
| Суммарные затраты времени на передвижения, мин | 7 |
| Суммарная провозная способность, тыс.пасс.в год | 7 |
| Затраты времени на поездку в ГОТ, мин. | 6 |
| Количество перевезенных пассажиров, млн. пасс. в год | 6 |
| Работа транспорта в млн.пасс.-км в год | 6 |
| Суммарные приведенные строительно-эксплуатационные затраты, млн.руб.в год | 6 |
| Накладные затраты времени на передвижения, мин | 5 |
| Суммарное приведенное количество единиц подвижного состава, ед. | 5 |
| Комфортность поездки на ГОТ | 4 |
| Комфортность подходов к линиям ГОТ, м | 3 |

Важно использовать транспортное моделирование именно в контексте целей и задач конкретного проекта. Далеко не всегда разработка транспортно-градостроительных проектов подчинена решению «транспортной проблемы», связанной с перегрузкой транспортной сети и обусловленной резким ростом уровня подвижности на индивидуальном транспорте. Например, при определении мероприятий по развитию транспортной инфраструктуры городов одной из основных задач является, как правило, обеспечение надежного функционирования городской транспортной инфраструктуры, что достигается дублированием основных направлений, ликвидацией «узких» мест. В этом случае критерии оценки эффективности транспортной системы будут отличаться от «классической» схемы, при которой основными показателями эффективности являются параметры затрат времени на передвижения по городу.

Следует учитывать, что разработка транспортных разделов градостроительных проектов направлена в первую очередь на резервирование территории под будущие инфраструктурные объекты. Поэтому, моделируя перспективную ситуацию, необходимо критически оценивать перечень предлагаемых проектом мероприятий по совершенствованию транспортной системы, ориентируясь на имеющуюся динамику развития города, возможности финансирования дорожного строительства и т.д.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ


1. Авдотьин Л.Н. Применение вычислительной техники и моделирования в архитектурном проектировании. – М.: Стройиздат, 1978. – 255 с.
2. Алаев Э.Б. Социально-экономическая география. Понятийно-терминологический словарь. – М.: Мысль, 1983. – 350 с.
3. Аналитический отчет по градостроительным аспектам развития системы железнодорожного транспорта в Санкт-Петербурге для обеспечения пассажирских перевозок. – СПб.: ЗАО «Петербургский НИПИГрад», 2011.
4. Булычева Н.В., Лосин Л.А. Методы восстановления матриц межрайонных корреспонденций. // Региональная экономика и развитие территорий. Сборник научных статей 1 (12). ФГБУН «Институт проблем региональной экономики», НИУ ВШЭ–СПб, 2018. – с.192-200.
5. Ваксман С.А., Глик Ф.Г., Швец В.Л. Транспортное районирование города // Региональная экономика и региональная политика: сборник научных трудов УрГЭУ. − Екатеринбург: 1994.
6. Ваксман С.А. Социально-экономические проблемы прогнозирования развития систем массового пассажирского транспорта в городах. – Екатеринбург: Изд-во УрГЭУ, 1996. − 289 с.
7. Ваксман С.А., Кочнев Н.Г. Систематизация показателей транспортных систем городов. Общие показатели // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XIII международной научно-практ.конф. – Екатеринбург: АМБ, 2007. – с.248-257.
8. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / под ред.А.В.Гасникова. − М.: Изд-во МЦНМО, 2012. − 377 с.
9. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов. Под ред. Берлянта А.М. и Кошкарева А.В. М.: ГИС-ассоциация, 1999. – 204 с.
10. Гольц Г.А. Транспорт и расселение. – М.: Наука, 1981. – 248 с.
11. Горев А.Э. Основы теории транспортных систем: учебное пособие. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – 214 с.
12. Гутнов А.Э., Глазычев В.Л. Мир архитектуры. Лицо города. – М.: Молодая гвардия, 1990. – 350 с.
13. Калюжный Н.А., Лисененков А.И., Лосин Л.А. Информационно-программный комплекс Citraf и его применение для решения задачи по определению мест формирования транспортно-пересадочных узлов // Вестник гражданских инженеров. Выпуск 5 (70). – СПбГАСУ, 2018. – с.174-181.
14. Кащенко Н.А., Попов Е.В., Чечин А.В. Геоинформационные системы: учебное пособие для вузов. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2012. – 131 с.
15. Лисененков А.И., Лосин Л.А. Формирование расчетного графа на основе анализа транспортной системы городской агломерации // Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем: сборник научных трудов. Выпуск 45 / под

