

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

Высшая школа урбанистики имени А.А. Высоковского

Гостев Максимилиан Вадимович

**ЭВОЛЮЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ СИСТЕМ
ГОРОДСКОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ТРАНСПОРТА:
РАЗРАБОТКА ЭВРИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Выпускная квалификационная работа – МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
по направлению подготовки 07.04.04 Градостроительство
образовательная программа «Управление пространственным развитием городов»

Рецензент

Научный руководитель
профессор

А.Е. Сыромятников

О.А. Баевский

Москва 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 ТЕОРИЯ ЭВОЛЮЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ	14
1.1 Понятие градостроительной системы и подходы к ее описанию	14
1.1.1 Коммуникативность как фундаментальный функциональный признак города.....	14
1.1.2 Градостроительная система: определение и свойства	15
1.1.3 Два подхода к описанию динамического функционирования градостроительной системы	17
1.2 Качественный подход к описанию динамического функционирования градостроительной системы	19
1.2.1 Каркасно-тканевая модель градостроительной системы.....	19
1.2.2 Территориально-коммуникационная модель градостроительной системы.....	25
1.2.3 Неравномерно-районированная модель градостроительной системы	29
1.3 Количественный подход к описанию функционирования градостроительной системы	33
1.3.1 Концептуальная интегрированная модель систем городского землепользования и транспорта	33
1.3.2 Прикладные операционные интегрированные модели систем городского землепользования и транспорта	37
1.3.3 Преимущества и недостатки интегрированных моделей систем городского землепользования и транспорта	42
1.4 Эвристические основания моделей эволюционного развития градостроительной системы.....	46
1.4.1 Разнообразие подходов к моделированию градостроительной системы в свете общей теории городского развития.....	46
1.4.2 Программа исследований А.Э. Гутнова	49
1.4.3 Эвристический характер методов проектирования градостроительной системы.....	50
ГЛАВА 2 ЭВОЛЮЦИОННАЯ ЭВРИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ.....	54
2.1 Постановка задачи и обоснование подхода к построению модели градостроительной системы.....	54

2.2 Принципиальная схема модели градостроительной системы.....	56
2.2.1 Статическое описание модели градостроительной системы.....	56
2.2.2 Динамическое описание модели градостроительной системы	64
2.2.3 Описание эволюционного развития градостроительной системы.....	66
2.3 Алгоритм прогнозирования транспортных потоков на сегментах дорожно- транспортной сети	68
2.4 Публичная сторона: развитие дорожно-транспортной сети градостроительной системы	70
2.4.1 Продолжительность поездок как критерий оценки пространственно-планировочной организации градостроительной системы	70
2.4.2 Задача выбора пропускных способностей коммуникационных элементов градостроительной системы	71
2.4.3 Принятие решения о строительстве нового сегмента дорожно-транспортной сети градостроительной системы	78
2.5 Жилищный сектор: выбор мест размещения жилищного фонда и мест проживания.....	81
2.5.1 Оценка градостроительного потенциала территории	81
2.5.2 Оценка диспропорции и принятие решения	84
2.6 Общественно-деловой сектор: выбор мест размещения мест приложения труда и обслуживания населения	87
2.6.1 Оценка градостроительного потенциала территории	87
2.6.2 Оценка диспропорции и принятие решения	88
2.7 Оценка бюджетных эффектов от развития дорожно-транспортной сети градостроительной системы	89
2.7.1 Понятие бюджетных эффектов.....	89
2.7.2 Алгоритм оценки бюджетных эффектов от развития дорожно-транспортной сети градостроительной системы	90
2.7.3 Бюджетный эффект как критерий принятия решения о строительстве нового сегмента дорожно-транспортной сети градостроительной системы.....	91
ГЛАВА 3 ПОЛОЖЕНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В ПРОЦЕССЕ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМ РАЗВИТИЕМ.....	93
3.1 Положение эвристической эволюционной модели градостроительной системы в структуре знаний о городе.....	93

3.2 Процесс управления развитием города с применением эволюционной эвристической модели градостроительной системы.....	95
3.2 Экспертная оценка модели и перспективные направления ее развития.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	106

СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ

Рисунок 1.1 – Диаграмма цикла эволюционного развития градостроительной системы.....	21
Рисунок 1.2 – Оценочная матрица.....	28
Рисунок 1.3 – Неравномерно-районированная пространственная структура градостроительной системы.....	32
Рисунок 1.4 – Концептуальная схема интегрированной модели систем городского землепользования и транспорта.....	36
Рисунок 1.5 – Обобщенная схема прикладной интегрированной модели систем городского землепользования и транспорта.....	37
Рисунок 1.6 – Цикл обратной связи систем городского землепользования и транспорта.....	45
Рисунок 2.1 – Статическое описание модели градостроительной системы.....	63
Рисунок 2.2 – Динамическое описание модели градостроительной системы.	65
Рисунок 2.3 – Описание эволюционного развития градостроительной системы.....	67
Рисунок 3.1 – Положение эволюционной эвристической модели градостроительной системы в структуре знаний о городе.....	94
Рисунок 3.2 – Процесс управления развитием города с применением эволюционной эвристической модели градостроительной системы.	100

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Практика принятия решений в области физической городской транспортной инфраструктуры в отечественном градостроительстве отличается рядом особенностей.

Во-первых, принятие решений в этой области зачастую носит политический характер. Такие решения имеют тактическую, а не стратегическую, направленность: они учитывают интересы потенциальных выгодополучателей, направлены на достижение политических целей и решение краткосрочных задач, и практически никогда не учитывают структуры сложившегося землепользования. Существующая практика подкрепляется российским законодательством в сфере градорегулирования, которое позволяет производить изъятие земельных участков у собственников под линейные объекты и объекты транспортной инфраструктуры.¹ Более того, под некоторые классы транспортных объектов в законодательство вносятся соответствующие поправки, упрощающие процедуру изъятия земельных участков, как, например, это произошло в случае с транспортно-пересадочными узлами.² Также к политической стороне процесса принятия решений относится и практика количественного, а не качественного развития городской транспортной инфраструктуры: отчеты муниципальных и региональных органов власти докладывают о километрах проложенных и отремонтированных дорог, но никак не характеризуют их топологическую структуру, и такие параметры как связность или плотность.

Во-вторых, принятие решений в области транспортной инфраструктуры носит отраслевой характер – в пределах той свободы, которая остается после принятия политических решений. Специалисты по транспортному планированию и транспортному моделированию в некотором смысле монополизировали эту сферу градостроительной деятельности. Создание отраслевых транспортных моделей нацелено либо на анализ текущей транспортной ситуации в городе, либо на прогнозирование будущих транспортных потоков в рамках разработки генерального плана города. Иными словами, имплементация таких транспортных моделей подразумевает разовое решение, а не многократный итеративный процесс. Кроме того, хотя результаты прогнозирования транспортных потоков в городе и служат для теоретического

¹ Трутнев Э.К., Сафарова М.Д. Градорегулирование в условиях рыночной экономики. М.: Дело, 2011. 368 с.

² Федеральный закон от 5 апреля 2013 г. N 43-ФЗ «Об особенностях регулирования отдельных правоотношений в связи с присоединением к субъекту Российской Федерации – городу федерального значения Москве территорий и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // СПС КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144623/ (дата обращения: 1.05.2017).

обоснования необходимости проектирования новых дорог, чаще всего это не является первоочередной задачей транспортного моделирования. При таком подходе критерии оптимальности транспортного планирования также ставятся в приоритет перед критериями оптимальности землепользования – как сложившегося, так и планируемого. С другой стороны, развитие городских территорий также зачастую происходит без учета существующей и будущей транспортной нагрузки; подобная практика, получившая наибольшее распространение в ранний постсоветский период, и включавшая такие эксцессы, как приватизация и застройка территорий общего пользования,³ так или иначе проявляет себя по сегодняшний день.⁴ Между тем, широко признается, что системы городского землепользования и транспорта неразрывно связаны друг с другом и непрерывно влияют друг на друга.⁵ Следовательно, для принятия эффективных градостроительных решений их функционирование должно рассматриваться не в отдельности, а в комплексе, а их взаимное влияние должно рассматриваться как непрерывный итеративный процесс, поскольку разовое решение в рамках каждой из систем быстро потеряет свою актуальность.

Вопреки некоторой деструктивной направленности развития градостроительного законодательства последних лет,^{6,7} правовая культура в части регулирования городского землепользования путем принятия и регулярной актуализации генеральных планов и правил землепользования и застройки утвердилась в практике значительной части российских городов. В то же время развитие городской дорожно-транспортной сети по сегодняшний день остается проблемой, так и не получившей последовательного системного подхода к своему разрешению.

Между тем, особая актуальность этой проблемы для российских городов обусловлена сложившимися в советский период характеристиками физической транспортной

³ Stanilov K. Democracy, markets, and public space in the transitional societies of Central and Eastern Europe // *The Post-Socialist City. Urban Form and Space Transformations in Central and Eastern Europe after Socialism*. Springer, 2007. P. 269–284.

⁴ Koncheva E., Zaleskiy N. Spatial Development of The Largest Russian Cities During The Post-Soviet Period: Orienting Towards Transit or Maintaining Soviet Trends. Basic research program. National research university Higher School of economics, 2016. URL: <https://www.hse.ru/data/2016/07/13/1116450809/04URB2016.pdf> (дата обращения: 1.05.2017).

⁵ Wegener M. Overview of land-use transport models // *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*. 2004. No. 5. P. 127–146.

⁶ Трутнев Э.К. Город и право: логика циклического развертывания и свертывания из прошлого в будущее и из настоящего в прошлое институтов правового градорегулирования в постсоветской России // *Городские исследования и практики*. 2015. Пилотный выпуск. С. 13–32.

⁷ Трутнев Э.К. Деструкция города строительством. К постановке неопознанной проблемы – исследовательской, законотворческой, управленческой // *Городские исследования и практики*. Т.1. №2. 2016. С. 49–66.

инфраструктуры. К этим характеристикам относятся: низкая плотность улично-дорожной сети; малая доля площади улично-дорожной сети относительно площади территории всего города; топологическая неразвитость, или низкая связность, улично-дорожной сети.⁸ Подобная ситуация сложилась, во-первых, в силу значительной недооценки темпов роста автомобилизации страны, во-вторых, в силу перехода от застройки квартального типа к микрорайонной застройке.⁹ По замечанию Г.В. Шелейховского, уличная-дорожная городская сеть не проектировалась, а «рисовалась».¹⁰ Советские строительные нормы и правила планировки и застройки городов, исходящие из перспективного уровня автомобилизации 180 автомобилей на 1000 жителей,¹¹ применяются по сегодняшний день, в то время как фактический уровень автомобилизации на 1 января 2017 года в среднем по стране составляет 288 автомобилей на 1000 человек.¹² При этом набирающая популярность политика по сдерживанию автомобилизации,¹³ даже будучи реализованной, приведет лишь к частичному решению проблемы, так как в условиях роста национального дохода повышение уровня автомобилизации населения неизбежно. Иными словами, проблема качественного развития дорожно-транспортных сетей российских городов остается актуальной.

Таким образом, можно заключить, что в настоящее время в российских городах отсутствует ясная транспортная политика: мероприятия по реорганизации и развитию физической транспортной инфраструктуры недостаточно обоснованы. В качестве долгосрочного эффекта подобной практики происходит рассинхронизация, рассогласование развития систем городского землепользования и транспорта.

Ответом на заявленную проблему может служить теоретическое обоснование проектов физических транспортных сетей. Однако, как было замечено, нецелесообразно и необоснованно рассматривать систему транспорта в отрыве от системы землепользования. Таким образом, необходима общая, фундаментальная теория, которая объясняла бы взаимодействие этих двух систем. В свою очередь, операционная, прикладная модель,

⁸ Белянин А. Удовольствие от пробок: поведенческая экономика о транспортной реформе // Стимулы, парадоксы, провалы: город глазами экономистов. М.: Strelka Press, 2015. С. 136-159.

⁹ Глазычев В.Л. Урбанистика. М.: Европа, 2008. 220 с.

¹⁰ Шелейховский Г.В. Композиция городского плана как проблема транспорта. М.: ГИПРОГОР, 1946. 129 с.

¹¹ Госстрой СССР. СНиП II-60-75**. Планировка и застройка городов, поселков и сельских населенных пунктов. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985.

¹² Тимерханов А. В России на тысячу жителей приходится 288 легковых автомобилей // Автостат. 2017. 13 апреля. URL: <https://www.autostat.ru/news/29682/> (дата обращения: 1.05.2017).

¹³ Cervero R., Kockelman K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 1997. Vol. 2. No. 3. P. 199–219.

построенная на базе такой теории, могла бы служить инструментом обоснования проектных решений и проведения политики как в области землепользования, так и в области транспорта.

Разработанность темы. Область разработки класса прикладных моделей, получивших обобщенное название «интегрированные модели землепользования и транспорта», развивается с 1950-ых годов.¹⁴ Однако, несмотря на значительную эволюцию, которую прошли эти модели, в частности, в вопросах репрезентации системы землепользования, – от гравитационных моделей¹⁵ до клеточных автоматов,¹⁶ – их транспортный компонент остался преимущественно ограничен стандартной четырехэтапной транспортной моделью, которая не репрезентирует топологические структуры и пропускные способности транспортных сетей.¹⁷ Кроме того, даже в развитых интегрированных моделях фактически принимается во внимание лишь одно из направлений «обратной связи» между двумя системами, а именно – влияние существующей транспортной инфраструктуры, выраженное в виде показателей транспортной доступности, на развитие землепользования.¹⁸ Иными словами, в интегрированных моделях действует все тот же «отраслевой» принцип, хотя и включенный в итеративный цикл. Наконец, построению таких моделей не предшествовало построение общей теории – они предлагают эмпирические инструменты, обоснованные эмпирическими данными.

С другой стороны, появившаяся как результат применения системного подхода к градостроительству¹⁹ в 1980-е годы в СССР каркасно-тканевая модель города А.Э. Гутнова²⁰ предложила фундаментальное теоретическое описание функционирования и развития города. Разработанные позднее территориально-коммуникационная модель Научно-исследовательского и проектного института Генерального плана города Москвы²¹ и

¹⁴ Acheampong R., Silva E. Land use–transport interaction modeling: A review of the literature and future research directions // *The Journal of Transport and Land Use*. 2015. Vol. 8. No. 3. P. 1–28.

¹⁵ Lowry I. A Model of Metropolis. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1964.

¹⁶ Batty M., Xie Y. From cells to cities // *Environment and Planning B*. 1994. No. 21. P. 31-48.

¹⁷ Chang J. Models of the relationship between transport and land-use: A review // *Transport Reviews*. 2006. No. 26. P. 325–350.

¹⁸ Geurs K., Wee B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions // *Journal of Transport Geography*. 2004. No. 12. P. 127–140.

¹⁹ Гутнов А. Э. Системный подход в изучении города: основания и контуры теории городского развития // *Системные исследования. Методологические проблемы*. М.: Наука, 1985. С. 211–232.

²⁰ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

²¹ Баевский О.А. Эволюционный подход к управлению градостроительным развитием крупнейшего города. Московский опыт // *Градостроительство России XXI века. Сборник научных статей РААСН*. М.: Московские учебники и картолитография, 2001.

неравномерно-районированная модель А.А. Высоковского,²² также декларируют сложную функционально-пространственную организацию города и эволюционный, преемственный характер его развития. Учет эволюционного характера городского развития, в свою очередь, позволяет обеспечить долгосрочность и устойчивость предлагаемых моделями проектных решений. Однако, хотя эти модели базируются на обширных теоретических положениях, в некоторых аспектах, и, в первую очередь, в вопросах репрезентации транспортной системы, они требуют уточнения, формализации и операционализации.

Таким образом, задача построения операционной модели города, которая отражала бы эволюционный характер развития и двунаправленную связь между системами землепользования и транспорта, и одновременно с этим предлагала бы ясную репрезентацию физической транспортной инфраструктуры, остается еще не решенной.

Цель исследования: построение эвристической модели эволюционного развития систем городского землепользования и транспорта на фундаменте общей теории городского развития. Основным результатом данной работы является подробное описание модели, которая отвечает поставленной цели; такая модель, с одной стороны, рассчитывает оптимальные параметры физической транспортной сети при меняющейся интенсивности использования территорий, с другой стороны – определяет оптимальные места размещения жилищного и общественно-делового фонда и их оптимальные объемы с учетом изменения транспортной доступности в результате проведения мероприятий по изменению параметров физической транспортной сети.

Задачи исследования:

- изучить теорию эволюционного городского развития;
- изучить существующие подходы к моделированию систем городского землепользования и транспорта;
- разработать прикладную модель эволюционного развития города, а именно: описать принципы эволюционного развития системы городского землепользования, принципы эволюционного развития системы городского транспорта, принципы взаимодействия между этими системами;
- описать поэтапную схему управления развитием города с учетом применения результатов имплементации разработанной эволюционной модели города.

Объект исследования: системы городского землепользования и городской транспортной инфраструктуры как части единой градостроительной системы.

²² Высоковский А.А. Правила землепользования и застройки: руководство по разработке. Опыт введения правового зонирования в Кыргызстане. Бишкек: Ега-Басма, 2005. 326 с.

Предмет исследования: механизмы эволюционного развития систем городского землепользования и городской транспортной инфраструктуры и механизмы взаимного влияния этих систем.

Теоретическую основу исследования составляют, в первую очередь, положения теории общего городского развития, сформулированные А.Э. Гутновым, которые получили свое последующее развитие в территориально-коммуникационной модели города. Также принимаются во внимание неравномерно-районированная модель города, и широкий круг интегрированных моделей систем землепользования и транспорта. Кроме того, используются элементы теории транспортного планирования, в частности, в вопросах макро моделирования транспортных потоков и их прогнозирования.²³

Эмпирические основы исследования: общенаучные методы; качественный анализ вторичных источников; моделирование.

Научная новизна исследования. В рамках исследования демонстрируется, что все динамические операционные структурно-функциональные городские модели, основанные на разных принципах действия, – от неравномерно-районированной модели до разнообразных интегрированных моделей землепользования и транспорта, – в целом укладываются в теоретические рамки общей теории эволюционного городского развития А.Э. Гутнова. Доказываются эвристические основания городских эволюционных моделей.

В процессе исследования сформирован подход, обеспечивающий преемственность в разработке городских моделей, которые строятся для разных локальных задач, но для единой цели – проектирования эффективной функционально-пространственной организации градостроительной системы.

В процессе разработки описываемой в данной работе модели были уточнены и формализованы некоторые механизмы территориально-коммуникационной модели города, в частности, относящиеся к вопросам расчета транспортной доступности территорий, а также в части репрезентации физической транспортной инфраструктуры в этой модели; при этом разработанные инструменты обладают свойством универсальности, то есть не зависят от конкретной территории, к которой применяются вычисления модели. Таким образом, модель служит примером того, как в рамках общей теории городского развития последовательно уточняются инструменты моделирования городских процессов до нужного уровня детализации.

²³ Воробьев А.Э., Титов А.Ю., Гаврилин В.А., Меньшутин А.Ю., Бахирев И.А. Транспортная модель Московского региона // Вычислительные технологии в естественных науках. Методы суперкомпьютерного моделирования. Сборник трудов. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 49–62.

Практическая значимость темы заключается в том, что работа предлагает детальное описание модели-инструмента принятия и обоснования решений в сферах территориального и транспортного планирования – в частности, задач выбора мест размещения жилого и общественно-делового фонда, выбора пропускных способностей сегментов дорожно-транспортных сетей и выбора пространственной локализации новых сегментов сети.

Структура работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы.

В первой главе описывается объект градостроительной деятельности – градостроительная система – и приводятся его основные свойства. Приводятся основные положения теорий и моделей градостроительных систем, условно поделенных на «качественные» и «количественные». В ряду моделей «качественного» подхода рассматриваются каркасно-тканевая, территориально-коммуникационная, неравномерно-районированная модели; в ряду «количественных» моделей рассматриваются интегрированные модели систем городского землепользования и транспортных систем. Выявляются общие для всех моделей черты – как явная, так и подразумеваемая репрезентация непрерывного эволюционного характера развития градостроительной системы, направленного в сторону повышения главного качества городской жизни – коммуникативности. На основании анализа программы исследований А.Э. Гутнова обосновывается эвристическая природа моделей, построенных на фундаменте теории общего городского развития.

Во второй главе обосновывается подход к построению задачи проектирования той или иной городской подсистемы как частного случая общей задачи проектирования градостроительной системы. Выделяются и в терминах теории графов и территориально-коммуникационной модели описываются системы городского землепользования и транспорта. Далее приводится статическое, динамическое, и эволюционное описание градостроительной системы. Предлагается уточненное определение и метод вычисления параметра транспортной доступности территории на базе территориально-коммуникационной модели. Для системы землепользования формулируются задачи оптимального размещения жилищного фонда и общественно-делового фонда; предлагаются алгоритмы решения этих задач. Для системы транспорта формулируются задача оптимального выбора пропускных способностей сегментов дорожно-транспортной сети и задача о принятии решения о повышении связности сети, то есть проектировании новой дороги; предлагаются алгоритмы решения этих задач. Описывается алгоритм оценки бюджетных эффектов от проектирования транспортной сети.

В третьей главе описывается положение разработанной эвристической эволюционной модели градостроительной системы в структуре знаний о городе – теоретических положениях и проектных подходах; обосновывается, что имплементация модели приводит к оптимальному, либо близкому к таковому решению, по своему построению. Приводится схема процесса управления развитием градостроительной системы; описываются этапы этого процесса, на которых целесообразно применение результатов имплементации разработанной модели. В качестве апробации результатов работы приводится экспертная оценка разработанной модели с выявлением перспективных направлений ее дальнейшего развития, проведенная практикующими специалистами в области городских моделей.

ГЛАВА 1 ТЕОРИЯ ЭВОЛЮЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

1.1 Понятие градостроительной системы и подходы к ее описанию

1.1.1 Коммуникативность как фундаментальный функциональный признак города

Территориальный рост, увеличение численности населения, возрастающая пространственная интеграция функций городской жизни ведут к усложнению функционально-пространственной организации города.²⁴ Одновременно с этим городские признаки, изначально заложенные в определение «города» как компактного, обособленного в пространстве населенного пункта, распространяются все на больший круг понятий. Для выявления общих признаков среди различных с точки зрения морфологии феноменов – «города», «агломерации»,²⁵ «системы группового расселения»,²⁶ «мегалополиса»,²⁷ – было введено понятие «урбанизированный район», или «урбанизированная территория».²⁸ Такое обобщение стало возможным, поскольку факторы усложнения функционально-пространственной организации города не изменили его природу, а, напротив, выявили главный функциональный признак, фундаментальный для всех видов урбанизированных территорий – высокую коммуникативность.²⁹

Социологические исследования города последних ста лет, начиная с Г. Зиммеля,³⁰ показывают, что высокая коммуникативность города является его изначальным, неотделимым от его природы свойством. Именно это свойство определяет пространственную структуру города – интенсивно освоенную территорию в границах допустимого радиуса контактов.

²⁴ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

²⁵ Перцик Е.Н. Районная планировка. М.: Мысль, 1973. 272 с.

²⁶ Хорев Б.С. Проблемы городов: урбанизация и единая система расселения в СССР. М.: Мысль, 1975. 428 с.

²⁷ Gottmann J. Megalopolis or the Urbanization of the Northeastern Seaboard // Economic Geography. 1957. Vol. 33. No. 3. P. 189-200.

²⁸ Пивоваров Ю.Л. Концентрация функций и тенденции урбанизированного населения // Ресурсы, среда, расселение. М.: Наука, 1974. С. 140–149.

²⁹ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

³⁰ Зиммель Г. Большие города и духовная жизнь // Логос. 2002. №3–4. С. 23–34.

Радиус контактов, в свою очередь, определяется предельно допустимыми затратами времени, изначально привязанными к физическим расстояниям. С развитием городского транспорта роль географических расстояний в функционировании города уменьшилось: мерой эффективности пространственно-функциональной организации города стали характеристики городского транспорта, в частности, скорости сообщений. Замена экономии пространства экономией времени привела к увеличению радиуса контактов: в современном городе поведение горожанина характеризует формула «максимум контактов при минимуме затрат времени». Принцип функционально-пространственной организации города, согласно Г. Блюменфельду,³¹ – «минимум необходимых и максимум возможных передвижений».

Итак, с точки зрения функционирования, город, вернее, в современных условиях, урбанизированная территория – это «система, сокращающая расстояния». Однако, когда важны не только функциональные, но и структурные признаки территории, целесообразнее использовать понятие «градостроительная система».

1.1.2 Градостроительная система: определение и свойства

Градостроительная система, по определению А.Э. Гутнова, это «относительно обособленная, функционально связанная область организованной человеком пространственной среды, в пределах которой реализуется комплекс основных видов социальной активности населения, обусловленных достигнутым уровнем развития общества»; или, иначе, это «место, где человек постоянно живет и работает, имея возможность при этом удовлетворить все основные потребности, связанные с формированием и полноценным развитием личности».³²

С одной стороны, термин «градостроительная система», как и термин «урбанизированная территория», позволяет избавиться от смысловой неоднозначности термина «город», так как включает область функционирования объекта даже если она не совпадает с формальными границами – например, административными. С другой стороны, в отличие от термина «урбанизированная территория», в понятии «градостроительная система» на первый план выведена еще и структурная организация системы, ее внутренние взаимосвязи. Далее в данной работе термин «город» будет использоваться в том же смысле, что и термин «градостроительная система».

³¹ Blumenfeld H. Criteria for urban form // The Annals of the American Academy of Political and Social Science. 1964. Vol. 352.

³² Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

Всем градостроительным системам присущ ряд универсальных свойств.^{33,34}

1. Градостроительная система территориальна по своей природе. Территория, со всеми атрибутами, такими как: размер, форма, местоположение, антропогенные свойства, природные ресурсы, является основой для градостроительной деятельности – проектирования градостроительной системы. Иными словами, градостроительная система укоренена на территории.

2. Пространство и деятельность в градостроительной системе неделимы. Градостроительная система – объект, который подразумевает единство городской жизнедеятельности и ее организации в пространстве. Хотя, с одной стороны, градостроительная система – среда для этих процессов, она функционирует только во взаимосвязи с ними.

3. Размеры градостроительной системы определяются ее целостностью. Целостность градостроительной системы проявляется через устойчивость социальных и функциональных связей, которые обеспечивает коммуникационная сеть. Реальные границы градостроительной системы, и, следовательно, ее размеры, определяются пределом временных затрат, допустимых на регулярные внутренние сообщения по сети.

4. Непрерывное развитие градостроительной системы характеризуется преемственностью. Градостроительная система – естественно-искусственный объект, который непрерывно подвергается управляющим воздействиям, целенаправленным градостроительным мероприятиям. Иными словами, градостроительная система находится в непрерывном развитии. При этом развитие носит преемственный характер: градостроительные решения воплощаются в виде развития или реконструкции ранее сложившейся системы.

5. Градостроительная система развивается в направлении повышения своего фундаментального функционального свойства, или «целевой функции» – коммуникативности.

³³ Там же.

³⁴ Яргина З.Н., Косицкий Я.В., Владимиров В.В., Гутнов А.Э., Микулина Е.М., Сосновский В.А. Основы теории градостроительства. М.: Стройиздат, 1986. 326 с.

1.1.3 Два подхода к описанию динамического функционирования градостроительной системы

Чтобы построить эффективную модель взаимодействия систем городского землепользования и транспорта, необходимо определить их положение в функционально-структурной организации градостроительной системы. Для этого, в свою очередь, необходимо описать градостроительную систему. При этом описание градостроительной системы, содержательно, и есть построение модели.

Практика построения городских моделей имеет почти столетнюю историю. Ранние статичные модели – концентрическая модель Р. Парка и Э. Берджесса,³⁵ секторная модель Г. Хойта,³⁶ многоядерная модель (модель субцентров) Ч. Харриса и Э. Ульмана,³⁷ модель рынка городских земель В. Алонсо,³⁸ – осуществили значительный вклад в развитие знания о городе. Однако, поскольку, согласно современным представлениям, город – динамически развивающаяся система, перечисленные модели останутся за пределами рассмотрения данной работы.

Далее будут представлены качественный и количественный подходы к описанию динамического функционирования градостроительной системы – построению ее модели. Названия «качественный» и «количественный» условны: принципиальная разница между двумя категориями заключается в наличии либо отсутствии фундаментальной теории городского развития, лежащей в основе моделей.

В ряде моделей «качественной» категории будут рассмотрены каркасно-тканевая, территориально-коммуникационная, неравномерно-районированная модели. Каркасно-тканевая модель – подход к созданию общей теории развития градостроительной системы. Операционные модели – территориально-коммуникационная и неравномерно-районированная, – каждая по-своему детализирует и «обрамляет» прикладными «количественными» инструментами теоретически обоснованный процесс эволюционного развития градостроительной системы.

³⁵ Burgess E.W. The Growth of the City: An Introduction to a Research Project // Publications of the American Sociologist Society. 1924. Vol. 18. P. 142–155.

³⁶ Hoyt H. The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities. Chicago, IL: Chicago University Press, 1939.

³⁷ Harris C.D., Ullman E.L. The Nature of Cities // The Annals of the American Academy of Political and Social Science. 1945. Vol. 242. P. 7–17.

³⁸ Alonso W. Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1965.

В ряде моделей «количественной» категории будут рассмотрены интегрированные модели систем землепользования и транспорта, или LUTI-модели. Это название объединяет несколько групп, или «поколений», различных моделей – гравитационных моделей, эконометрических моделей, моделей микросимуляции. Построению операционных моделей этой категории предшествует наращивание сложности и детализации концептуальной модели землепользования, транспорта и прочих городских подсистем. Структурная сложность такой логической модели заменяет собой общую теорию. Хотя интегрированные модели характеризует несколько механистический перенос математических формул и экономических теорий на городские процессы, такие подходы к описанию механизмов взаимодействия систем землепользования и транспорта поддаются обобщению, и, как будет показано далее, в целом вписываются в общую «качественную» теорию городского развития.

1.2 Качественный подход к описанию динамического функционирования градостроительной системы

1.2.1 Каркасно-тканевая модель градостроительной системы

1.2.1.1 Структура градостроительной системы

Теория общего городского развития А.Э. Гутнова³⁹ возникла в результате обобщения различных теорий, которые описывали характер распространения городских процессов в ходе территориального расширения города. Было выявлено, что эти процессы связаны с поддержанием некоторого соответствия между транспортной доступностью территории и степенью ее освоенности.^{40,41,42}

Теория общего городского развития описывает строение градостроительной системы через понятия «каркас» и «ткань». Каркас – устойчивая структурообразующая часть системы, которая характеризуется высокой интенсивностью пространственного освоения; именно в каркасе сконцентрированы основные процессы жизнедеятельности городского населения. Каркас – «двигатель», который обеспечивает «эффективную и бесперебойную работу "городской машины"». Главный параметр каркаса – его «коммуникативная мощность», которая определяет тот потенциал обмена, что город предлагает жителям. Ткань – основной материальный субстрат градостроительной системы, остальные ее компоненты.

С точки зрения отражения структуры градостроительной системы, каркас характеризуется следующим образом.

1. Каркас фиксирует строение системы предметно. Каркас представляет собой совокупность материально-пространственных элементов системы, выделенных на основе ее внутренних взаимосвязей, а не только эти взаимосвязи.

2. Каркас фиксирует строение системы обобщенно. Каркас представляет собой верхний иерархический уровень структуры системы – самые важные элементы и связи, которые определяют ее структурно-функциональную организацию. Нижележащие иерархические уровни отражены в структуре ткани.

³⁹ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

⁴⁰ Blumenfeld H. Criteria for urban form // The Annals of the American Academy of Political and Social Science. 1964. Vol. 352.

⁴¹ Clark C. Population Growth and Land Use. London: Macmillan, 1968.

⁴² Математические модели внутригородского расселения: франко-советские градостроительные исследования. М.: Стройиздат, 1974.

1.2.1.2 Эволюция градостроительной системы

Динамическое состояние градостроительной системы проявляется в соотношении каркаса и ткани: различные значения соотношения соответствуют различным фазам развития системы. Это справедливо как для коротких временных интервалов ее текущего функционирования, так и для долговременных эволюционных изменений. Эволюция градостроительной системы, ее циклическое развитие, проявляется в поочередном разворачивании двух фаз.

Первая фаза эволюционного развития: количественный рост градостроительной системы. На этом этапе динамическое поведение системы определяется положительными обратными связями, за счет чего воспроизводятся ее стереотипные элементы, ткань. При этом увеличение размеров системы не обеспечивается соответствующим увеличением «коммуникативной мощности» каркаса. Подобная форма развития системы обеспечивается наличием некоторой избыточности потенциала каркаса: рост представляет собой наиболее эффективный способ расхода системных ресурсов. Однако воспроизводство ткани в процессе территориального роста эффективно до тех пор, пока структурно-функциональный потенциал системы, обеспеченный каркасом, позволяет эффективно функционировать всей системе.

Когда резервы увеличения размеров системы подходят к концу, начинают проявляться нарушения в работе различных функциональных подсистем. Так, например, с увеличением размеров системы транспортная нагрузка на нее начинает создавать препятствия в осуществлении ежедневных потребностей горожан. В итоге темпы роста замедляются: система переходит в то состояние, когда ее дальнейшее развитие невозможно без внутренней реорганизации.

Вторая фаза эволюционного развития: качественная структурная реорганизация градостроительной системы. Исчерпавший себя территориальный рост системы сменяется активной структурной реорганизацией. Динамическое поведение системы на этом этапе обеспечивается отрицательными обратными связями. Для продолжения полноценного функционирования системы наиболее эффективными становятся затраты на трансформацию каркаса. Наиболее простой и эффективной формой ликвидации диспропорций между мощностью каркаса и размером системы является пространственное рассредоточение каркаса. Рассредоточению каркаса сопутствует усложнение его внутренней структуры. Движущей силой процесса является взаимно обусловленное движение размещения мест проживания населения и мест приложения труда и обслуживания населения навстречу друг другу.

В результате этого процесса в систему закладываются резервы, как пространственные, так и функциональные, которые необходимы для последующего развития. Тем самым в конце

этой фазы возникают предпосылки и возможности для последующего увеличения ее размеров: начинается новый этап территориального роста.

На рисунке 1.1 приведена диаграмма цикла эволюционного развития градостроительной системы.⁴³

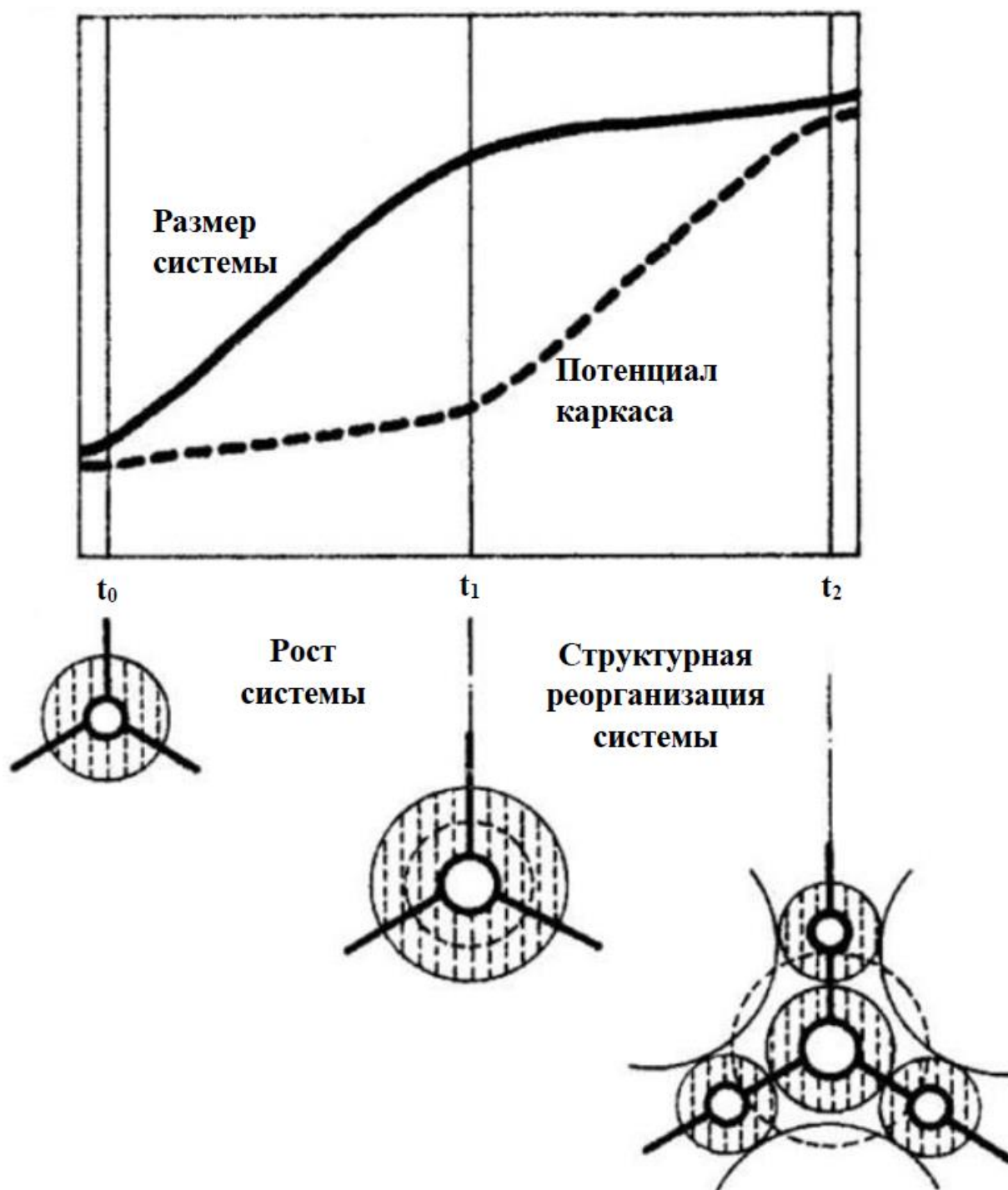


Рисунок 1.1 – Диаграмма цикла эволюционного развития градостроительной системы.

⁴³ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

1.2.1.3 Свойства эволюционной динамики каркаса и ткани

1. Существует предельное соотношение каркаса и ткани, которое обеспечивает эффективность градостроительной системы. Допустимый размер системы определяется мощностью каркаса. Меньшим значениям относительной мощности каркаса соответствуют большие значения издержек времени на единицу контакта. Так как время ограничено рамками суточного цикла жизнедеятельности человека, существует лимит допустимых затрат, который ощущается горожанином. Такому лимиту соответствует предельное соотношение каркаса и ткани. Для каждой системы оно устанавливается эмпирически, с учетом ее особенностей, и может быть выражено значением относительной мощности каркаса. Если это значение нарушено, то система перестает быть эффективной – она разрушается.

2. Объем территориального роста градостроительной системы на каждой фазе развития ограничен. При увеличении размеров градостроительной системы должно происходить соответствующее увеличение мощности каркаса. В действительности развитие каркаса происходит с задержкой, и «синхронизация» темпов развития системы и ее структурообразующей части имеет дискретный характер. При этом величина предельно допустимого «рассогласования» определяется приведенными выше объективными условиями эффективности системы – таким образом, для каждой фазы развития определяется «шаг» территориального роста.

3. Оптимальное значение относительной мощности каркаса градостроительной системы изменяется со временем. Существует значение относительной мощности каркаса, вокруг которого с определенной «амплитудой» происходят его «колебания». Это значение соответствует наиболее эффективному соотношению каркаса и ткани – функционированию системы с наименьшими затратами и без качественных потерь; оно не остается неизменным с течением времени, а меняется вместе с размерами системы.

4. Направление эволюции градостроительной системы – от простого к сложному. Две формы динамического поведения системы составляют две взаимосвязанные стороны единого процесса развития. Несмотря на равнозначность двух этапов развития системы, общий процесс градостроительной эволюции протекает в направлении от низких форм структурной организации к высоким. Иными словами, эволюцию системы характеризует общая тенденция к повышению значений относительной мощности каркаса, на фоне которого происходят его колебания в соответствии с универсальным принципом эволюционного циклического развития.

5. Естественной эволюции градостроительной системы препятствуют внешние факторы. Многолетний эволюционный процесс развития системы сопровождается большим

количеством факторов, воздействующих на его естественный ход. Выделим две группы самых характерных и значимых возмущений.

5.1. Административные границы города. Не соответствующие объективным границам градостроительной системы административные границы оказывают влияние на градостроительную политику, и, следовательно, на процесс естественного развития. Искусственное сосредоточение градостроительной деятельности в субъективно заданных границах может привести к значимым издержкам в развитии реального объекта.

5.2. Технический прогресс в сферах строительства и транспорта. Увеличение плотностей освоения территорий и скоростей внутригородских передвижений изменяют параметры городского развития и, следовательно, способствуют появлению новых требований к его структурно-функциональной организации.

1.2.1.4 Каркас градостроительной системы как транспортная инфраструктура

Как было отмечено, городской транспорт приобретает все большее значение для эффективного функционирования города. Осмысление роли транспорта в планировке современного города было выражено в понятии «транспортная инфраструктура».⁴⁴ В некоторых аспектах понятие «инфраструктуры» сходно по своему смыслу с понятием «каркаса». Однако, как и в случае понятия «город», понятие «инфраструктура» сопряжено с противоречиями и неопределенностями.