научной редакцией д.э.н. С.В.Кузнецова. ИПРЭ РАН, – СПб: ГУАП, 2019. С.49-53

16. Лосин Л.А. Опыт математического моделирования при разработке транспортных разделов генеральных планов городов // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XIV международной научно-практ.конф. – Екатеринбург: АМБ, 2008. – с.94-97.
17. Лосин Л.А. Петербургский опыт построения информационно-программного комплекса для решения транспортно-градостроительных задач. // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XXIII международной научно-практ.конф. – Минск: БНТУ, 2017. – с.88-95.
18. Математические методы в управлении городскими транспортными системами (отв. ред. О.Г.Фаянс). – Л.: Наука, 1979. – 152 с.
19. Михайлов А.С. Управление рынком перемещений городского населения. – Алматы: Гылым, 2003. – 238 с.
20. Михайлов А.Ю., Головных И.М. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов. – Новосибирск: Наука, 2004. – 267 с.
21. Мягков В.Н., Пальчиков Н.С., Федоров В.П. Математическое обеспечение градостроительного проектирования. Отв.ред. Б.Л.Овсиевич. – Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1989. – 144 с.
22. Овечников Е.В., Фишельсон М.С. Городской транспорт: учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1976. − 352 с.
23. Перцик Е.Н. Районная планировка (территориальное планирование). – М.: Гардарики, 2006. – 398 с.
24. Питтель Б.Г. Случайное размещение с ограничениями и принцип максимума взвешенной энтропии, Доклады Академии наук СССР. − 1972. − т.207, №6. − с.1281−1283.
25. Попков Ю.С., Посохин М.В., Гутнов А.Э., Шмульян Б.Л. Системный анализ и проблемы развития городов. – М.: Наука, 1983. − 512 с.
26. Расчет транспортной подвижности населения Санкт-Петербурга с использованием городского общественного и индивидуального пассажирского транспорта. Материалы по обоснованию проектных решений Генерального плана Санкт-Петербурга. Отв.исполнитель – В.В.Солодилов. – СПб.: ЗАО «Петербургский НИПИГрад», 2004.
27. Свердлин Л.И. Транспортные обоснования композиции генерального плана города // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XI международной научно-практ.конф. – Екатеринбург: АМБ, 2005. – с.40-43.
28. Сосновский В.А., Русакова Н.С. Прикладные методы градостроительных исследований. – М.: Архитектура-С, 2006. − 112 с.

29. Федоров В.П., Лосин Л.А. Методы математического моделирования для проектирования городской транспортной системы на досетевом уровне // Транспорт Российской Федерации, 2012, №2 (39). − с.42−45.
30. Федоров В.П., Булычева Н.В., Пахомова О.М., Лосин Л.А. Модель формирования межрайонных корреспонденций в транспортных системах крупных городов // Транспорт Российской Федерации, №3–4 (16–17), 2008. – с.64-67.
31. Федоров В.П., Пахомова О.М., Лосин Л.А., Булычева Н.В. Вопросы калибровки моделей формирования потоков в городской транспортной сети // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XII международной научно-практ.конф. – Екатеринбург: АМБ, 2006. – с.43-46.
32. Черепанов Б.В., Черепанов А.Б. Комплексная оценка вариантов работы транспортных систем в генеральных планах городов с использованием экспертных оценок // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы X международной научно-практ.конф. – Екатеринбург: АМБ, 2004. – с.18-25.
33. Швецов В.И., Алиев А.С. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей. – М.: URSS, 2003. – 64 с.
34. Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии. Сборник трудов Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН. №9. Математические модели в исследовании процессов развития городской среды. − СПб.: Нестор-История, 2015. − 84 с.
35. Якимов М.Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов. – М.: Логос, 2013. − 188 с.
36. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. Modeling Transport. John Wiley & Sons Ltd, 2001. 594 p.
37. Webber, M.J. Information Theory and Urban Spatial Structure. – London, 1980
38. Wilson, A.G. Entropy in Urban and Regional Modelling. – Pion, London, 1970
39. Врубель, Ю. А. Потери в дорожном движении / Ю. А. Врубель. – Минск : БНТУ, 2003. – 380 с.
40. Капский, Д. В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении : монография / Д. В. Капский. – Минск : БНТУ, 2008. – 243 с.
41. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении : монография / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 240 с.
42. Леонович, И. И. Влияние транспортной инфраструктуры города Минска на аварийность в дорожном движении / И. И. Леонович, Д. В. Капский // Архитектура и строительные науки. – 2008. – № 1 (8). – С. 49–54.