С одной стороны, оно указывает на уровень развития транспортной сети как важного элемента инженерного оборудования города, а также выявляет пространственную основу реализации функций городской жизнедеятельности. С другой стороны, термин «инфраструктура» имеет ограниченную интерпретацию, близкую по смыслу к «системе обеспечения»: термин чаще всего применяется по отношению к отдельным подсистемам, то есть не обладает необходимой универсальностью.

В то же время, важнейшие свойства транспортной инфраструктуры переносимы на термин «транспортный каркас». Во-первых, термин отражает структурообразующую роль транспортной инфраструктуры в градостроительной системе; во-вторых, он отражает предметно-обобщенный подход к описанию системы. Наконец, главная характеристика каркаса, которая определяет потенциал выбора, его «коммуникативная мощность», является и главной содержательной характеристикой транспортной инфраструктуры.

⁴⁴ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

Разумеется, понятие «каркаса» не исчерпывается исключительно транспортным каркасом; существует множество других применений, «приложений» этого термина – например, «зеленый каркас». Однако, поскольку цель данной работы – построение модели взаимодействия систем транспорта и землепользования на фундаменте теории общего городского развития, отождествление «транспортной инфраструктуры» и «транспортного каркаса» представляется обоснованным. Поэтому далее, как и в случае «города» и «градостроительной системы», понятие «транспортная инфраструктура» будет пониматься в смысле «транспортного каркаса».

Хотя А.Э. Гутновым были предложены методы по выявлению каркаса, и проведены соответствующие расчеты для Московской градостроительной системы,⁴⁵ каркасно-тканевая модель в большей степени является теоретической моделью, нежели сугубо операционной. Первоочередной задачей данной модели было создание фундаментальной теоретической базы для реализации дальнейшей программы по изучению строения градостроительной системы, ее функционирования и развития во времени. В качестве операционных, прикладных моделей, которые учитывали бы эволюционную динамику городского развития, в дальнейшем были разработаны территориально-коммуникационная и неравномерно-районированная модели.

⁴⁵ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

1.2.2 Территориально-коммуникационная модель градостроительной системы

1.2.2.1 Структура градостроительной системы

Эволюционная территориально-коммуникационная модель градостроительной системы, разработанная в Научно-исследовательском и проектном институте Генерального плана города Москвы, является развитием идей А.Э. Гутнова применительно к современным экономическим условиям.^{46,47} В названии модели отражена предлагаемая структура градостроительной системы: ее элементы, – территории, или ареалы, – связаны в единую систему комплексом транспортно-коммуникационных связей – корреспонденций. Объекты, размещенные в границах территориальных элементов системы, – районов, кварталов, участков, их групп, – могут быть как источниками корреспонденций (например, жилищный фонд), так и их целями (например, места приложения труда и обслуживания населения).

В основе модели лежит гипотеза о том, что «целевая функция» города заключается в расширении пространственно-временной доступности выбора. Выбор, который предоставляет каждая отдельная территория системы – количество и разнообразие возможных взаимодействий между объектами и их потребителями, которые находятся на территории, а также в пределах времени комфортной доступности до нее.

Объем выбора зависит от двух базовых факторов. Первый фактор – насыщенность территории населением или объектами тяготения населения, то есть целями корреспонденций. Насыщенность территории является индикатором ее привлекательности. Второй фактор – обширность транспортных связей территории с другими территориями, то есть ее транспортная доступность. Индикаторами транспортной доступности территории являются значения связности территории с населением и с местами приложения труда и обслуживания населения.

Выбор, который предоставляет каждая территория, тем больше, чем выше значения показателей ее насыщенности и связности. Объем выбора определяет эффективность организации территории. При этом увеличение выбора может осуществляться путем повышения значений как каждого фактора в отдельности, так и обоих одновременно.

⁴⁶ Баевский О.А. Закономерности непрерывного развития жилой среды крупнейшего города (на примере Москвы) // Экология города и проблемы управления. М., 1989.

⁴⁷ Баевский О.А. Эволюционный подход к управлению градостроительным развитием крупнейшего города. Московский опыт // Градостроительство России XXI века. Сборник научных статей РААСН. М.: Московские учебники и картолитография, 2001.

1.2.2.2 Эволюция градостроительной системы

Взаимосвязь двух территориальных характеристик, насыщенности и связности, подчиняется механизмам самоорганизации, свойственным сложным системам. С одной стороны, это положительные обратные связи: повышение доступности территории ведет к размещению объектов тяготения на ней, что, в свою очередь, повышает ее привлекательность и требует увеличения доступности. Такая связь действует если рост эффекта опережает рост издержек. Уравновешивающие отрицательные обратные связи обусловлены конкуренцией территорий за размещение источников, посредников или объектов корреспонденций.

В процессе итеративной балансировки значений насыщенности и связности выявляется область их оптимальных значений. Этим значениям соответствует максимально эффективная организация территории, к которой естественным образом эволюционируют все прочие значения. Одновременное изменение значений показателей возможно в результате проведения масштабных проектов. Однако естественный процесс эволюционного развития реализуется путем действий большого количества городских агентов. Этот процесс имеет дискретный характер и представляет собой последовательное движение навстречу максимально эффективной форме градостроительной организации территории. Таким образом, в градостроительной системе имеет место эволюционная тенденция к обеспечению сбалансированных значений характеристик насыщенности и связности, с одной стороны, и совместному повышению абсолютных значений этих характеристик, с другой.

1.2.2.3 Оценочная матрица как инструмент оценки уровня структурной развитости и выбора направления развития территориальных элементов градостроительной системы

Двумерная оценочная матрица – основной аналитический инструмент оценки территорий градостроительной системы и выявления предпосылок их развития. Измерения матрицы – градостроительный потенциал территории, выраженный ее связностью, и уровень градостроительного использования территории, выраженный ее насыщенностью. Матрица состоит из девяти ячеек, которые отличаются комбинациями значений исходных ранговых характеристик оценок территорий: высоких, средних, низких.

На рисунке 1.2 изображена оценочная матрица, которая по значениям исходных признаков территорий определяет следующие показатели уровня их структурной развитости.

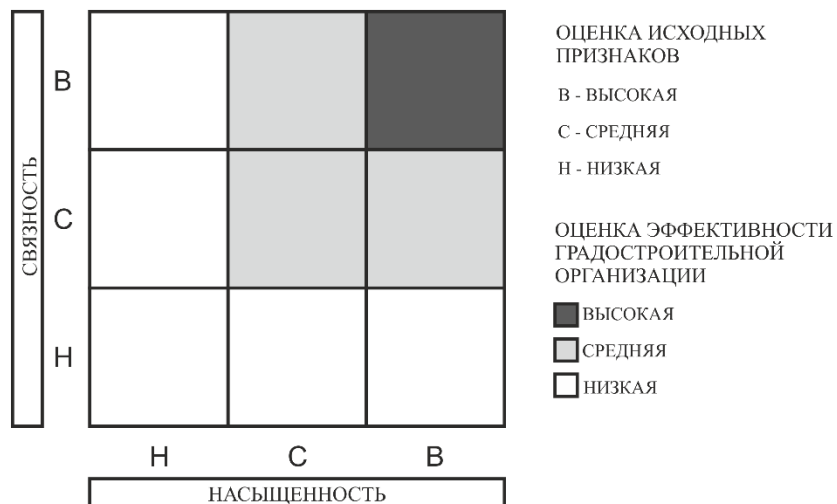
1. Эффективность градостроительной организации территории, объем выбора. «Эталонная» для системы организация представлена территориями с высокими значениями

связности и насыщенности. Изменения на такой территории влияют на состояние системы в целом. «Слабые звенья» системы представлены территориями с низкими значениями насыщенности и связности, у которых отсутствуют предпосылки повышения эффективности организации. Большую часть градостроительной системы составляют территории со средними значениями базовых оценочных факторов. Устойчивость функционирования таких территорий обеспечивается за счет сбалансированности характеристик, а их средние значения указывают на ограниченное влияние на общее состояние системы.

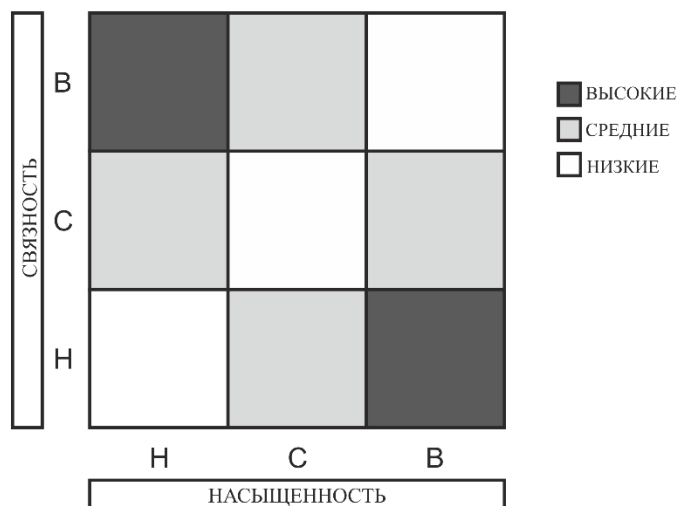
2. Величина существующих диспропорций территориальной организации. Территориальные диспропорции – предпосылки развития, внутренние ресурсы повышения эффективности организации территории. Показатель определяется путем сравнения существующих значений насыщенности и связности территории. Кроме того, диспропорции показывают разность между значениями существующего и потенциального уровня градостроительной организации территории.

3. Вид диспропорций территориальной организации. Зонирование матрицы по направленности развития территории качественно различает характер диспропорции, выделяя зону сбалансированности, зону недостатка связности, зону недостатка насыщенности. Недостаточно используемая доступность – ресурс территории со значением насыщенности меньшим, чем сбалансированное значение; развитие такой территории следует направить в сторону повышения насыщенности. Для территории со значением насыщенности большим, чем сбалансированное значение, возможны два варианта. Если недоиспользуема привлекательность территории – следует повышать связность. Если территория осуществляет негативное воздействие на окружение – следует уменьшать насыщенность.

ИСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРРИТОРИИ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ



ДИСПРОПОРЦИИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ



ВИДЫ ДИСПРОПОРЦИЙ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

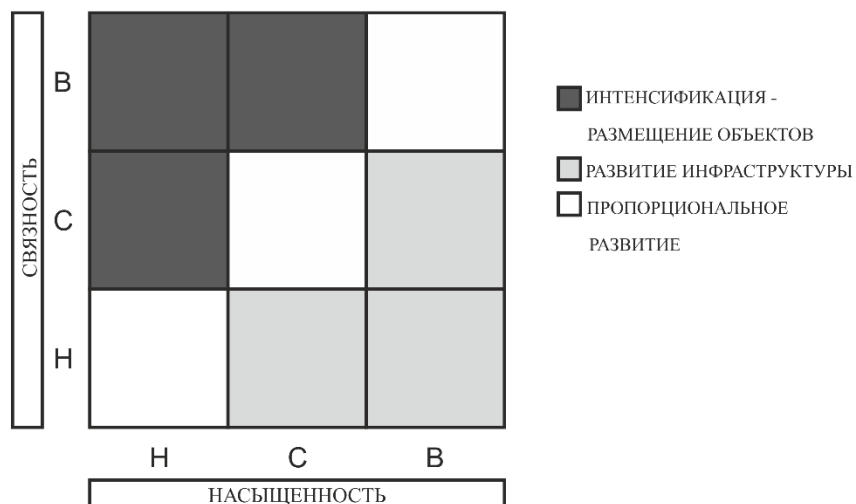


Рисунок 1.2 – Оценочная матрица.

1.2.3 Неравномерно-районированная модель градостроительной системы

1.2.3.1 Инструмент пространственного прогнозирования городской инерционной застройки

Экстраполяционные прогнозы, – методы определения параметров объекта при сохранении тенденций предшествующего периода, – долгое время применялись в градостроительстве применительно к непространственным явлениям. А.А. Высоковским был предложен метод пространственного экстраполяционного прогноза – метод определения будущего размещения новых городских объектов.⁴⁸

Объектом такого прогнозирования может быть как градостроительная система в целом, так и ее отдельные функциональные части. Однако объект прогнозирования должен обладать признаком, который монотонно изменяется во времени и который возможно описать количественно – например, плотность застройки. Прогноз строится на основе территориального распределения значений такого признака. Рассматриваемая территория покрывается сеткой из равных ячеек; местоположение элементов описывается показателями плотности, записанными в ячейках. На пространственное размещение новых объектов влияет большое количество факторов. Поскольку невозможно воспроизводить все факторы в каждом новом случае, было предложено рассматривать территориальные распределения как вероятностный процесс. Построение прогноза заключается в выделении и распространении в будущее тренда – детерминированной регулярной составляющей вероятностного процесса. Однако результат прогнозирования, основанный на вероятностном подходе, распространяется только на инерционную составляющую.

Инерционные городские объекты – объекты, которые сохраняют тенденции предыдущего этапа развития градостроительной системы. Подобные объекты характеризует набор качеств, выгодных при градостроительном проектировании, таких как планировочная маневренность и постепенность формирования. Иными словами, они вписываются в сложившуюся ситуацию с минимальными изменениями планировочной структуры, что позволяет избежать неисправимых градостроительных ошибок.

Построение экстраполяционного прогноза завершается сводным прогнозом инерционного развития застройки. Цель свода – воспроизведение целостной картины развития пространственной организации системы. Сводный прогноз должен давать ответ на вопрос о

⁴⁸ Высоковский А.А. Пространственное прогнозирование застройки сложившихся городов. Серия: Гражданское строительство и архитектура. М.: ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1986.

соотношении развития жилищного фонда и общественно-делового фонда, и местах их размещения.

1.2.3.2 Структура градостроительной системы

Развитием идей пространственного прогнозирования застройки сложившихся городов стало появление неравномерно-районированной эволюционной модели градостроительной системы.⁴⁹ Инструмент выявления инерционной застройки в рамках неравномерно-районированной модели применяется для определения функционально-пространственной организации города, а также для прогнозирования формирования новых городских центров.⁵⁰

Концепция неравномерно-районированной пространственной структуры города основана на фундаментальных характеристиках поведения горожан.⁵¹ Согласно исходному положению, поведение людей в городе упорядочивается с помощью особых пространственных ориентиров, «точек отсчета», публичных и частных, которым соответствуют свои сценарии поведения. В результате такого упорядочивания формируются относительно автономные пространственные структуры – узловые районы. Узловые районы, по определению Б.Б. Родомана, это «моноцентрические ареалы, объединенные центробежными и центростремительными потоками вещества, энергии или информации».⁵² По Б.Б. Родоману, узловой район описывает принцип организации всех территориально-пространственных систем, связанных с социальной деятельностью. Каждый узловой район состоит из двух частей.

Первая составная часть узлового района – центр, его коммуникационно-публичная система. Центр, сформированный путем концентрации общественно-деловых объектов, характеризуется высокой интенсивностью использования территории. Сам центр состоит из нескольких элементов: главное ядро – территории максимальной концентрации объектов обслуживания, плотности застройки, разнообразия услуг; дополнительные ядра – территории высокой концентрации объектов обслуживания и плотности застройки, включающие

⁴⁹ Высоковский А.А. Курс лекций «Теория пространственного развития» // Александр Высоковский в 3 т. Том 3. Public. M.: Grey Matter, 2015. С. 126-315.

⁵⁰ Котов Е.А., Гончаров Р.В., Новиков А.В., Никогосян К.С., Городничев А.В. Москва: курс на полицентричность. Оценка эффектов градостроительных проектов на полицентрическое развитие Москвы. М.: [б.и.], 2016.

⁵¹ Высоковский А.А. Правила землепользования и застройки: руководство по разработке. Опыт введения правового зонирования в Кыргызстане. Бишкек: Ега-Басма, 2005. 326 с.

⁵² Родоман Б.Б. Территориальные ареалы и сети. Очерки теоретической географии. Смоленск: Ойкумена, 1999. 256 с.

минимум один значимый уникальный объект; связевые элементы – территории с интенсивными пешеходными и транспортными потоками, но средней интенсивностью использования.

Вторая составная часть узлового района – монофункциональные территории. Такие территории располагаются на периферии района, и состоят из жилых, производственных или рекреационных территорий. Границы этих территорий совпадают с границами всего узла, и включают в себе население, которое с наибольшей вероятностью тяготеет к главному ядру.

Узловой район характеризуется уровнем структурной развитости. Этот интегральный показатель отражает конфигурацию, мощность, функциональный состав ядер, интенсивность использования территории, и другие характеристики. Уровень структурной развитости зависит от удаленности от точки отсчета, длительности срока жизни, величины города. Количественно он выражается как суммарный объем общественно-деловой застройки в границах узла. Именно анализ структурной развитости позволяет выявить тенденции развития, а, следовательно, прогнозировать рост и изменения.

Кроме узловых районов существуют однородные неструктурированные территории города, не относящиеся ни к одному ядру; обычно это районы индивидуальной жилой застройки или промышленные площадки на периферии города.

1.2.3.3 Эволюция градостроительной системы

Неравномерно-районированная пространственная структура города составлена из узловых районов различной степени развитости и размера, с разным числом жителей и разной пространственной конфигурацией. Схема пространственной структуры градостроительной системы приведена на рисунке 1.3.⁵³

Функционирование градостроительной системы заключается в создании, развитии, соединении и разделении территориальных единиц. Формирование города начинается с появления одной пространственной единицы, по мере роста города формируются следующие. Порядок присоединения каждой единицы к центральной более важен, чем физические расстояния между ними, поэтому расстояния в этой модели измеряются ранговыми номерами присоединения – «дистанциями». Центральная единица – первая дистанция. Следующие, примыкающие к ней единицы формируют вторую дистанцию, и так далее. Уровень структурной развитости единиц снижается по мере удаления от центральной единицы, при

⁵³ Высоковский А.А. Курс лекций «Теория пространственного развития» // Александр Высоковский в 3 т. Том 3. Public. М.: Grey Matter, 2015. С. 126-315.

этом единицы одной дистанции с большой долей вероятности будут иметь близкий уровень структурной развитости.

Развитая пространственная структура города состоит из главной (центральной) единицы, рядовых (срединных) единиц, расположенных на любой дистанции и периферийных единиц, находящихся на начальной стадии развития. При этом все указанные типы узлов предоставляют относительно полноценную среду проживания.

Пространственное развитие градостроительной системы в терминах неравномерно-районированной модели описывается как «аппликативная динамика». Это означает, что каждая пространственная единица развивается одновременно и как автономный узловой район, со своими атрибутами, и как элемент системы.

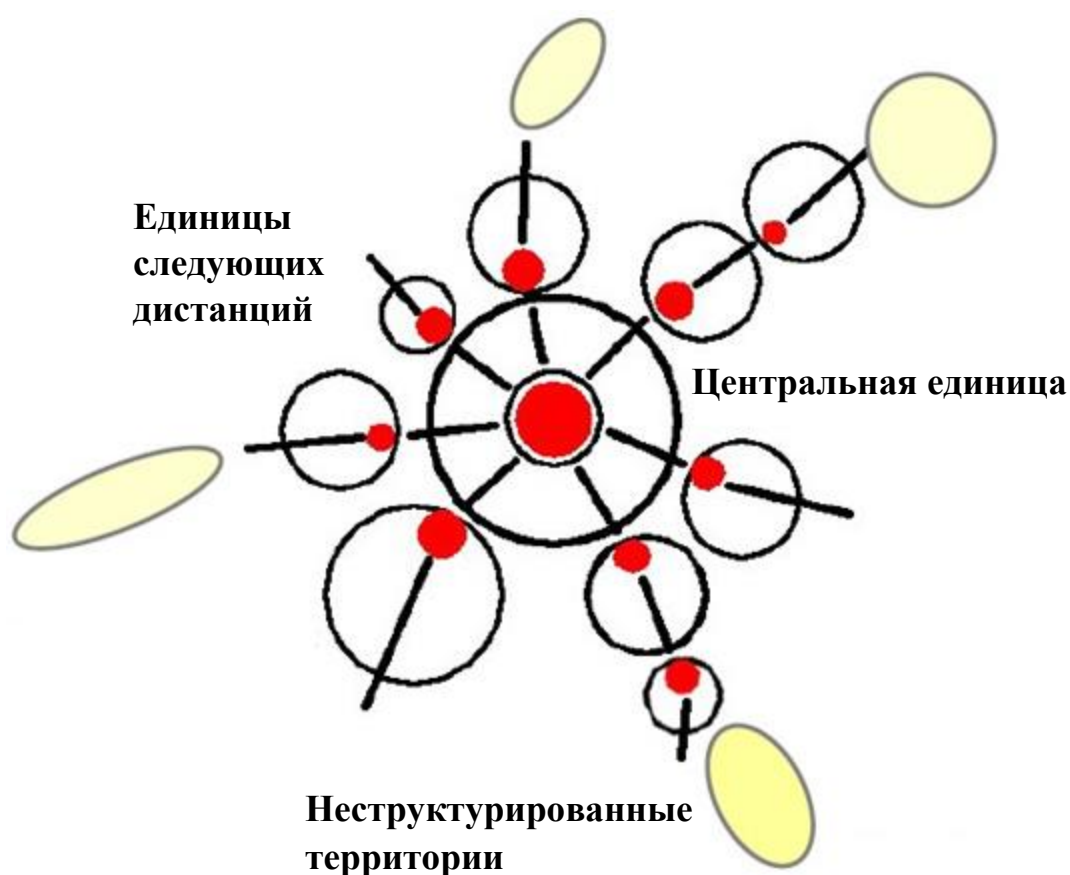


Рисунок 1.3 – Неравномерно-районированная пространственная структура градостроительной системы.

1.3 Количественный подход к описанию функционирования градостроительной системы

1.3.1 Концептуальная интегрированная модель систем городского землепользования и транспорта

В основу «количественных» динамических моделей градостроительной системы лег следующий вопрос: каким образом системы городского землепользования и транспорта влияют друг на друга?

Тезис о взаимодействии систем городского землепользования и транспорта появился в 1959 г. в статье У. Хансена «Как транспортная доступность придает форму землепользованию».⁵⁴ В работе было продемонстрировано, что чем лучше транспортная доступность территории, тем выше вероятность того, что эта территория будет развиваться. Дальнейшее изучение вопроса показало, что механизмы, с помощью которых осуществляется взаимодействие систем землепользования и транспорта, тяжело выявить и эмпирически оценить. Наблюдаемые структуры систем землепользования и транспорта возникают в результате экономических, социодемографических, политических, физических процессов; эти процессы разворачиваются на разных временных шкалах и включают факторы разной степени определенности.⁵⁵ Кроме того, значительную роль играет поведение горожан, в частности, их транспортное поведение.⁵⁶ Следовательно, чтобы описать связи между системами землепользования и транспорта, необходимо выделить одновременно и в пространстве, и во времени, базовые механизмы, которые вовлечены в процесс взаимодействия.

Таким образом, системный подход был применен с целью декомпозиции градостроительной системы, ее представления в виде большого количества взаимосвязанных подсистем. Такое «всеохватывающее» описание городских систем заключается в попытке учесть все городские подсистемы и все связи между ними, которые только возможны. На рисунке 1.4 приведена одна из таких моделей.⁵⁷ Получающиеся в результате логические

⁵⁴ Hansen W. How Accessibility Shapes Land Use // Journal of the American Institute of Planners. 1959. Vol. 25. P. 73-76.

⁵⁵ Acheampong R., Silva E. Land use–transport interaction modeling: A review of the literature and future research directions // The Journal of Transport and Land Use. 2015. Vol. 8. No. 3. P. 1–28.

⁵⁶ Там же.

⁵⁷ Geurs K., Wee B. Land-use/transport Interaction Models as Tools for Sustainability Impact Assessment of Transport Investments: Review and Research Perspectives // European Journal of Transport and Infrastructure Research. 2004. Vol. 4. No. 3. P. 333-355.

описания градостроительной системы заменяют собой фундаментальную теорию, на базе которой можно было бы строить операционные модели. Эти модели не выходят за рамки концептуальных построений, поскольку большую часть связей между подсистемами невозможно эмпирически измерить и, следовательно, представить в достаточно формализованном для включения в операционную модель виде.

Несмотря на большое количество примеров такого описания,^{58,59,60} инвариантным ядром такого подхода является представление о системах землепользования и транспорта как о ключевых элементах градостроительной системы, динамической обратной связью между которыми служит индикатор транспортной доступности.

Механизмы спроса и предложения системы формируют эндогенные компоненты модели.⁶¹ В системе землепользования представлены пространственное распределение предложения земельных участков и пространственное распределение спроса на виды деятельности. Установление равновесия между спросом и предложением приводит к формированию пространственно-функциональной организации градостроительной системы. Система землепользования влияет на транспортную систему путем формирования спроса на поездки между местами концентрации городской жизнедеятельности. В результате установления равновесия между указанным спросом и предложением транспортной инфраструктуры формируются структуры поездок-коммуникаций.

Экзогенные компоненты модели составляют системы, которые в различной степени влияют на землепользование и транспорт. В общем случае эти факторы включают экономику, социодемографические и социокультурные характеристики населения, окружающую среду, уровень технологического развития.

Промежуточные эффекты отражают изменения в функционировании эндогенных систем. Итоговый эффект вне этих систем взаимодействует с экзогенными системами, создавая обратную связь. Итоговые эффекты влияют на принятие решений в области

⁵⁸ Acheampong R., Silva E. Land use–transport interaction modeling: A review of the literature and future research directions // *The Journal of Transport and Land Use*. 2015. Vol. 8. No. 3. P. 1–28.

⁵⁹ Lundqvist L. Land-Use and Travel Behaviour. A Survey of Some Analysis and Policy Perspectives // *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. 2003. No. 3. P. 299–313.

⁶⁰ Southworth F. A Technical Review of Urban Land Use-Transportation Models as Tools for Evaluating Vehicle Travel Reduction Strategies. Report number ORNL-6881, prepared for the U.S. Department of Energy, 1995.

⁶¹ Geurs K., Wee B. Land-use/transport Interaction Models as Tools for Sustainability Impact Assessment of Transport Investments: Review and Research Perspectives // *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. 2004. Vol. 4. No. 3. P. 333–355.

управления системами землепользования и транспорта в вопросах их воздействия на экономику, окружающую среду, социальную сферу.

Связующее звено между изменением мест концентрации городской жизнедеятельности и спроса на поездки — транспортная доступность.⁶² Индикаторы доступности «интегрированы» в места концентрации деятельности чтобы операционализировать связь между системами землепользования и транспорта. Считается, что жилищный фонд тяготеет к размещению на территориях с лучшей транспортной доступностью к местам приложения труда и обслуживания населения, а общественно-деловой фонд — к размещению на территориях с высокой доступностью к рынку труда. Транспортный компонент интегрированных моделей, который содержит процедуру распределения транспортных потоков, рассчитывает время как индикатор доступности, и тем самым предлагает оценку влияния пробок на доступность территорий концентрации городской активности. Значения транспортной доступности, в свою очередь, являются входными данными в систему землепользования, и, тем самым, обеспечивается динамическая обратная связь.

⁶² Geurs K., Wee B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions // Journal of Transport Geography. 2004. No. 12. P. 127–140.

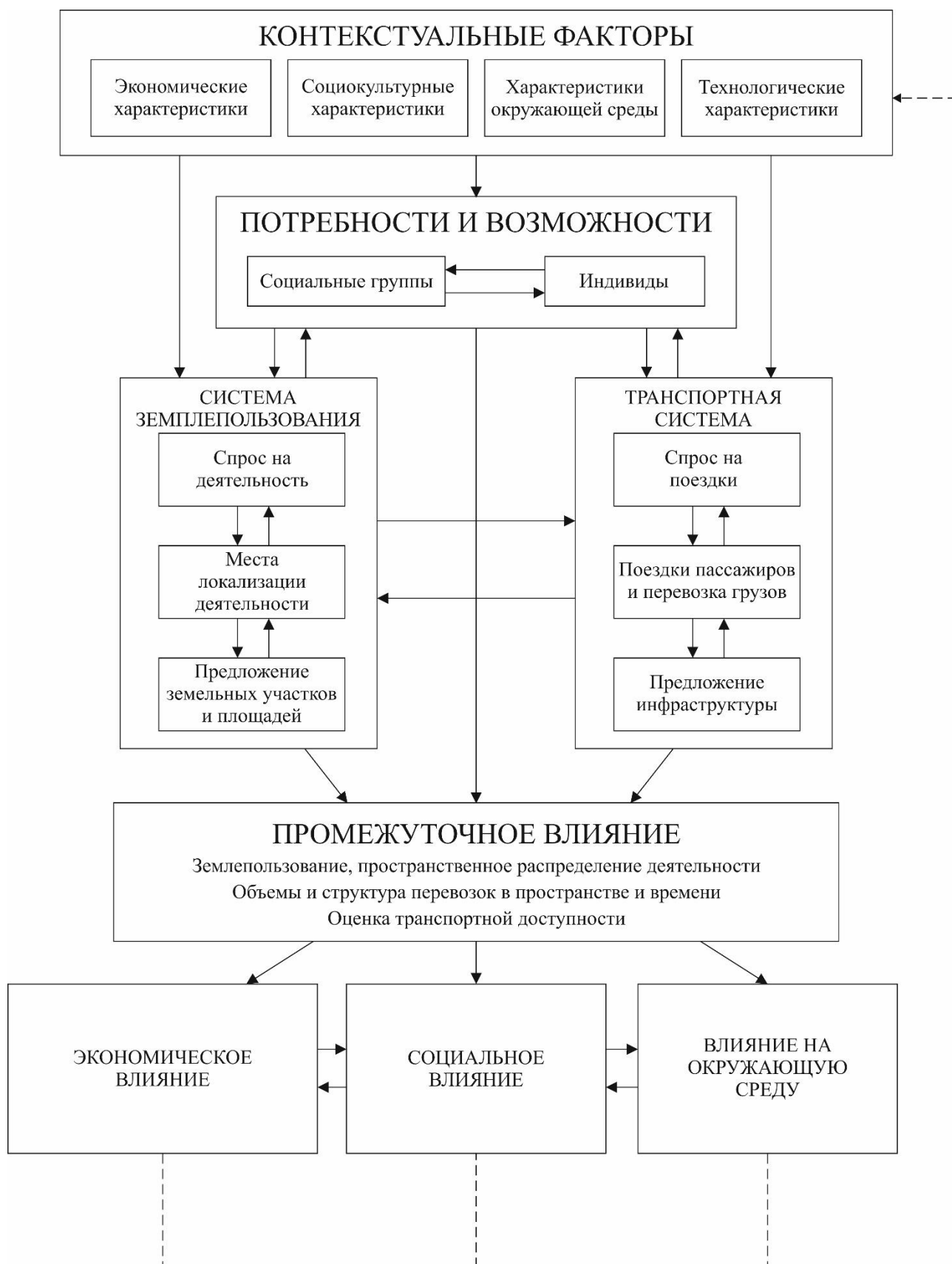


Рисунок 1.4 – Концептуальная схема интегрированной модели систем городского землепользования и транспорта.

1.3.2 Прикладные операционные интегрированные модели систем городского землепользования и транспорта

При переходе к построению операционных моделей выделяются факторы, влияющие на решение задачи, для которой строится модель. Таким образом, концептуальная схема операционной интегрированной модели представляет собой упрощенную концептуальную схему «всеохватывающей» модели градостроительной системы. Обобщенная схема прикладной интегрированной модели приведена на рисунке 1.5.⁶³

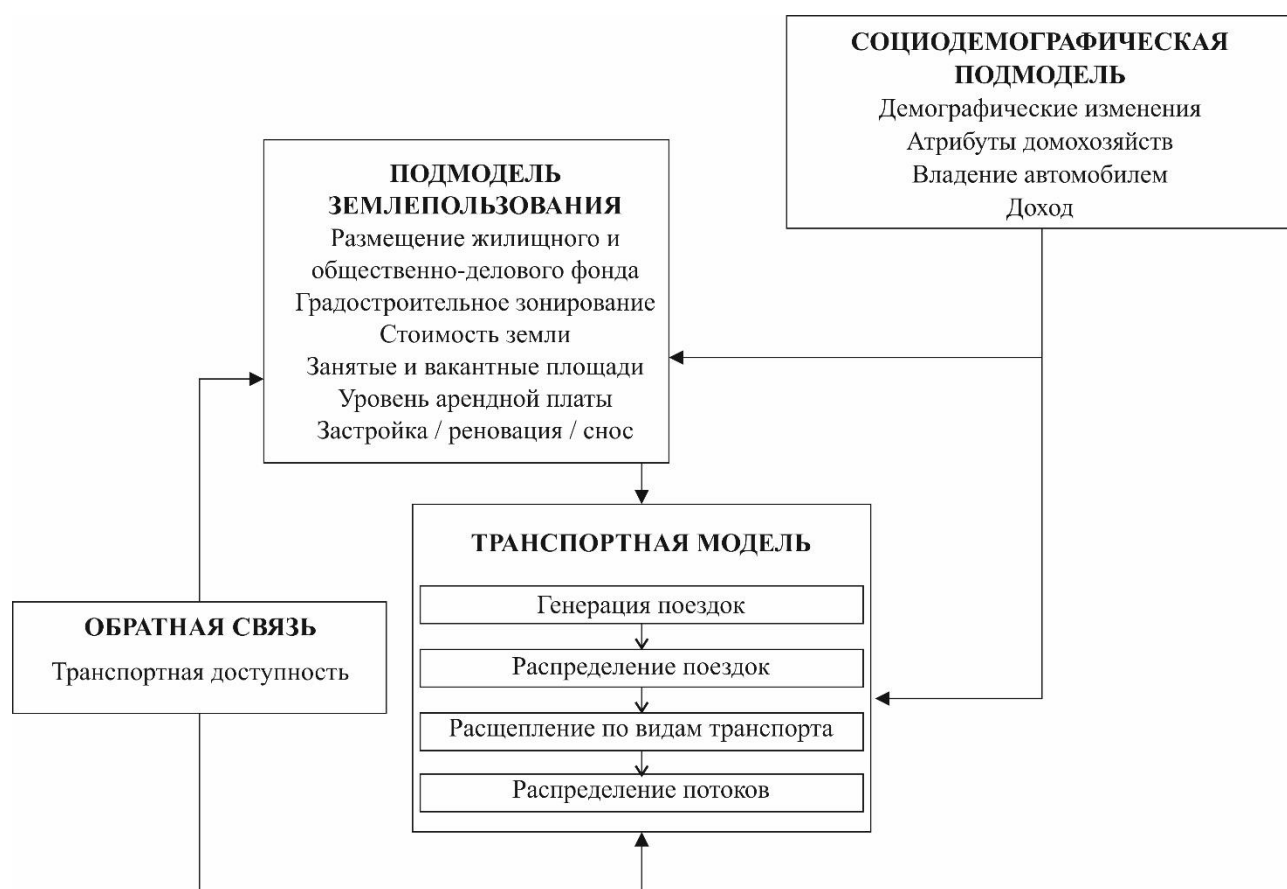


Рисунок 1.5 – Обобщенная схема прикладной интегрированной модели систем городского землепользования и транспорта.

⁶³ Acheampong R., Silva E. Land use–transport interaction modeling: A review of the literature and future research directions // The Journal of Transport and Land Use. 2015. Vol. 8. No. 3. P. 1–28.

На протяжении последних более чем пятидесяти лет число интегрированных моделей землепользования и транспортных систем возрастало экспоненциально.⁶⁴ В развитии интегрированных моделей выделяют «волны»,⁶⁵ или «поколения»,⁶⁶ вызванные переходами от одной техники моделирования к другой, новыми теоретическим прорывами и эмпирическим наблюдениями. Развитие моделей шло в направлении все более disaggregated репрезентации агентов и пространственных структур, дифференциации учитываемых факторов. Выбор техники моделирования был обусловлен структурой концептуальной модели, достижениями в эконометрическом моделировании, доступностью данных, вычислительными возможностями.⁶⁷

Первое поколение: агрегированные статичные гравитационные модели.^{68,69,70}

Работа над первыми крупномасштабными городскими моделями началась в 1950-ых годах. В первых моделях градостроительные системы представлялись статичными: пространство рассматривалось как дискретное поле из агрегированных зон, взаимодействие между системами землепользования и транспорта определялось как набор агрегированных связей, основанных на поведении «репрезентативного индивида» считалось, динамика системы была направлена в сторону установления равновесия.

Эти модели опирались на предположении о том, что уровень «пространственных взаимодействий» между зонами прямо пропорционален уровню активности между ними, и обратно пропорционален транспортному «сопротивлению». Поскольку это предположение аналогично закону гравитации Ньютона, такие модели также называются «гравитационными моделями».

⁶⁴ Chang J. Models of the relationship between transport and land-use: A review // Transport Reviews. 2006. No. 26. P. 325–350.

⁶⁵ Timmermans H. The saga of integrated land use-transport modeling: How many more dreams before we wake up? // 2003. URL: http://www.ivt.ethz.ch/news/archive/20030810_IATBR/timmermans.pdf (дата обращения: 1.05.2017).

⁶⁶ Silva E., Wu N. Surveying models in urban land studies // Journal of Planning Literature. 2012. No. 27. P. 139–152.

⁶⁷ Sivakumar A. Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies. London: Imperial College, 2007.

⁶⁸ Там же.

⁶⁹ Iacono M., Levinson D., El-Geneidy A. Models of transportation and land use change: A guide to the territory // Journal of Planning Literature. 2008. No. 22. P. 323–340.

⁷⁰ Chang J. Models of the relationship between transport and land-use: A review // Transport Reviews. 2006. No. 26. P. 325–350.

Первой гравитационной моделью, примененной к задачам прогнозирования землепользования и транспорта, является «Модель Метрополиса» Лоури.⁷¹ Целью создания модели была оценка эффекта программ по расчистке тущоб на изменение структуры расселения.⁷² Модель Лоури оказалась достаточно гибкой, и этот подход породил семейство моделей.⁷³ Однако к концу 1960-ых годов от этого подхода практически целиком отказались. Будучи статичными, эти модели не были способны реалистично отразить пространственные процессы и их влияние на транспортную систему.⁷⁴

Второе поколение: эконометрический подход. К развитию моделей второго поколения привели прорыв в вычислительных возможностях и доступности данных. Динамические модели исходят из того, что различия в скоростях различных городских процессов настолько значимы, что градостроительные системы никогда не пребывают в равновесии. Модели этого поколения смогли ответить на один из наиболее критикуемых моментов предыдущего – недостаток теории. Использование теории полезности со случайным выбором и достижения в дискретной математике позволили улучшить вычисление транспортной доступности.

Модели математического программирования^{75,76} получают максимально эффективную пространственную структуру при заданном множестве ограничений путем минимизации расходов (или максимизации выгоды). Первым применением методов математического программирования к задаче взаимодействия систем землепользования и транспорта было исследование с целью определения оптимального распределения домохозяйств по жилому району.⁷⁷ В основе модели лежит положение о том, что рациональному поведению агентов соответствует оптимальности по Парето.

⁷¹ Lowry I. A Model of Metropolis. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1964.

⁷² Iacono M., Levinson D., El-Geneidy A. Models of transportation and land use change: A guide to the territory // Journal of Planning Literature. 2008. No. 22. P. 323–340.

⁷³ Horowitz A.J. Lowry-type land use models // Handbook of transport geography and spatial systems. 2004. P. 167-183.

⁷⁴ Lee D. Requiem for Large-Scale Models // Journal of the American Institute of Planners. 1973. No. 39. P. 163–178.

⁷⁵ Chang J. Models of the relationship between transport and land-use: A review // Transport Reviews. 2006. No. 26. P. 325–350.

⁷⁶ Sivakumar A. Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies. London: Imperial College, 2007.

⁷⁷ Herbert J., Stevens B. A model for the distribution of residential activity in urban areas // Journal of Regional Science. 1960. No. 2. P. 21–36.

Модели полезности со случайным выбором^{78,79} объясняют связь между характеристиками территории и поведением потребителей: агентам приписывается функция полезности в качестве отношения к атрибутам территории. Связь между системами землепользования и транспорта выражается через максимизацию функций полезности агентов, которые принимают решение. Подход не только вывел проблему поведения выбора на уровень индивида, но также признал дискретную природу выбора. Предполагается, что рациональный потребитель выбирает территорию, которая обеспечивает ему максимальную полезность. Однако подход отражает только однонаправленную связь между транспортом и землепользованием: модель эндогенно рассчитывает транспортную доступность места, но при заданной транспортной системе и с фиксированными транспортными расходами.

Модель Алонсо,⁸⁰ или модель ставки-ренты,^{81,82} использует гибридный концепт, который объясняет процесс формирования функционально-пространственной организации градостроительной системы. «Ставка» описывает поведение агентов: они делают ставки за предпочитаемую территорию. Землевладельцы отдадут территорию тому, кто сделает максимальную ставку. Максимальная ставка может рассматриваться как ценность территории. В результате взаимно определяются структура землепользования и стоимости земельных участков. «Рента» – цена, которую наниматель готов заплатить за территорию. Модели предлагают рациональное описание процесса принятия решения потребителем и взаимодействия между индивидами: ставка прямо связана с желанием индивида заплатить.

Однако, влияние транспорта и землепользования друг на друга не устанавливается явным образом: в большинстве операционных моделей транспортная система служит лишь одним из компонентов ограничений бюджета агента, который принимает решение.

Третье поколение: дисагрегированные модели микросимуляции. Представление градостроительных систем в виде «закрытых» математических и статистических моделей зачастую приводило к неточным прогнозам. Градостроительные системы формируются путем коллективных действий и самоорганизации большого количества агентов, и являются

⁷⁸ Chang J. Models of the relationship between transport and land-use: A review // Transport Reviews. 2006. No. 26. P. 325–350.