43. Капский, Д. В. Совершенствование условий дорожного движения в г. Бресте / Д. В. Капский, Е. Н. Кот, А. Д. Лукьянчук // Безпека дорожнього руху України. – 2005. – № 3–4 (21). – С. 89–99.
44. Капский, Д. В. Совершенствование комплексной схемы организации движения в городе Гомель // Д. В. Капский [и др.] // Безпека дорожнього руху України. – 2006. – № 3–4 (23). – С. 41–52.
45. Капский, Д. В. Анализ условий движения по ул. К. Цеткин в г. Минске / Д. В. Капский [и др.] // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния : материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 16–17 июня 2010 г. / Урал. гос. экон. ун-т. – Екатеринбург, 2010. – С. 342–346.
46. Капский, Д. В. Повышение безопасности движения путем совершенствования его организации в населенных пунктах (методологические основы) / Д. В. Капский // Социально-экономические
проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния : материалы XV Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 16–17 июня 2009 г. / Урал. гос. экон. ун-т. – Екатеринбург, 2009. – С. 143–147.
47. Ваксман, С. А. Принципы разработки и содержание КСОД столичного города (на примере Минска) / С. А. Ваксман, Ф. Г. Глик, Д. В. Капский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. : в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 267–268.
48. Капский, Д.В. Повышение качества дорожного движения в городах / Д. В. Капский // Транспортные системы мегаполисов. Проблемы и пути решения : тр. Междунар. науч.-практ. конф., Харьков, 11–12 октября 2011 г. / Харьков. нац. автомобильно-дорожный ун-т ; редкол. : А. Н. Туренко [и др.]. – Харьков, 2011. – С. 20–26.
49. Ваксман, С. А. Концепция парковочной политики в крупном городе / С. А. Ваксман, Ф. Г. Глик, Д. В. Капский // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния : материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 16–17 июня 2011 г. / Урал. гос. экон. ун-т. – Екатеринбург, 2011. – С. 98–104.
50. Капский, Д. В. Выбор организационно-планировочного решения при реконструкции кольцевых пересечений в одном уровне / Д. В. Капский, В. Н. Кузьменко // Вестн. БелГУТа. Сер. «Наука и транспорт». – 2008. – № 2 (17). – С. 49–54.

# СОДЕРЖАНИЕ

**1. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ**

1.1. Сфера практического применения методов математического моделирования

1.2.Математические модели в современной практике транспортного планирования

***1.2.1. Уровни математического моделирования. Точность моделирования***

***1.2.2. Нормативно-методическая база***

***1.2.3. Развитие методов математического моделирования***

**2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ**

2.1.Этапы построения модели

2.2. Генерация поездок

*2.2.1. Подвижность населения*

*2.2.2. Структура городских передвижений*

*2.2.3. Выбор расчетного периода для моделирования*

2.3.Моделирование матрицы межрайонных корреспонденций

*2.3.1. Понятие транспортного спроса*

*2.3.2. Общие подходы к моделированию корреспонденций*

*2.3.3. Гравитационная модель*

*2.3.4. Энтропийная модель*

2.4. Выбор способа передвижения

2.5. Моделирование потокораспределения в сети

**3. ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ**

3.1. Применение геоинформационных технологий в транспортном моделировании

3.2. Моделирование территориально-транспортной системы

3.3. Моделирование функционально-планировочной структуры

*3.3.1. Транспортное районирование*

*3.3.2. Определение внешних границ территории моделирования*

***3.3.3. Формирование исходной базы данных модели***

3.4. Калибровка модели

**4. МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВЕ И ТРАНСПОРТНОМ ПЛАНИРОВАНИИ**

4.1.Задачи, решаемые с помощью методов математического моделирования

*4.1.1. Группы решаемых задач*

*4.1.2. Выявление существенных особенностей действующей транспортной системы*

*4.1.3. Оценка последствий принятия решений по развитию транспортной системы*

*4.1.4. Определение параметров объектов транспортной инфраструктуры на основе анализа спроса на передвижения*

4.2. Обработка результатов моделирования

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

Учебное издание

КАПСКИЙ **Денис Васильевич**

ЛОСИН **Леонид Андреевич**

ТРАНСПОРТ В ПЛАНИРОВКЕ ГОРОДОВ

Пособие
для студентов специальности
1-44 01 02 «Организация дорожного движения»

Редактор *Т. А. Панкрат*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 27.03.2015. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 6,55. Тираж 300. Заказ 932.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.