⁷⁹ Sivakumar A. Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies. London: Imperial College, 2007.

⁸⁰ Alonso W. Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1965.

⁸¹ Chang J. Models of the relationship between transport and land-use: A review // Transport Reviews. 2006. No. 26. P. 325–350.

⁸² Sivakumar A. Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies. London: Imperial College, 2007.

слишком сложными феноменами, чтобы синтезировать их таким образом. Новое поколение моделей возникло в конце 1980-ых годов благодаря увеличению вычислительных мощностей и эффективности хранения данных. Эти модели принимают во внимание поведение индивидуальных агентов в пространстве и времени, и взаимодействие между ними, то есть способны представлять городские процессы с требуемым уровнем детализации. Так, например, агентные модели, или модели «микросимуляции»,⁸³ характеризует наличие так называемого «слабого» искусственного интеллекта: они нацелены на имитацию поведения целого населения территории.

За последние два десятилетия было разработано большое количество клеточных моделей, предлагающих простую репрезентацию динамики изменения землепользования в качестве альтернативы традиционному моделированию.^{84,85} Клеточные модели, в частности, модели, построенные на клеточных автоматах, состоят из четырех базовых элементов: регулярная решетка клеток; множество разрешенных состояний клеток – видов землепользования; соседство, определяемое решеткой; множество правил перехода, которые управляют эволюцией клеток. Детерминистические правила перехода используют логические утверждения, и представляют механизм пространственного взаимодействия. Для каждого взаимодействия между парой клеток определяются веса переходов; для каждой клетки рассчитывается потенциал перехода. Клетки меняются до состояния с наивысшим потенциалом до тех пор, пока не удовлетворен спрос на клетки в этом состоянии.

Большинство моделей клеточных автоматов подходит для имитации городского роста и иллюстрации теорий, но не для прогнозирования. Транспортный компонент этих моделей слаб: транспортная сеть подразумевается, но потоки не имитируются.

Достижения в области параллельно распределенных вычислительных процессов предоставили новые инструменты для имитации сложной городской динамики. Один из таких новых подходов к моделированию – создание моделей, основанных на данных,^{86,87} или моделей вычислительных процессов. Это программы, которые решают задачи с помощью набора правил в виде «условие-действие». Вместо предустановленных правил, в модели

⁸³ Miller E. Microsimulation // *Transportation systems planning: Methods and applications*. 2003.

⁸⁴ Batty M., Xie Y. From cells to cities // *Environment and Planning B*. 1994. No. 21. P. 31-48.

⁸⁵ Batty M., Couclesis H., Eichen M. Urban systems as cellular automata // *Environment and Planning*. 1997. No. 24. P. 159-164.

⁸⁶ Tillema F. Calibration of a conceptual LUTI model based on neural networks // *Advanced OR and AI Methods in Transportation*. <http://www.iasi.cnr.it/ewgt/16conference/ID137.pdf> (дата обращения: 1.05.2017).

⁸⁷ Sivakumar A. *Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies*. London: Imperial College, 2007.

используется принятие решений с использованием эвристик, что делает подход более гибким в репрезентации сложности принятия решений индивидом. Он фокусируется на создании связей между эмпирическим набором данных. К инструментам, применяемым в таких моделях, относятся деревья решений, искусственные нейронные сети, неформальный анализ карт.

1.3.3 Преимущества и недостатки интегрированных моделей систем городского землепользования и транспорта

С практической точки зрения использование интегрированных моделей привело к повышению точности прогнозов, так как к традиционным инструментам транспортного планирования были добавлены компоненты землепользования. Большая часть моделей транспортного планирования описывает одностороннюю связь между землепользованием и транспортными системами; интеграция двух систем делает планирование более согласованным.⁸⁸

Кроме того, интегрированные модели землепользования и транспортных систем стали инструментом для проверки некоторых теорий и накопления эмпирических знаний о поведении градостроительных систем. В частности, модели подтвердили важнейшую роль транспортной доступности в выборе места размещения и концентрации того или иного фонда.⁸⁹

Модели утвердили взгляд на город как на динамическую систему. Хотя на концептуальном уровне все операционные модели включают эффект обратной связи, репрезентация реакций на изменения в системах землепользования или транспорта повысили реалистичность и расширили область применения многих моделей.⁹⁰

Более того, более новые подходы к моделированию начали принимать во внимание принципы самоорганизации в представлении городского развития. Эксперименты с агентными моделями микросимуляций в рамках подхода «снизу-вверх» предложили новый взгляд на понимание сложности градостроительных систем.⁹¹

⁸⁸ Sivakumar A. Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies. London: Imperial College, 2007.

⁸⁹ Chang J. Models of the relationship between transport and land-use: A review // Transport Reviews. 2006. No. 26. P. 325–350.

⁹⁰ Там же.

⁹¹ Batty M. Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models and fractals. Cambridge, MA: MIT Press, 2005.

К самым значимым недостаткам интегрированных моделей систем городского землепользования и транспорта относится то, что они не опираются на какую-либо единую фундаментальную теорию развития структурно-функциональной организации градостроительной системы. В основе функционирования различных групп моделей лежат различные принципы принятия решений, различные механизмы, с помощью которых происходит попытка описать развитие города. Кроме того, структуры интегрированных моделей систем землепользования и транспорта, в особенности первых двух поколений, излишне сложны.^{92,93}

Как следствие, они лишены универсальности, и, чаще всего, подходят только для решения локальных узкоспециализированных задач, для которых они непосредственно создавались. В итоге, даже в том случае, когда результаты работ моделей правдоподобны и применимы на практике, они осуществляют вклад лишь в эмпирические знания о городе. Иными словами, такие модели страдают от недостатка теоретической обоснованности с одной стороны, и не осуществляют значительный вклад в теоретическое знание о городе с другой.

Считается, что модели второго поколения частично ответили на критику первого в вопросе обоснования теории. Так, гравитационные модели не имели строгого теоретического обоснования, но широко применялись, поскольку предлагали принципы пространственного распределения. На смену им пришли модели на базе эконометрической теории и теории пространственной экономики, но они, в большинстве своем, мало что сообщали о пространственных структурах.

Указанные недостатки, наравне с развитием вычислительной техники, были драйвером развития «третьего поколения» моделей, а именно, городских клеточных автоматов, и моделей, основанных на структурах данных. Это кардинальное переосмысление подхода к построению моделей олицетворяло попытку вернуться к структурной простоте моделей, вызванную пониманием их чрезмерной сложности.

Наконец, интегрированные модели систем землепользования и транспорта не моделируют физическую транспортную инфраструктуру.⁹⁴ Конструктивным результатом выполнения интегрированных моделей является прогнозирование мест размещения жилищного и общественно-делового фонда в результате изменения транспортной

⁹² Lee D. Requiem for Large-Scale Models // Journal of the American Institute of Planners. 1973. No. 39. P. 163–178.

⁹³ Timmermans H. The saga of integrated land use-transport modeling: How many more dreams before we wake up? // 2003. URL: http://www.ivt.ethz.ch/news/archive/20030810_IATBR/timmermans.pdf (дата обращения: 1.05.2017).

⁹⁴ Chang J. Models of the relationship between transport and land-use: A review // Transport Reviews. 2006. No. 26. P. 325–350.

доступности тех или иных территорий. При этом транспортный компонент интегрированных моделей ограничен исключительно прогнозированием транспортных потоков. Физические параметры и пропускная способность транспортных сетей считаются заданными. Такие модели не способны отражать эволюционную динамику развития транспортных сетей, что ограничивает круг их применения.

За многообразием и детализированностью моделей и постановок локальных задач несколько теряется фундаментальная проблема, на решение которой было направлено моделирование. Теоретическое обобщение проблематики, которую отражают операционные интегрированные модели систем землепользования и транспорта, нашло свое выражение в описании «цикла обратной связи», который сформулировал М. Вегенер по результатам анализа большого объема операционных моделей.⁹⁵ В графическом виде «цикл обратной связи» приведен на рисунке 1.6. Содержательно он заключается в следующем.

Распределение видов землепользования по территории города определяет территории, на которых осуществляются и концентрируются те или иные процессы жизнедеятельности горожан. Распределение мест концентрации жизнедеятельности горожан вызывает необходимость в пространственном взаимодействии – в поездках, целью которых является преодоление расстояний между этими территориями. Распределение, рассредоточение физической транспортной инфраструктуры в городском пространстве создает возможности для таких пространственных взаимодействий; такая возможность определяется как транспортная доступность. Распределение значений показателей транспортной доступности в пространстве и во времени оказывает влияние на решения о выборе мест осуществления и концентрации жизнедеятельности и приводит к изменениям в системе землепользования.

Этот бесконечный цикл построен на эмпирических данных, но, поскольку он подтверждается многолетними наблюдениями, описанная логика возведена в ранг фундаментальной теории. Считается, что все описанные выше интегрированные модели систем землепользования и транспорта явно или неявно пытались формализовать именно этот механизм.

В терминах территориально-коммуникационной модели увеличение интенсивности использования территории ведет к повышению ее насыщенности, и, следовательно, привлекательности, а увеличение транспортной доступности территории – к повышению ее связности. Если сформулировать содержательный вопрос, – зачем увеличивать насыщенность территории и ее доступность? – то целеполагание модели «цикла обратной связи» станет

⁹⁵ Wegener M. Overview of land-use transport models // Handbook of Transport Geography and Spatial Systems. 2004. No. 5. P. 127–146.

неотличимым от аналогичного для территориально-коммуникационной модели. Таким образом, можно сделать вывод о том, что во всех интегрированных моделях систем землепользования и транспорта имплицитно берется за основу гипотеза о градостроительной системе как о «системе, сокращающей расстояния».

Можно заключить, что цикл обратной связи между землепользованием и транспортом является упрощенной репрезентацией механизма эволюционного развития градостроительной системы. Именно этот циклический процесс ведет к непрерывному перераспределению некоторых количественных характеристик в пространстве, – плотности и доступности, – что ведет к изменению пространственно-функциональной структуры градостроительной системы, и, в конечном итоге, ее эволюции.



Рисунок 1.6 – Цикл обратной связи систем городского землепользования и транспорта.

1.4 Эвристические основания моделей эволюционного развития градостроительной системы

1.4.1 Разнообразие подходов к моделированию градостроительной системы в свете общей теории городского развития

На примерах «качественного» и «количественного» подходов было продемонстрировано количество и разнообразие вариантов описания функционирования и развития градостроительной системы. То, что их объединяет – это представление о градостроительной системе как о динамическом, непрерывно развивающемся объекте. Как будет продемонстрировано далее, разнообразие отражает способы операционализации, формализации, количественного измерения отдельных аспектов единого феномена – эволюции градостроительной системы. Помимо того, что во все модели заложен один и тот же смысл, семантика и инструментарий моделей также взаимопереводимы и взаимоприменимы.

Так, территориально-коммуникационная модель прямым образом развивает идеи каркасно-тканевой модели. Во-первых, в ее основе лежит «идеологема» о повышении коммуникативности градостроительной системы как ее целевой функции. Во-вторых, территориально-коммуникационная модель разбивает все множество непрерывных состояний системы на несколько промежутков – иными словами, задает набор дискретных состояний, выраженный в матричной форме. Такой подход позволяет изучить свойства каждого из выделенных состояний, количественным образом измерить параметры элементов, предложить индивидуальные стратегии для их управления; то есть, выявить стадию эволюционного развития не только всей системы, но отдельных ее элементов. Различные комбинации насыщенности и связности, соответствующие разным ячейкам оценочной матрицы, соответствуют различным соотношениям каркаса и ткани. Сбалансированные значения связности и насыщенности территориальных элементов соответствуют предельной относительной мощности каркаса. Сбалансированные территории с низкими значениями параметров связности и насыщенности, которые обеспечивают устойчивость системы в целом, отражают характеристики ткани.

Неравномерно-районированная модель учитывает инерционность застройки, тем самым обеспечивая принцип наследования. Отмеченные ранее положительные качества инерционной застройки в полной мере соответствуют застройке, учитывающей эволюционные процессы.

Далее, неравномерно-районированную модель отличает высокий уровень детализации структур пространственных единиц. На первый взгляд неравномерно-районированная модель отличается от каркасно-тканевой тем, что выделяет узловые районы, а не каркас. Однако очевидно, что ядра районов составляют каркас системы. Неструктурированные территории системы и периферийные территории узловых районов относятся к ткани. В данной модели наиболее выпукло проявляется обоснование необходимости использования термина «градостроительная система» вместо термина «город»: фактически каждый узловой район представляет собой небольшую градостроительную систему. Иными словами, эволюция градостроительной системы – это эволюция отдельных структурных элементов, как каждого в отдельности, так и составе над-системы. Она движима дихотомией «ядро-периферия».

Территориальные элементы территориально-коммуникационной модели можно описать как узловые районы разной степени структурированности неравномерно-районированной модели; и наоборот – уровень структурной развитости узловых районов и потенциал их развития можно измерить с помощью оценочной матрицы насыщенности и связности. Эффективность пространственной организации территорий в территориально-коммуникационной модели описывается количественно, путем свертки критериев насыщенности и связности, а в неравномерно-районированной – через дистанции, где чем ниже дистанция, тем выше уровень организации.

Далее, значения оценочной матрицы можно интерпретировать в терминах дистанций от первого элемента, где элемент, характеризующийся как «эталонный», с наибольшими значениями характеристик насыщенности и связности, это первый узловой район, а элементы с меньшими значениями указанных характеристик – районы последующих дистанций.

Если неравномерно-районированная модель описывает пространственный характер эволюционного развития, то территориально-коммуникационная модель описывает направление эволюционного развития.

В терминах всех трех моделей эволюция градостроительной системы, движимая дихотомией «каркас-ткань», может быть выражена следующим образом. Рост мощности каркаса ведет к увеличению доступности территорий, или узловых районов. Их последующее насыщение приводит к структурной реорганизации, в результате чего происходит рассредоточение каркаса, появление и развитие узлов новой дистанции. Этот же процесс поддается описанию в терминах модели «цикла обратной связи» между системами городского землепользования и транспорта.

Вернемся к вопросу, какое место занимает транспортная система в общей теории городского развития. Было продемонстрировано, что каркасно-тканевая модель содержит полноценную репрезентацию транспортной инфраструктуры, вернее, что признаки и

характеристики транспортной инфраструктуры целиком укладывается в более универсальное понятие каркаса.

В то же время, в территориально-коммуникационной модели транспортная инфраструктура лишь подразумевается, учитывается неявным образом. Транспортный компонент учитывается через индикатор транспортной доступности, который, хотя и измеряется количественным образом, остается признаком объекта – атрибутом территории. Модель декларирует связи между элементами системы, но не эксплицирует коммуникационные элементы как самостоятельные элементы. Возможно, в некоторой степени это объясняется описанными во введении данной работы причинами – а именно, сложности практического влияния на решения в области транспортной инфраструктуры, даже имея обоснования по результатам имплементации моделей.

Было отмечено, что у интегрированных моделей систем землепользования и транспорта тот же недостаток. В то время, как транспортная доступность служит связующим звеном между двумя подсистемами, а именно транспортная инфраструктура – важнейший элемент обеспечения доступности, она не моделируется напрямую ни в одном из классов моделей.

Также было отмечено, что в силу высокой агрегированности большей части интегрированных моделей, они неправдоподобно отражают поведение горожан: в частности, в транспортном компоненте мотивации поездок не моделируются явным образом. Таким образом, репрезентации проблематики поведения людей в моделях отводится важное место, так как именно транспортное поведение во многом формируют структуры землепользования. Подобный подход совпадает со взглядами А.А. Высоковского, согласно которым поведение людей, структурирующих пространство вокруг себя, является движущей силой эволюции градостроительной системы. Отличие заключается в том, что дальнейшим драйвером развития, согласно неравномерно-районированной модели, является инерционная составляющая сложившихся структур землепользования, а согласно интегрированным моделям, спрос на пространство и транспорт, описываемый экономическими теориями и математическими уравнениями.

Дихотомии, отраженные в синтаксисе каждой их моделей («каркас-ткань», «землепользование-транспорт», «ядро-периферия», «насыщенность-связность»), имеют одну и ту же природу, которая укоренена в эволюционном характере развития градостроительных систем. В каждом случае речь идет о перераспределении некоторых свойств, или признаков, поддающихся выражению количественным образом, между двумя структурообразующими элементами системы, которые, в итоге, занимают по итогам перераспределения некоторое состояние между двумя крайними состояниями.

Таким образом, было продемонстрировано, что все динамические операционные структурно-функциональные модели, основанные на разных подходах и принципах действия, в целом укладываются в теоретические рамки общей теории эволюционного городского развития, заданные А.Э. Гутновым.

1.4.2 Программа исследований А.Э. Гутнова

При изложении теории общего городского развития был сделан ряд оговорок. Во-первых, это только «контуры теории»: многие ее положения приведены в общем виде. Во-вторых, хотя многие положения теории подтверждаются эмпирическими наблюдениями, они не в полной мере доказаны. Для продолжения работы в направлении формирования общей теории городского развития была задана программа исследований. Программа включает изучение строения градостроительной системы (статическое описание), функционирования системы (динамическое описание), развития системы во времени (описание эволюционной динамики).^{96,97}

Критическая необходимость осуществления третьего этапа программы для завершения формирования теории общего городского развития заключается в следующем. Ключевой момент прогнозирования развития градостроительной системы – определение предельных значений относительной мощности каркаса, в границах которых происходит циклическое развитие. Поскольку каждая реальная система имеет уникальные параметры, для решения такой задачи необходим сравнительный анализ развития различных градостроительных систем на продолжительных отрезках времени – как минимум одном полном эволюционном цикле. Приближенный ответ может быть получен путем эмпирических наблюдений за изменением относительной мощности каркаса и темпами роста системы за срок в один-два десятилетия. Однако такой подход не слишком надежен при коротких сроках предыдущего этапа развития. Обоснованные выводы возможны лишь в результате соотнесения темпов смены фаз развития и предельных значений относительной мощности каркаса с реальными размерами систем. Иными словами, программа формирования общей теории городского развития заключается в применении методов структурно-функционального анализа к большому количеству различных реальных градостроительных объектов.⁹⁸

⁹⁶ Гутнов А. Э. Системный подход в изучении города: основания и контуры теории городского развития // Системные исследования. Методологические проблемы. М.: Наука, 1985. С. 211–232.

⁹⁷ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

⁹⁸ Там же.

Хотя программа исследований была задана более тридцати лет назад, можно утверждать, что на сегодняшний день она не была до конца реализована. Таким образом, формально, теория общего городского развития является убедительной, но не полностью доказанной гипотезой.

1.4.3 Эвристический характер методов проектирования градостроительной системы

Хотя теория общего городского развития является недоказанной гипотеза, она активно применяется при описании градостроительных систем, а также лежит в основе операционных прикладных моделей. Так, полуэкспертная территориально-коммуникационная модель с одной стороны является процедурным развитием теории общего городского развития, с другой – декларирует свое основание на гипотезе о расширении выбора как о целевой функции города. Эта модель успешно применяется при разработке генеральных планов и проектов планировки территорий.

Теория общего городского развития и модели, построенные на этой теории и других гипотезах, используются на практике, поскольку доставляют решения, представляющиеся проектировщикам оптимальными, либо близкими к таковым.

Модели такого рода относятся к эвристическим. Эвристические методы занимают промежуточное положение между принятием решений без какой-либо уверенности в конечном результате (случайном, ни на чем не основанном процессе), и строгим однозначным алгоритмом, который гарантирует оптимальный результат.⁹⁹

Применительно к градостроительным системам обычно используется понятие математических моделей. Эвристическими названа лишь небольшая группа интегрированных моделей систем землепользования и транспорта, основанных на наборах данных. Однако, строго говоря, математическое моделирование городов означает применение математических инструментов к нематематической проблеме. Чтобы это было возможным, необходимо сформулировать некоторый аспект проблемы проектирования градостроительной системы в виде математической задачи. Такой подход применим для очень узкого круга задач, касающихся структурно-функциональной организации города, и преимущественно распространяется на экономические проблемы. Примером являются интегрированные модели систем землепользования и транспорта, основанные на эконометрической теории. Другим

⁹⁹ Romanycia M.H.J., Pelletier F.F. What is a heuristic? // Computational Intelligence. 1985. Vol. 1. No. 1. Pp. 47–58.

значимым примером задач структурно-функционального проектирования, которые поддаются формализации, и имеют строгое решение, являются задачи транспортного моделирования – в частности, задача прогнозирования транспортных потоков по сети.

Однако, даже в случае зарекомендовавших себя за более чем пятьдесят лет использования транспортных моделей, они основаны на весьма сильных предположениях о человеческом поведении, которые также подвергаются критике на протяжении всего времени существования этих моделей.¹⁰⁰ Именно поэтому в настоящее время получают развитие альтернативные, так называемые «агентные» транспортные модели, или модели микросимуляции.¹⁰¹

Природа проблем городского планирования такова, что возможные методы их решения неизбежно будут эвристическими. В определенном смысле городское планирование можно уподобить доказательству теоремы, за которое математик берется, не зная заранее, когда, каким образом, и удастся ли вообще ему это сделать.

Во-первых, итоговый результат решения задачи всегда неопределен. У задачи городского проектирования нет единственного правильного решения, как и объективной уверенности в том, что итоговое решение самое эффективное. В случае, когда нет абсолютной уверенности в том, что выработка проектного решения с помощью моделирования даст оптимальный вариант, но есть основания так считать, эвристическая модель внедряется в процесс принятия решений с расчетом на улучшение «среднего» результата.¹⁰²

Во-вторых, у задачи городского проектирования крайне обширное пространство возможных решений. Даже если свести задачу проектирования градостроительной системы только к размещению жилищного фонда, или только размещению общественно-деловой застройки, или только выбору конфигурации топологии транспортной инфраструктуры, проектировщик неизбежно сталкивается с задачей перебора с очень большим количеством вариантов. Эвристические модели и методы служат для значительного сокращения области поиска в процессе решения сложной проблемы. Иными словами, это стратегия поиска в пространстве решений. Она может осуществляться путем трансформации проблемы в одну или несколько подпроблем.¹⁰³

В-третьих, проектировщик всегда действует в условиях неполноты информации. Даже когда информации недостаточно чтобы построить эффективный алгоритм для решения всех

¹⁰⁰ McNally M. The Activity-Based Approach // Handbook of Transport Modeling. Pergamon, 2000. P. 53–70.

¹⁰¹ Miller, E. Microsimulation // Transportation systems planning: Methods and applications. 2003.

¹⁰² Romanycia M.H.J., Pelletier F.F. What is a heuristic? // Computational Intelligence. 1985. Vol. 1. No. 1. Pp. 47–58.

¹⁰³ Там же.

возможных задач, любая информация о структуре проблемы может лечь в основу эвристической модели. Поэтому эвристика сильно зависит от предметной области и гипотез. Именно гипотеза обеспечивает определенную степень уверенности в результатах. Гипотеза – ядро эвристической модели.¹⁰⁴

Также список условий принадлежности модели к классу эвристических был предложен Н.М. Амосовым.¹⁰⁵ Во-первых, эвристические модели оперируют большим количеством переменных, часть которых неизбежно подлежит агрегированию. Во-вторых, системы, функционирование которых репрезентируют эвристические модели, иерархичны; они содержат множество горизонтальных и вертикальных связей. В-третьих, нелинейные характеристики системы при учете в эвристической модели преобразуются в дискретные, и отражаются в виде кусочно-линейных функций либо логических переключателей. Наконец, в эвристических моделях отсутствует необходимость в точности вычислений, поскольку точности нет в науке, изучающей моделируемую систему. Как следствие, эвристические модели включают различные допущения, которые в значительной мере влияют на динамическое поведение системы. Иными словами, она носит вероятностный характер. Для применения модели в практической деятельности она «настраивается на объект», то есть, калибруется. Очевидно, что все указанные признаки распространяются на все описанные в данной главе модели градостроительной системы.

Н.М. Амосов подытожил роль эвристических моделей в науке следующим образом: «эвристические модели, не представляя собой полную истину о системе, её теорию, тем не менее необходимы для прогресса науки. (...) Они позволяют выбрать по возможности непротиворечивую гипотезу и совершенствовать её. Они дают направление эксперименту: в первую очередь исследовать то, что сомнительно, с учётом всех связей и условий. Новые данные вносятся в модели и постепенно продвигают её от гипотезы к теории. (...) Наконец, их можно использовать для практики – в пределах удовлетворительного совпадения с объектом. Эта практика – управление и советы».¹⁰⁶

В рамках эвристического подхода к задаче проектирования градостроительной системы за основополагающую гипотезу берется положение о том, что город развивается согласно эволюционному принципу навстречу повышению коммуникативности. Такое представление о функционировании градостроительной системы сужает поле возможных вариантов решения: поиск решения задачи осуществляется не в множестве всех возможных

¹⁰⁴ Там же.

¹⁰⁵ Амосов Н.М. Алгоритмы разума. Киев: Наукова думка, 1979. 224 с.

¹⁰⁶ Амосов Н.М. Книга о счастье и несчастьях. М.: Молодая гвардия, 1984. 287 с.

функционально-структурных организаций градостроительных систем, а среди тех, чья организация укладывается в представления об эволюционных процессах. Следовательно, любые модели, которые будут построены в рамках теории общего городского развития, по существу всегда будут оставаться эвристическими.

ГЛАВА 2 ЭВОЛЮЦИОННАЯ ЭВРИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

2.1 Постановка задачи и обоснование подхода к построению модели градостроительной системы

На примере интегрированных моделей систем землепользования и транспортных систем было показано, что развитие прикладных операционных моделей шло в направлении усложнения их внутренних структур и диверсификации учитываемых факторов, в то же время отдельные модели преимущественно были нацелены на решение отдельных локальных задач. Такой подход лишен универсальности. Оптимальный подход лежит в противоположном направлении: строится максимально обобщенная модель, а затем детализируется по мере необходимости. Обобщенная модель при этом является отражением общей теории, которой недостает «количественному» подходу.

Локальные задачи следует выделять как частные, уточненные случаи общей задачи проектирования градостроительной системы, а модели, нацеленные на решение этих задач, следует строить на фундаменте теории общего городского развития. Поскольку было показано, что в динамической развивающейся системе развитие инфраструктуры неотделимо от развития землепользования, и наоборот, задачу развития дорожно-транспортной сети также целесообразно формулировать в терминах задачи проектирования градостроительной системы в целом.

Подход заключается в поэтапном уточнении и формализации отдельных компонентов градостроительной системы и механизмом взаимодействия между ними. Территориально-коммуникационная модель является первым этапом в уточнении и операционализации эволюционной модели; она включает в себя многократно апробированный на практике инструментарий. Из всех рассмотренных ранее моделей градостроительной системы, территориально-коммуникационная модель является наиболее гибкой: она позволяет «надстраивать» дополнительные прикладные инструменты путем уточнения и формализации определений и методов количественного расчета значений параметров территориальных элементов системы – «насыщенности» и «связности». Поскольку «связность» территорий обеспечивается транспортной инфраструктурой, модель «открыта» для включения явной репрезентации последней. Таким образом, последующий этап уточнения заключается в формализации ряда определений территориально-коммуникационной модели.

В целях данной работы выделим следующие элементы градостроительной системы: жилищный фонд, общественно-деловой фонд, транспортная инфраструктура. Таким образом, задача заключается в построении такой модели, которая:

- отражает эволюционный характер развития градостроительной системы;
- предлагает ясную репрезентацию физической дорожно-транспортной сети;
- рассчитывает оптимальные параметры дорожно-транспортной сети при меняющейся интенсивности использования территорий;
- определяет оптимальные места размещения жилищного и общественно-делового фонда и их оптимальные объемы с учетом изменения транспортной доступности территорий.

Иными словами, речь идет о модели, относящейся к классу интегрированных моделей систем землепользования и транспортных систем, но построена она будет по описанному принципу «от теоретических положений к проектным подходам».

2.2 Принципиальная схема модели градостроительной системы

Согласно исследовательской программе А.Э. Гутнова, которая нацелена на построение общей теории городского развития, изучение градостроительной системы включает три основных задачи: статическое описание системы, динамическое описание системы, описание эволюционного развития системы.¹⁰⁷ Хотя разрабатываемая в рамках данной работы модель и не является инструментом доказательства этой теории, она базируется на ее основных положениях и положениях производной от нее территориально-коммуникационной модели градостроительной системы. Следовательно, представляется целесообразным описывать проектируемую модель в тех же категориях.

2.2.1 Статическое описание модели градостроительной системы

2.2.1.1 Основы описания разрабатываемой модели градостроительной системы

Статическое описание разрабатываемой модели градостроительной системы приводится в терминах территориально-коммуникационной модели и теории графов.¹⁰⁸

Обоснование применения инструментария, и, следовательно, терминологии территориально-коммуникационной модели было приведено выше. С другой стороны, поскольку задача сформулирована таким образом, что решения в области транспортной инфраструктуры должны проявляться явным образом; представление дорожно-транспортной сети градостроительной системы в виде ориентированного графа является наиболее целесообразным. Отметим, что применение теории графов в транспортном планировании имеет давнюю историю. Исторически первой задачей, в которой часть городской территории моделировалась с помощью графа, является задача о кенигсбергских мостах, решенная в XVIII веке Л. Эйлером.¹⁰⁹ Однако широкое применение аппарата теории графов для количественного описания пространственных структур транспортных сетей началось в 1960-ых годах, и было вызвано развитием вычислительной техники и дискретной математики.¹¹⁰ Первой работой, в которой в виде графа была представлена непосредственно

¹⁰⁷ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

¹⁰⁸ Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1980. 336 с.

¹⁰⁹ Берж К. Теория графов и её применения. М.: Иностранная литература, 1962. 320 с.

¹¹⁰ Тархов С.А. Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск–Москва: Универсум, 2005. 384 с.

дорожно-транспортная сеть, была статья «Связность межштатной системы автодорог».¹¹¹ После работы «Структура транспортных сетей: взаимосвязи между геометрией сети и характеристиками районов»¹¹² такой подход утвердился как направление теоретической географии. В этой работе на основе теории графов были разработаны так называемые «индексы Канского» – показатели, которые описывают особенности пространственной структуры транспортной сети. С применением этих показателей была изучена взаимосвязь между топологическими структурами транспортных сетей разных стран, штатов США, графств ряда штатов, и уровнями их экономического развития. Так, было показано, что уровень экономического развития региона сильно влияет на важнейший параметр обслуживающей его дорожно-транспортной сети – степень ее связности. В 1970-80-ых годах на смену структурному анализу пришло направление оценки топологического положения отдельных вершин по отношению ко всему графу: были разработаны различные индексы доступности, а также оценки обеспеченности территорий транспортными сетями. Исследования пространственных структур различных сетей и их связи с темпами урбанизации и транспортной обеспеченностью территорий также осуществили вклад в представление о сопряженной, взаимообусловленной эволюции пространственных и функциональных характеристик систем городского землепользования и транспорта.¹¹³

Таким образом, в данной работе модель градостроительной территориально-коммуникационной системы представляется в виде ориентированного графа $G = (V, U)$, где множеству вершин графа $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ соответствует множество территориальных элементов системы, а множеству дуг $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – множество коммуникационных элементов системы. При этом каждая дуга графа транспортной сети $u_i = (v_k, v_l) \in U$ представляет сегмент городской дорожно-транспортной сети, направленный из узла v_k в узел v_l , $k, l \leq n$, $k \neq l$.

¹¹¹ Garrison W.L. Connectivity of the interstate highway system // Regional Science Association, Papers and Proceedings. 1960. Vol. 6. P. 121-137.

¹¹² Kansky K.J. Structure of transportation networks: relationship between network geometry and regional characteristics. Chicago University, Research Paper. 1963. 156 p.

¹¹³ Тархов С.А. Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск–Москва: Универсум, 2005. 384 с.

2.2.1.2 Территориальные элементы градостроительной системы

Множество $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множество вершин графа $G = (V, U)$, которым соответствуют территориальные элементы градостроительной системы. В данной модели территориальные элементы системы служат для размещения жилищного фонда – мест проживания населения, и для размещения общественно-делового фонда – мест приложения труда и обслуживания населения. Масштабы территориальных элементов могут варьироваться в зависимости от конкретной прикладной задачи; они могут представлять земельный участок, квартал, микрорайон, расчетный район (полученный путем наложения расчетной сетки на всю рассматриваемую территорию в границах системы), транспортный район, планировочный район, функциональную зону.

Каждый территориальный элемент градостроительной системы $v_i \in V$, $i = \overline{1, n}$, имеет следующие атрибуты, каждый из которых выражается в квадратных метрах:

- D_i^H , объем имеющейся жилой застройки;
- D_i^J , объем имеющейся общественно-деловой застройки;
- W_i^H , объем занятых жилых площадей;
- W_i^J , объем занятых площадей мест приложения труда и обслуживания населения;
- L_i , предельные объективно заданные физические резервы развития территориального элемента.

Очевидно, что выражению $D_i^H - W_i^H$ соответствует объем вакантных площадей рассматриваемой жилой застройки на территории $v_i \in V$, $i = \overline{1, n}$; аналогично для общественно-деловой застройки.

Отметим, что выделенные атрибуты территориальных элементов системы близки по содержанию понятию «технико-экономические показатели», атрибуты которого используются при разработке проектов планировки территорий и генеральных планов поселений.

2.2.1.3 Коммуникационные элементы градостроительной системы

Множество $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – множество дуг графа $G = (V, U)$, или коммуникационные элементы градостроительной системы. В данной модели коммуникационные элементы системы представляют собой наземные автомобильные дороги, которые составляют единую дорожно-транспортную сеть города.

Каждый коммуникационный элемент системы $u_k \in U$, $k = \overline{1, m}$, имеет следующие атрибуты:

- c_k , емкость, или пропускная способность сегмента дорожно-транспортной сети;
- f_k , интенсивность транспортного потока, движущегося по сегменту сети;
- t_k , продолжительность поездки по сегменту сети;
- t_{0k} , продолжительность поездки по сегменту сети без задержек и помех, так называемая продолжительность поездки «в свободном потоке»;
- s_k , стоимость строительства сегмента сети.

Для данной модели принимаются следующие допущения относительно коммуникационных элементов градостроительной системы:

1. Стоимость строительства сегмента сети $u_k \in U$ линейно зависит от пропускной способности этого сегмента:

$$s_k = a_k c_k + b_k, \quad (1)$$

где $a_k > 0$ и $b_k \geq 0$ – коэффициенты стоимости, $k = \overline{1, m}$. В том случае, если данное допущение считается неприемлемым, необходимо построить соответствующую линейную функцию, которая аппроксимировала бы реальную нелинейную функцию стоимости строительства сегмента сети.

2. Продолжительность времени пути по сегменту дорожно-транспортной сети зависит от его емкости, или пропускной способности, и интенсивности транспортного потока, движущегося по нему. Модели, построенные по такому принципу, относятся к классу BPR-моделей, по названию первой модели такого рода.¹¹⁴

¹¹⁴ Bureau of Public Roads. Traffic Assignment Manual. Washington, D.C.: U.S. Bureau of Public Roads, 1964.

В данной работе будем использовать стандартную BPR-модель, согласно которой продолжительность поездки t_k по сегменту сети $u_k \in U$ выражается следующим образом:

$$t_k = t_{0k} \left(1 + \alpha \left(\frac{f_k}{c_k} \right)^\beta \right), \quad (2)$$

где $\alpha > 0$ и $\beta > 0$ – калибровочные параметры модели, $k = \overline{1, m}$.

BPR-модель относится к классу статических транспортных макромоделей. В этих моделях транспортный поток считается равномерным, то есть имеет постоянные характеристики на протяжении каждого сегмента транспортной сети. В макромоделях транспортный поток описывается упрощенно: для его описания на каждом сегменте сети $u_k \in U$ используется одна макроскопическая характеристика – интенсивность транспортного потока f_k , $k = \overline{1, m}$. Такое допущение позволяет сократить вычислительную сложность прикладных моделей, и, следовательно, время их имплементации. Статические транспортные макромоделей предназначены для моделирования транспортной ситуации на сегментах крупномасштабных транспортных сетей – дорожно-транспортных сетей городов, регионов, стран.¹¹⁵ Прогнозы макромоделей доставляют средние значения продолжительностей поездок, которые более применимы для долгосрочного планирования, а не управления транспортными потоками в реальном времени; в последнем случае применяется теория микромоделирования транспортных потоков.^{116,117}

BPR-модель была разработана в конце 1950-ых гг. подразделением министерства транспорта США, которое носило название «Бюро общественных дорог» (в настоящее время – «Федеральная дорожная администрация»). Хотя модель была разработана на основе анализа данных, полученных на магистральных трассах, то есть транспортных сетях без эффекта пробок, в настоящее время эта модель часто применяется при изучении и проектировании городских дорожно-транспортных сетей. BPR-модель зарекомендовала себя за счет логичности, простоты, легкости калибровки и высокой скорости вычислений. Так, например,

¹¹⁵ Воробьёв А.Э., Титов А.Ю., Гаврилин В.А., Меньшутин А.Ю., Бахирев И.А. Транспортная модель Московского региона // Вычислительные технологии в естественных науках. Методы суперкомпьютерного моделирования. Сборник трудов. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 49–62.

¹¹⁶ Блинкин М.Я. Качество планирования городских транспортных сетей в зеркале классических моделей теории транспортного потока // Городские исследования и практики. 2015. Пилотный выпуск. С. 55–66.

¹¹⁷ Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и Телемеханика. 2003. №11. С. 3–46.

стандартная форма данной модели использовалась в Научно-исследовательском и проектном институте Генерального плана города Москвы при разработке транспортной модели Москвы и Московской области, Казани и транспортных моделей ряда других городов.¹¹⁸

Считается, что эта модель способна неявным образом учитывать сигналы светофора – в том случае, если пропускная способность дороги задана отношением времени зеленого сигнала светофора к длине цикла. При малом объеме транспортного потока прогнозируемая продолжительность поездки стремится к продолжительности поездки в свободном потоке.

Однако при разработке модели Бюро не были предложены ни строгое определение пропускных способностей дорог, ни способы ее измерения. В этой модели калибровочный параметр α определяет отношение времени пути в свободном потоке к времени пути по дороге с ненулевым потоком, а параметр β определяет то, насколько быстро возрастает продолжительность поездки при увеличении потока. В настоящее время традиционно применяются значения параметров $\alpha = 0,15$ и $\beta = 4$, которые были получены эмпирическим способом.¹¹⁹ Однако существуют другие варианты калибровки этой модели, а также другое направление исследований в области BPR-моделей, которое лежит в установлении альтернативных форм аналитической взаимозависимости между значениями продолжительности поездки, пропускной способности и интенсивности транспортного потока. Примерами таких моделей являются модель Дэвидсона^{120,121} и ее производные,¹²² коническая модель,¹²³ сингапурская модель,¹²⁴ модель Скабардониса-Даулинга,¹²⁵ и другие.¹²⁶

¹¹⁸ Воробьев А.Э., Титов А.Ю., Гаврилин В.А., Меньшутин А.Ю., Бахирев И.А. Транспортная модель Московского региона // Вычислительные технологии в естественных науках. Методы суперкомпьютерного моделирования. Сборник трудов. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 49–62.

¹¹⁹ Dowling R., Skabardonis A. Improving the Average Travel Speeds Estimated by Planning Models // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1993. No. 1360. P. 68–74.

¹²⁰ Davidson K.B. A Flow-Travel Time Relationship for Use in Transportation Planning // Proc. 3rd ARRB Conf. 1966. No. 3. P. 183-194.

¹²¹ Davidson K.B. The Theoretical Basis of a Flow-Travel Time Relationship for Use in Transportation Planning // Australian Road Research. 1978. No. 8. P. 32–35.

¹²² Akcelik R. Travel Time Functions for Transport Planning Purposes: Davidson's Function, its Time Dependent Form and Alternative Travel Time Function // Australian Road Research. 1991. Vol. 21. No. 3. P. 49–59.

¹²³ Spiess H. Conical Volume-Delay Functions // Transportation Science. 1990. Vol. 24. No. 2. P. 153–158.

¹²⁴ Xie C., Cheu R.L., Lee D.H. Calibration-Free Arterial Link Speed Estimation Model Using Loop Data // Journal of Transportation Engineering. 2001. Vol. 127. P. 507–514.

¹²⁵ Skabardonis A., Dowling R. Improved Speed-Flow Relationship for Planning Applications // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1997. No. 1572. P. 18–23.

¹²⁶ Branstom D. Link Capacity Functions: A Review // Transportation Research. 1976. Vol. 10. No 4. P. 223–236.

3. Максимальная продолжительность $t_{\max}$ комфортной поездки, осуществляемой на регулярной основе, соответствует «стене Маркетти».

Определенная в 1990-ых годах «константа Маркетти», или «стена Маркетти», представляет собой «антропологический инвариант транспортного поведения»; он заключается в том, что горожане в среднем тратят от 60 до 90 минут на поездки до мест приложения труда и обратно.¹²⁷ Аналогичная величина была введена в 1970-ых годах Г.А. Гольцем; «константа пространственной самоорганизации населения», или «статистический временной норматив» – время, затрачиваемое на реализацию важнейших контактов в городе. По результатам анализа пространственного развития ряда американских и европейских городов величина этой константы была определена Г.А. Гольцем как 30-40 минут (с учетом обратной поездки, соответственно, 60-80 минут).¹²⁸ Также им была выведена формула зависимости средней продолжительности поездки от средней продолжительности рабочего дня.

Представляется, что при определении максимальной продолжительности $t_{\max}$ комфортной поездки, осуществляемой на регулярной основе, необходимо исходить из приведенных инвариантов, с поправкой на уникальные особенности каждой рассматриваемой градостроительной системы.

2.2.1.4 Связь между атрибутами различных элементов градостроительной системы

В случае территориальных элементов $v_i \in V$ системы горожане репрезентируются объемами занятых площадей W_i^H и W_i^J , $i = \overline{1, n}$; в случае коммуникационных элементов $u_k \in U$ – транспортными потоками f_k , $k = \overline{1, m}$.

Значения этих атрибутов взаимопереводимы следующим образом. Существуют нормативы обеспеченности людей жилыми и рабочими площадями, $norm^H$ и $norm^J$ соответственно; значения этих величин задаются местными нормативами градостроительного проектирования. Следовательно, если жилищный фонд некоторой территории $v_i \in V$ генерирует в сумме транспортный поток f_k , то связь между объемом этого потока и занятыми жилыми площадями должна удовлетворять выражению

¹²⁷ Marchetti C. Anthropological Invariants in Travel Behavior // Technological Forecasting and Social Change. 1994. Vol. 47. No. 1. P. 75–88.

¹²⁸ Гольц Г. А. Транспорт и расселение. М.: Наука, 1981. 248 с.

$$W_i^H = f_k \text{norm}^H. \quad (3)$$

Аналогично для мест приложения труда и обслуживания населения: если некоторая территория $v_i \in V$, на которой размещен общественно-деловой фонд, поглощает транспортный поток f_k , то связь между объемом этого потока и занятыми рабочими площадями должна удовлетворять выражению

$$W_i^J = f_k \text{norm}^J. \quad (4)$$

Статическое описание модели градостроительной системы в графическом виде приведено на рисунке 2.1.

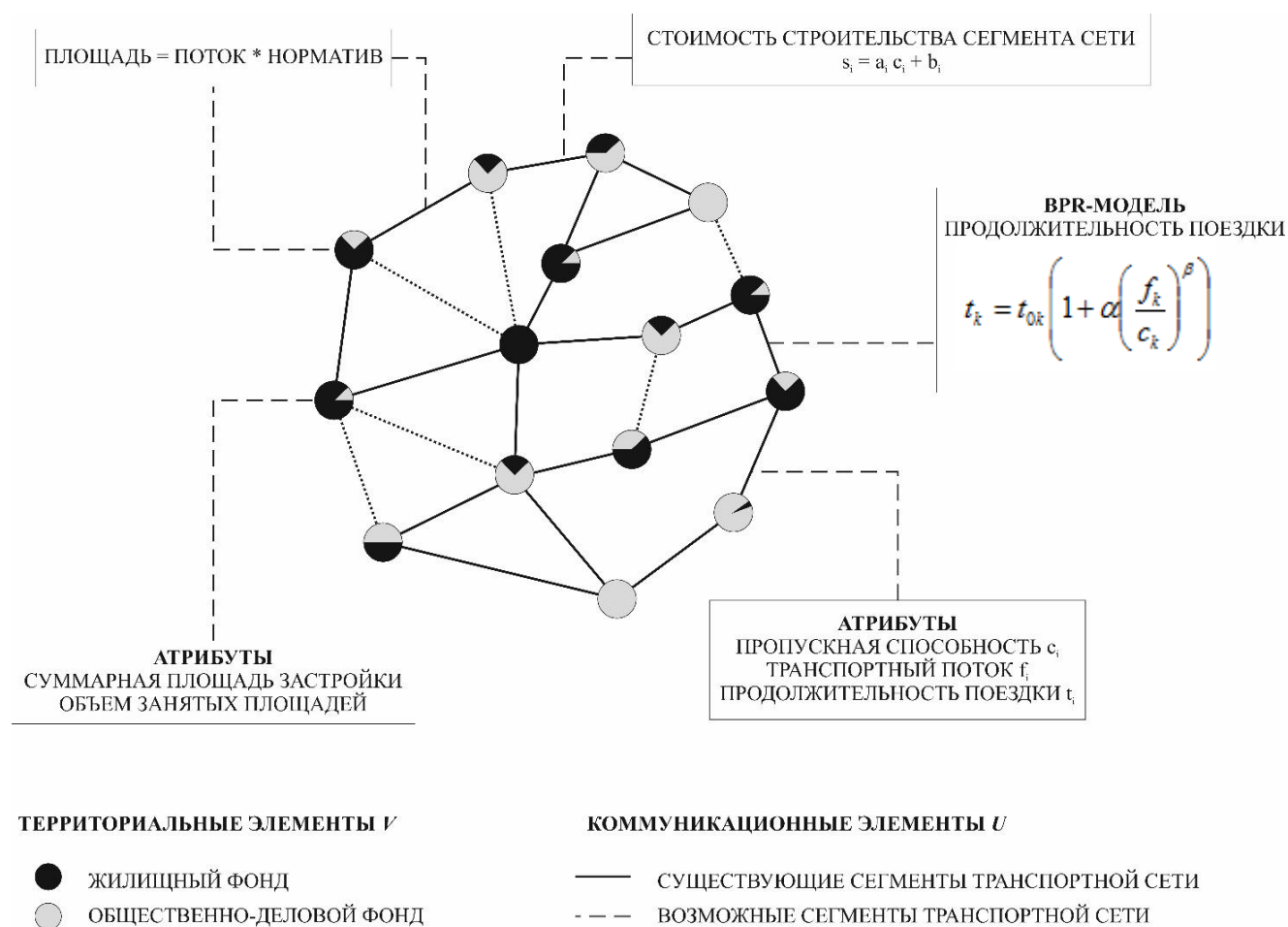


Рисунок 2.1 – Статическое описание модели градостроительной системы.

2.2.2 Динамическое описание модели градостроительной системы

Динамическое состояние градостроительной системы обеспечивается за счет действий городских агентов, которые разворачиваются во времени. В модели действует три типа городских агентов, или выгодоприобретателей: публичная сторона, агенты жилищного сектора (жители и застройщики), агенты общественно-делового сектора (предприятия, предоставляющие рабочие места и места обслуживания населения, и застройщики). Каждый тип городских агентов преследует свои цели.

1. Публичная сторона. Поскольку определение градостроительной системы не ограничивает ее пределами каких-либо административных границ, под публичной стороной будут пониматься органы публичной власти любого возможного масштаба – от органов местного самоуправления на уровне района городского округа с внутригородским делением, до коллегиального органа власти, представляющего межмуниципальное сотрудничество в пределах агломерации (то есть, с условием сохранения устойчивых связей внутри системы).

Цель публичной стороны – выровнять транспортную обеспеченность для всех территорий градостроительной системы за счет преобразований физической транспортной инфраструктуры, выполнив при этом заданные ограничения по бюджету. Публичная сторона не решает проблему транспортной доступности отдельных территорий, поскольку изменение одного элемента ведет к изменениям во всей транспортной сети – перераспределению транспортных потоков, и, следовательно, значениям показателей доступности отдельных территорий. Считается, что публичная сторона ставит нормативную задачу минимизировать суммарную продолжительность поездок по всем сегментам дорожно-транспортной сети за расчетный период ($time, time + 1$).

2. Жилищный сектор. Цель агентов жилищного сектора – разместить жилье ближе к местам приложения труда и обслуживания, как путем занятия вакантных площадей существующей застройки, так и путем строительства нового жилищного фонда.

3. Общественно-деловой сектор. Цель агентов общественно-делового сектора – разместить места приложения труда и обслуживания населения ближе к жилью, как путем занятия вакантных площадей существующей застройки, так и путем строительства нового общественно-делового фонда.

В случае жилищного и общественно-делового фондов понятие «ближе» следует интерпретировать не в смысле географических расстояний, а в смысле затрачиваемого на поездки времени.

Очевидно, что в реальности действия всех городских агентов разворачиваются во времени непрерывно и одновременно. В данной модели считается, что городские агенты поочередно осуществляют дискретные действия, которые зациклены во времени.

Динамическое описание модели градостроительной системы в графическом виде приведено на рисунке 2.2.

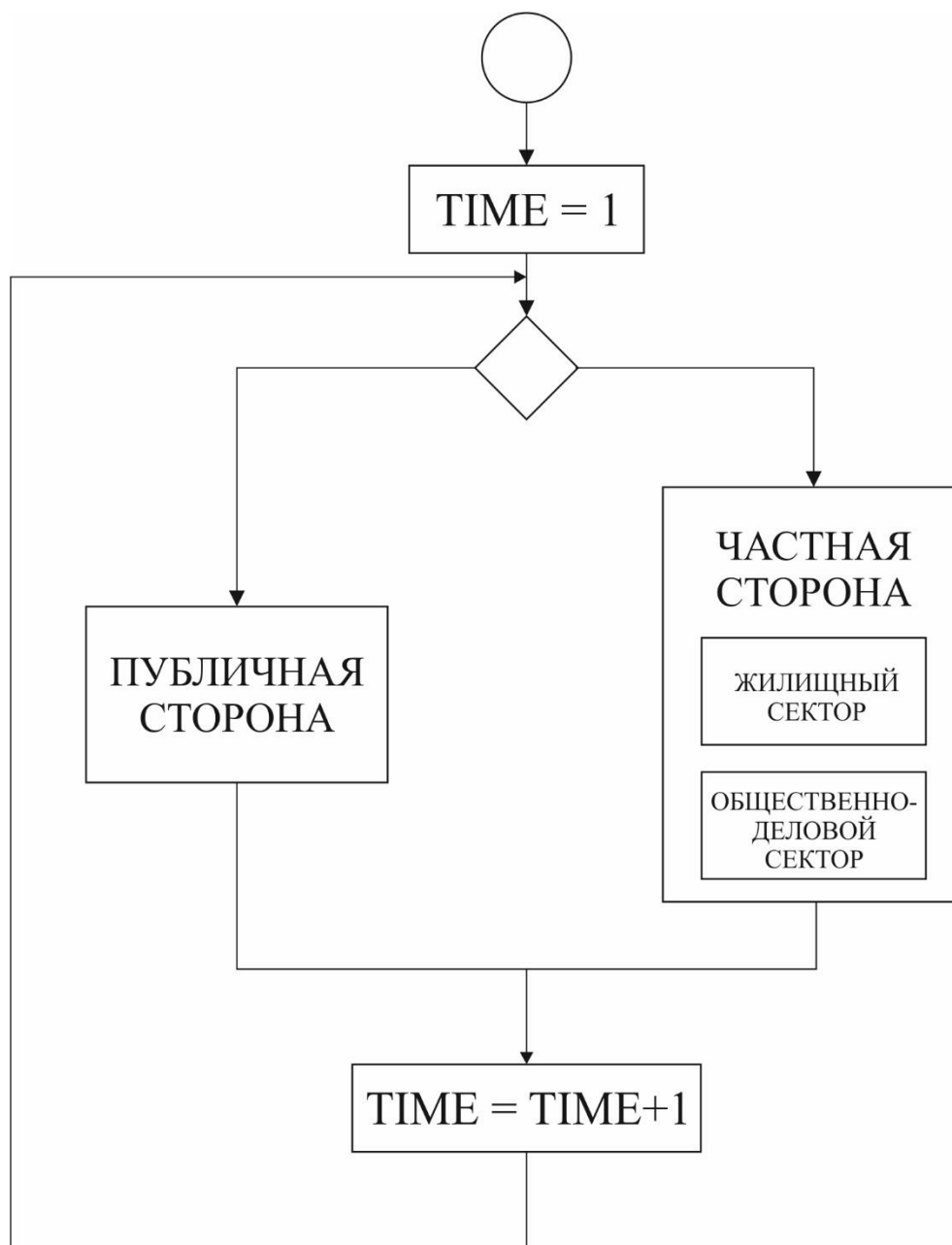


Рисунок 2.2 – Динамическое описание модели градостроительной системы.

2.2.3 Описание эволюционного развития градостроительной системы

Эволюционное развитие градостроительной системы обеспечивается за счет инструментов, посредством которых городские агенты осуществляют свои действия, и направленности этих действий. Реализация механизма эволюционного развития градостроительной системы, как было показано ранее, заложена в территориально-коммуникационной модели. Каждый агент-участник городского развития принимает решение на основании текущего состояния градостроительной системы – количественных оценок параметров ее элементов.

В терминах территориально-коммуникационной модели действия агентов жилищного и общественно-делового секторов направлены на устранение территориальных диспропорций с точки зрения критерия привлекательности территорий. Иными словами, агенты жилищного и общественно-делового секторов используют градостроительный потенциал территории, то есть большие значения ее транспортной доступности, повышая ее насыщенность.

В то же время агенты публичной стороны, развивая дорожно-транспортную сеть города, устраняют диспропорции с точки зрения критерия связности территорий, поскольку, как было отмечено ранее, изменение даже одного коммуникационного элемента влияет на транспортную доступность всех территорий.

Подобные эффективные градостроительные решения способствуют естественному ходу эволюционного развития города, поэтому такое поведение всех агентов можно охарактеризовать как «рациональное».

«Сферы ответственности» в части исправления территориальных диспропорций в графическом виде приведены на рисунке 2.3. Подробные описания действий агентов будут приведены далее; каждое действие будет формулироваться как решение независимой подзадачи.

Кроме того, такой принцип принятия градостроительных решений укладывается в актуальную концепцию компактного развития города.¹²⁹ В соответствии с этой концепцией, в данной модели для развития города используются его внутренние пространственные резервы: увеличиваются плотность жилищной и общественно-деловой застройки, увеличивается плотность дорожно-транспортной сети, ее суммарная емкость и доля от всей территории города. Расширение города путем присоединения новых территорий, то есть, в терминах данной модели, добавление вершин и дуг графа, происходит лишь после того, как исчерпаны все имеющиеся пространственные резервы.

¹²⁹ Jenks M., Burton E., Williams K. The Compact City: A Sustainable Urban Form? London: E & FN Spon, 1996.

Физические резервы и внешние эффекты-ограничители в виде регламентов и нормативов закладываются в модель следующим образом:

– для территориальных элементов – через определения значений атрибутов, препятствующих развитию территориальных элементов, то есть через задание физических пространственных резервов территорий, $L_i, i = \overline{1, n}$;

– для коммуникационных элементов: во-первых, через граф возможных соединений $\bar{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_{m+r}\}$, $\bar{U} = U \cup \tilde{U}$, где $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – множество существующих сегментов сети, а $\tilde{U} = \{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_r\}$ – множество дуг, у которых в текущий период времени пропускная способность равна нулю, но существует возможность строительства соответствующего сегмента сети; во-вторых, через предельные значения пропускных способностей всех возможных дуг $c = (c_1, c_2, \dots, c_{m+r})$.

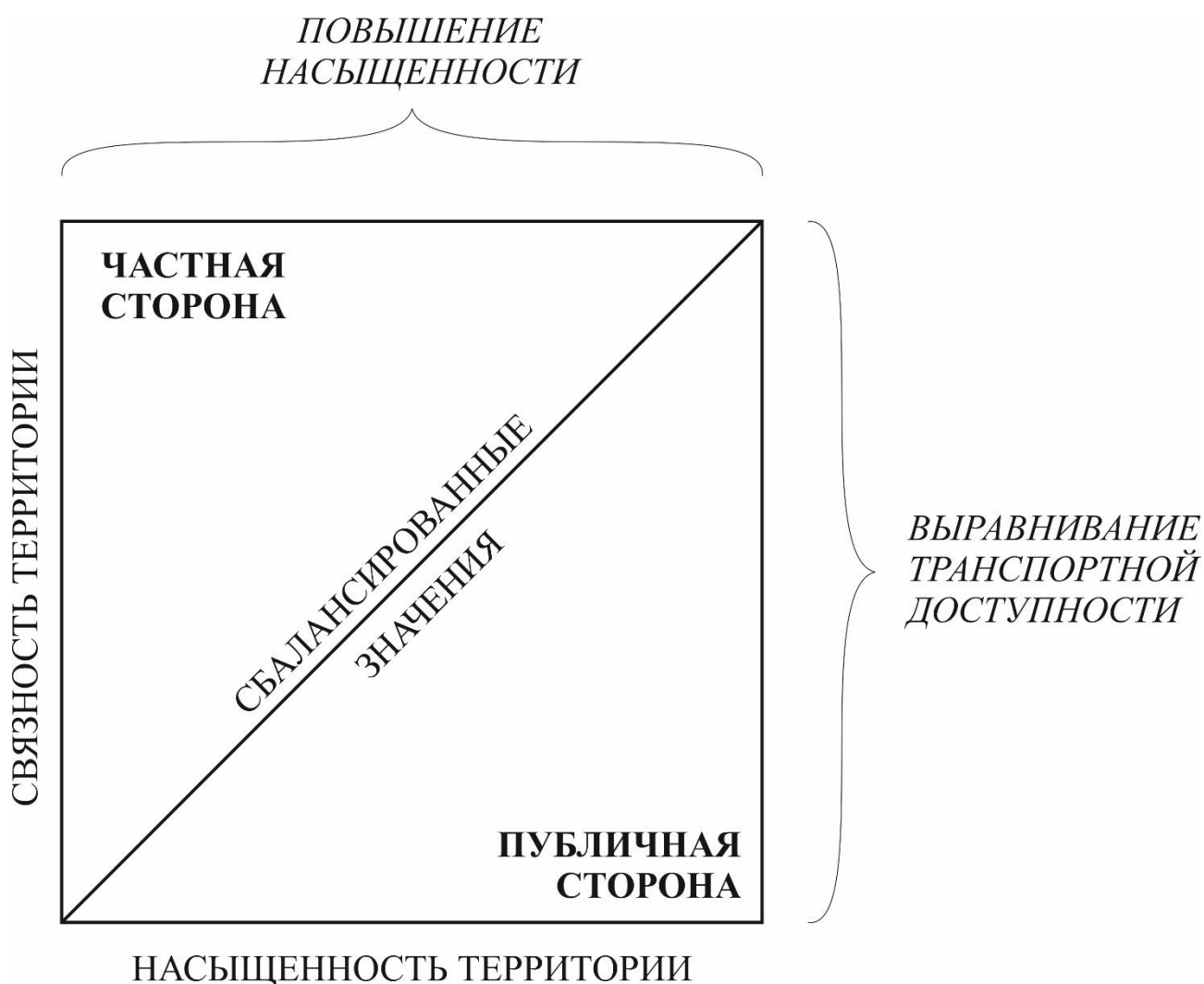


Рисунок 2.3 – Описание эволюционного развития градостроительной системы

2.3 Алгоритм прогнозирования транспортных потоков на сегментах дорожно-транспортной сети

Далее на некоторых этапах алгоритмов принятия решений агентами как публичной, так и частной сторон, необходим прогноз нагрузки на дорожно-транспортную сеть – значения интенсивностей транспортных потоков на всех сегментах сети при имеющейся структуре землепользования – распределении жилого и общественно-делового видов использования территорий градостроительной системы. Наиболее подходящий для решения этой задачи инструмент прогнозирования транспортных потоков – классическая четырехэтапная транспортная модель, или алгоритм поиска равновесного состояния транспортной системы.^{130,131,132} Применительно к данной задаче с ее допущениями, ограничениями и входными данными, четырехэтапная транспортная модель состоит в выполнении следующих шагов.

1. Генерация поездок. В транспортной модели каждая территория $v_k \in V$, $k = \overline{1, n}$, соответствует транспортному району. Для каждой территории $v_k \in V$, $k = \overline{1, n}$, задаются объемы отправления O_k , равные объемам жилых площадей W_k^H , а также объемы прибытия D_k , равные объемам мест приложения труда и обслуживания населения W_k^J .

2. Распределение поездок. Каждой паре территориальных элементов-транспортных районов соответствует спрос на поездку w_{ij} – общий объём пользователей, которые должны прибыть из района отправления v_i в район прибытия v_j . На основании спросов на поездки, объемов прибытия и отправления составляется матрица корреспонденций. Считается, что объемы определяются в соответствии с гравитационной моделью

$$w_{ij} = \frac{O_i D_j}{e^{-\delta_{ij}}}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где δ – калибровочный параметр, и удовлетворяют следующим ограничениям:

¹³⁰ Воробьёв А.Э., Титов А.Ю., Гаврилин В.А., Меньшутин А.Ю., Бахирев И.А. Транспортная модель Московского региона // Вычислительные технологии в естественных науках. Методы суперкомпьютерного моделирования. Сборник трудов. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 49–62.

¹³¹ Bates J. History of demand modeling // Handbook of Transport Modeling. Pergamon, 2000. P. 11–33.

¹³² Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и Телемеханика. 2003. №11. С. 3–46.

$$O_i = \sum_{j=1}^n w_{ij}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (6)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^n w_{ij}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad . \quad (7)$$

На практике данная система уравнений решается с помощью специального итерационного алгоритма.¹³³

3. Расщепление поездок по видам транспорта. На этом этапе для каждой пары территорий отправления и прибытия определяется вероятность использования того или иного вида транспорта для осуществления поездки. Поскольку в данной модели принято допущение о том, что транспортная система города состоит из сети наземных автомобильных дорог, это соответствует допущению об одном виде используемого транспорта. Следовательно, на текущем уровне детализации данной модели третий этап четырехэтапной транспортной модели можно опустить.

4. Наложение транспортных потоков на сеть, или распределение корреспонденций по маршрутам. Распределение потоков происходит в соответствии с первым принципом Вардропы: «Пользователи сети независимо друг от друга выбирают маршруты следования, соответствующие их минимальным затратам на передвижение». Или, иначе, ни один из участников движения не может изменить свой маршрут так, чтобы уменьшить индивидуальные затраты на передвижения.¹³⁴ Затраты на передвижение соответствуют продолжительности поездки, которая рассчитывается с помощью BPR-модели. Соблюдение принципа равновесия обеспечивается путем применения алгоритма Франке-Вульфа для распределения транспортных потоков по сегментам транспортной сети.¹³⁵

Таким образом, четырехэтапная транспортная модель на основании входных данных – жилых площадей W_k^H и мест приложения труда и обслуживания населения W_k^J , $k = \overline{1, n}$, выдает значения интенсивностей транспортных потоков $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ для каждого сегмента транспортной сети $u_i \in U$, $i = \overline{1, m}$.

Далее, когда необходимы прогнозы транспортных потоков, подразумевается, что они рассчитываются в соответствии с вышеприведенным методом.

¹³³ Воробьев А.Э., Титов А.Ю., Гаврилин В.А., Меньшутин А.Ю., Бахирев И.А.

Транспортная модель Московского региона // Вычислительные технологии в естественных науках. Методы суперкомпьютерного моделирования. Сборник трудов. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 49–62.

¹³⁴ Sheffi Y. Urban transportation networks. Englewood (NJ): Prentice-Hall, 1985. 399 p.

¹³⁵ Швецов В.И. Алгоритмы распределения транспортных потоков // Автоматика и Телемеханика. 2009. №10. С. 148–157.

2.4 Публичная сторона: развитие дорожно-транспортной сети градостроительной системы

2.4.1 Продолжительность поездок как критерий оценки пространственно-планировочной организации градостроительной системы

Задача данной работы решается в условиях гипотезы о городе как о «системе, сокращающей расстояния», что, как было показано, в современных условиях развивающихся транспортных систем и технологий, эквивалентно сокращению временных затрат на поездки. Время – важнейшая характеристика процессов городской жизнедеятельности. Транспортная система, обеспечивая экономию времени, формирует пространственно-временную структуру города и городской активности. Следовательно, градостроительная задача, или задача проектирования эффективной функционально-пространственной организации градостроительной системы, решается не только в пространстве, но и во времени.¹³⁶

С одной стороны, учет времени в масштабах эволюционного развития города заключается в выявлении наиболее устойчивых элементов системы, что обеспечивает как преемственность городского развития, так и адаптацию горожан к его темпам. С другой стороны, поскольку в пределах наилучшей транспортной доступности элементов пространственно-планировочной структуры наиболее интенсивно протекают процессы жизнедеятельности городского населения, учет времени делает город соразмерным масштабу ежедневной человеческой жизнедеятельности.¹³⁷

Следовательно, показатель суммарной продолжительности поездок посредством дорожно-транспортной сети – не просто характеристика городской подсистемы транспорта, показатель комфорта городской жизни, а может быть использован как обобщающая комплексная оценка всей пространственно-планировочной организации градостроительной системы.¹³⁸

¹³⁶ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

¹³⁷ Там же.

¹³⁸ Бочаров Ю.П., Кудрявцев О.К. Планировочная структура современного города. М.: Стройиздат, 1972. 160 с.

2.4.2 Задача выбора пропускных способностей коммуникационных элементов градостроительной системы

2.4.2.1 Особенности определения пропускных способностей сегментов городских дорожно-транспортных сетей и задачи распределения их значений по дугам транспортного графа

Согласно принятым в данной модели допущениям, продолжительность поездки по сегменту дорожно-транспортной сети вычисляется в соответствии с BPR-моделью, то есть зависит от загруженности сегмента сети. В свою очередь максимально возможная загруженность сегмента сети определяется пропускной способностью этого сегмента. Следовательно, минимальная продолжительность поездки напрямую зависит от пропускных способностей сегментов сети.

Таким образом, если целью публичной стороны является выравнивание транспортной обеспеченности городских территорий, то содержательно задача развития дорожно-транспортной сети состоит из двух подзадач:

- выбор пропускных способностей отдельных сегментов существующей сети;
- принятие решений о строительстве нового сегмента сети.

В данной модели будет приведено решение макроуровня – принципиальные решения, или методы определения оптимальных значений пропускных способностей. Решения микроуровня, или технические решения (методы обеспечения пропускных способностей путем установления таких параметров как физическая протяженность сегмента сети, количество полос и физические размеры полос, размещение светофоров, размещение дорожных знаков, транспортная политика в отношении скоростных режимов, и прочее) находятся за пределами рассматриваемой задачи.

Точное определение пропускной способности сегмента дорожно-транспортной сети являются предметом обсуждений на протяжении последних десятилетий.¹³⁹ Наиболее универсальное определение, подходящее для макро моделирования, описывает пропускную способность сегмента дорожно-транспортной сети как «предел» его «транспортонесущей [vehicle-carrying] возможности».¹⁴⁰

¹³⁹ Kalae M.S. Investigating Freeway Speed-Flow Relationships for Traffic Assignment Applications. Dissertations and Theses. Paper 33. Portland State University, 2010.

¹⁴⁰ Lorenz M.R., Elefteriadou L. Defining Freeway Capacity as Function of Breakdown Probability // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2001. Vol. 1776. P. 43–51.

Рассмотрим задачу выбора пропускных способностей коммуникационных элементов градостроительной системы в следующей постановке. Необходимо выбрать такие пропускные способности сегментов дорожно-транспортной сети, чтобы суммарная продолжительность поездок по ним была минимальной, а их суммарная стоимость не превышала заданной величины.

Далее будет рассмотрено два случая постановки данной задачи. В первом случае оптимальные пропускные способности определяются отдельно для каждой дуги графа, и зависят только от величины потока по этой дуге. Вторая формулировка задачи содержит дополнительное условие, согласно которому для каждого ребра пропускные способности двух его разнонаправленных дуг должны быть одинаковыми.

2.4.2.2 Первый случай: независимое определение пропускных способностей дуг транспортного графа

Задана территориально-коммуникационная система в виде графа $G=(V,U)$, где множеству вершин графа $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ соответствует множество территориальных элементов системы, а множеству дуг $U=\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – множество коммуникационных элементов системы. При этом каждая дуга графа транспортной сети $u_i=(v_k, v_l) \in U$ представляет сегмент городской дорожно-транспортной сети, направленный из узла v_k в узел v_l , $k, l \leq n$, $k \neq l$.

Считаем, что публичная сторона располагает бюджетом в объеме S . Согласно допущению данной модели, суммарная продолжительность поездок по всем сегментам сети при прогнозируемой с помощью четырехэтапной транспортной модели нагрузке, то есть при транспортных потоках $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, выражается следующим образом:

$$T = \sum_{k=1}^m \left[t_{0k} \left(1 + \alpha \left(\frac{f_k}{c_k} \right)^\beta \right) \right]. \quad (8)$$

Как было показано, это оптимальный критерий для оценки эффективности организации пространственно-планировочной структуры градостроительной системы. Таким образом, задача оптимального выбора пропускных способностей дуг графа транспортной сети заключается в следующем.

Задача 1.

Необходимо определить такие значения пропускных способностей $c = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ сегментов сети, которые минимизируют функцию T и удовлетворяют ограничениям

$$\sum_{k=1}^m (a_k c_k + b_k) \leq S, \quad (9)$$

$$c_k > f_k, \quad k = \overline{1, m}. \quad (10)$$

Решение задачи 1 получается следующим образом.^{141,142}

Алгоритм 1.

1. Вычислим

$$S_0 = \sum_{k=1}^m (a_k f_k + b_k). \quad (11)$$

S_0 – минимальная сумма бюджетных средств, которая необходима, чтобы обеспечить пропускные способности всех сегментов дорожно-транспортной сети при прогнозируемой нагрузке $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$.

2. Вычислим

$$\Delta S = S - S_0. \quad (12)$$

В случае, если публичная сторона располагает средствами $S > S_0$, то содержательно задача заключается в оптимальном распределении средств в объеме ΔS между всеми коммуникационными элементами сети при прогнозируемой нагрузке $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$. Для $S > S_0$ решение этой задачи существует и единственно.

¹⁴¹ Гостев М.В., Хабибуллин Р.Ф. Об оптимальном выборе пропускных способностей каналов транспортных сетей // Системы управления и информационные технологии. 2014. №2.1 (56). С. 120–124.

¹⁴² Гостев М.В., Хабибуллин Р.Ф. Об одной задаче оптимального выбора пропускных способностей каналов транспортных сетей // Проблемы теоретической кибернетики: Материалы XVII международной конференции. Казань: Отечество, 2014. С. 69–72.

3. Оптимальная пропускная способность каждого сегмента сети $u_i \in U$, $i = \overline{1, m}$, рассчитываются следующим образом:

$$c_k = \frac{\Delta S + \sum_{k=1}^m a_k f_k}{\sum_{k=1}^M a_k} \beta^{+1} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m a_k}{a_k}}. \quad (13)$$

Таким образом, точное решение задачи в случае независимого выбора пропускных способностей каналов получено в явном аналитическом виде.

В этом случае, если по двум противоположно направленным дугам, составляющим ребро графа, потоки окажутся различными, то оптимальные пропускные способности для обеих дуг также будут различными. В то же время для транспортных сетей типичен случай несимметричных потоков, а пропускные способности дуг в двух направлениях, составляющих ребро, как правило, одинаковы. В случае несимметричной нагрузки на сеть приведенный метод решения этой задачи может оказаться неподходящим.

2.4.2.3 Второй случай: определение пропускных способностей дуг транспортного графа с условием равенства для разнонаправленных дуг одного ребра

Задана территориально-коммуникационная система в виде графа $G = (V, U)$, где множеству вершин графа $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ соответствует множество территориальных элементов системы, а множеству ребер $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – множество коммуникационных элементов системы. Каждое ребро графа представлено двумя противоположно направленными дугами.

В этом случае суммарная продолжительность поездок по всем каналам сети выразится следующим образом:

$$T = \sum_{k=1}^m \left[t'_{0k} \left(1 + \alpha \left(\frac{f'_k}{c_k} \right)^\beta \right) + t''_{0k} \left(1 + \alpha \left(\frac{f''_k}{c_k} \right)^\beta \right) \right], \quad (14)$$

где f'_k и f''_k – потоки, проходящие по дугам ребра $u_k \in U$ в двух его противоположных направлениях, t'_{0k} и t''_{0k} – продолжительности поездок в свободном потоке по соответствующим дугам ребра $u_k \in U$, $k = \overline{1, m}$.

Считаем также, что публичная сторона располагает бюджетом в объеме S . Таким образом, задача оптимального выбора пропускных способностей дуг графа транспортной сети с условием равенства их значений для разнонаправленных дуг одного ребра заключается в следующем.

Задача 2.

Необходимо определить такие значения пропускных способностей $c = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ сегментов сети, которые минимизируют функцию T и удовлетворяют ограничениям

$$\sum_{k=1}^m (a_k c_k + b_k) \leq S, \quad (15)$$

$$c_k > f_k, \quad k = \overline{1, m}. \quad (16)$$

Для этой задачи существует точное и единственное численное решение, которое, однако, обладает некоторой трудоемкостью. В качестве альтернативы было получено приближенное решение в аналитическом виде, которое обладает малой погрешностью, и применение которого позволит значительно сократить время имплементации модели. С учетом вышесказанного, решение поставленной задачи заключается в следующем.¹⁴³

Алгоритм 2.

1. Для каждого сегмента сети определяется максимальный из двух противоположно направленных по нему транспортных потоков:

$$\bar{f}_k = \max\{f'_k, f''_k\}, \quad k = \overline{1, m}. \quad (17)$$

Считаем, не ограничивая общности, что все $\bar{f}_k > 0$

2. Вычисляется

$$S_0 = \sum_{k=1}^m (a_k \bar{f}_k + b_k). \quad (18)$$

3. Вычисляется

¹⁴³ Там же.

$$\Delta S = S - S_0. \quad (19)$$

S_0 и ΔS по смыслу соответствуют аналогичным обозначениям из алгоритма 1.

4. Положим в качестве f_k , $k = \overline{1, m}$, одно из следующих выражений:

$$f_k = \bar{f}_k = \max\{f'_k, f''_k\}; \quad (20)$$

$$f_k = \frac{1}{2}(f'_k + f''_k); \quad (21)$$

$$f_k = \sqrt{f'_k f''_k}, \text{ если } \min\{f'_k, f''_k\} > 0. \quad (22)$$

5. Оптимальная пропускная способность каждого сегмента сети $u_i \in U$, $i = \overline{1, m}$, рассчитываются следующим образом:

$$c_k = \frac{\Delta S + \sum_{k=1}^m a_k f_k}{\sum_{k=1}^m a_k} \sqrt[\beta+1]{\frac{\sum_{k=1}^m a_k f_k^\beta t_{0k}}{a_k f_k^\beta t_{0k}}}. \quad (23)$$

Если в формуле (23) при $S > S_0$ в качестве f_k , $k = \overline{1, m}$, взять выражение (20), (21) или (22), то получающиеся в каждом из этих случаев значения $c = (c_1, \dots, c_m)$ удовлетворяют всем ограничениям задачи выбора пропускных способностей сегментов сети, так как выполняются условия $c_k > \bar{f}_k$ для всех $k = \overline{1, m}$, и $S = \sum_{k=1}^m (a_k c_k + b_k)$, то есть такие значения $c = (c_1, \dots, c_m)$ являются допустимыми решениями задачи.

Отметим также, что в случае симметричных потоков на противоположно направленных дугах одного ребра, то есть когда $f'_k = f''_k$, $k = \overline{1, m}$, все три способа задания f_k в формуле (23) дают одно и то же решение задачи, которое доставляет минимальное значение критерию T . Таким образом, в общем случае решения, получающиеся прямым расчетом по простой формуле (23) можно использовать в качестве приближенных решений поставленной задачи.

Для оценки относительных погрешностей приближенных решений, получаемых по формуле (23) с использованием выражений (20), (21), и (22) соответственно, были проведены вычислительные эксперименты с тестовыми примерами. Они показали, что, когда возможно

использование приближенных решений, можно получить решение вычислением по этой формуле с использованием (21) или (22), вместо трудоемкого численного решения задачи.¹⁴⁴

Предположим, необходимо выбрать значение пропускной способности сегмента дорожно-транспортной сети из дискретного множества – например, множества заданных строительными нормами и правилами значений. В этом случае следует округлить значение пропускной способности каждого сегмента дорожно-транспортной сети $c = (c_1, \dots, c_m)$ до ближайшего порогового значения, которое соответствует тому или иному заданному дискретному значению.

Гибкость описываемой модели позволяет осуществлять поиск решения не для всех элементов сети, а для некоторого заранее выделенного подмножества дуг $\hat{U} = \{\hat{u}_1, \hat{u}_2, \dots, \hat{u}_j\} \subset U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, $j < m$.

При принятии окончательного решения о выборе пропускных способностей $c = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ сегментов дорожно-транспортной сети необходимо принимать во внимание предварительно определенные предельные значения пропускных способностей всех возможных дуг транспортного графа $\bar{c} = (\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_{m+r})$.

¹⁴⁴ Там же.

2.4.3 Принятие решения о строительстве нового сегмента дорожно-транспортной сети градостроительной системы

Как было показано, существующие операционные городские модели и интегрированные модели в большей степени являются моделями землепользования, в которых транспортный компонент в лучшем случае представлен классической четырехступенчатой транспортной моделью, а в худшем случае вовсе не представлен в явном виде; изменения в физической конфигурации транспортной инфраструктуры не репрезентируются ни в каком случае. Для учета топологической конфигурации транспортной сети сформулируем задачу следующим образом.

Задана территориально-коммуникационная система в виде графа $G=(V,U)$, где множеству вершин графа $V=\{v_1, v_2, ..., v_n\}$ соответствует множество территориальных элементов системы, а множеству дуг $\bar{U}=\{\bar{u}_1, \bar{u}_2, ..., \bar{u}_{m+r}\}$ – множество всех возможных коммуникационных элементов системы. При этом $\bar{U}=U \cup \tilde{U}$, где $U=\{u_1, u_2, ..., u_m\}$ – множество существующих сегментов сети, а $\tilde{U}=\{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, ..., \tilde{u}_r\}$ – множество дуг, у которых в текущий период времени пропускная способность равна нулю, но существует возможность строительства соответствующего сегмента сети.

Считаем, что известна прогнозируемая нагрузка на сеть, то есть распределение транспортных потоков $f=(f_1, f_2, ..., f_m)$ по существующим дугам транспортного графа; с применением BPR-модели рассчитаны соответствующие значения продолжительностей поездок $t=(t_1, t_2, ..., t_m)$ для каждой дуги.

Поскольку решение о строительстве нового сегмента дорожно-транспортной сети имеет долгосрочный эффект, оказывающее влияние в том числе на социальную сферу городской жизни, принятие такого решения должно быть обосновано с точки зрения целесообразности и эффективности. Так как главным критерием оценки эффективности пространственно-планировочной организации транспортной инфраструктуры является суммарная продолжительность поездок, новый сегмент дорожно-транспортной сети должен настолько сокращать значение этого критерия, что затраты на строительство этого сегмента будут целесообразны и с точки зрения финансирования, и с точки зрения использования пространственных резервов.

Обозначим через ΔT_{eff} экономию времени, которая отвечает сформулированным требованиям. Поскольку модуль принятия градостроительных решений публичной стороной

представляет целевую сторону программно-прогнозной модели,¹⁴⁵ значение ΔT_{eff} задается нормативным образом. В том случае, если изменения текущего структурного состояния системы при имеющихся ресурсах не приведут к целевой экономии суммарного бюджета времени, повторная имплементация модели позволит спрогнозировать, через какой промежуток расчетного времени это станет возможным.

В соответствии с описанным выше принципом, алгоритм принятия решения о строительстве нового сегмента сети будет иметь следующий вид.

Алгоритм 3.

1. Вычисляется суммарная продолжительность поездок по всем существующим сегментам дорожно-транспортной сети при прогнозируемых потоках $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$:

$$T^0 = \sum_{k=1}^m t_k. \quad (24)$$

2. Для каждой дуги подграфа возможных соединений $\tilde{u}_i \in \tilde{U}$, $i = \overline{1, r}$, осуществляется следующая последовательность шагов.

2.1. Осуществляется включение дуги $\tilde{u}_i$ в граф U : $\tilde{u}_i \in U$, $\tilde{u}_i \notin \tilde{U}$.

2.2. С применением четырехступенчатой транспортной модели осуществляется оптимальное распределение потоков по новой сети, $f = (f_1, f_2, \dots, f_{m+1})$.

2.3. С применением BPR-модели рассчитывается продолжительность поездок по каждому сегменту новой сети, $t = (t_1, t_2, \dots, t_{m+1})$.

2.4. Вычисляется суммарная продолжительность поездок по всем сегментам новой дорожно-транспортной сети с учетом «временно» включенной дуги $\tilde{u}_i$,

$$T^i = \sum_{k=1}^{m+1} t_k. \quad (25)$$

2.5. Рассчитывается разница между суммарным временем поездок по всем сегментам сети до включения новой дуги $\tilde{u}_i$ в сеть, и после:

$$\Delta T^i = T^0 - T^i. \quad (26)$$

¹⁴⁵ Подробно два аспекта модели (прогнозный и нормативный) описываются в главе 3 данной работы.

3. По итогам выполнения шага 2 каждой дуге-кандидату на включение $\tilde{u}_i \in \tilde{U}$, $i = \overline{1, r}$, ставится в соответствие значение объема времени ΔT^i , которое будет сэкономлено в случае включения дуги в граф. Среди элементов сформированного таким образом множества $\{\Delta T^1, \Delta T^2, \dots, \Delta T^r\}$ находим такое i , при котором разница между суммарной продолжительностью поездок до включения дуги $\tilde{u}_i \in \tilde{U}$ и после максимальна:

$$i: \Delta T^i = \max\{\Delta T^1, \Delta T^2, \dots, \Delta T^r\}. \quad (27)$$

Иными словами, экономия времени в объеме ΔT^i – наибольший эффект, возможный при включении одной из возможных дуг в транспортный граф.

4. Если

$$\Delta T^i \geq \Delta T_{eff}, \quad (28)$$

то происходит окончательное включение дуги $\tilde{u}_i$ в граф U : $\tilde{u}_i \in U$, $\tilde{u}_i \notin \tilde{U}$. После включения дуги в сеть необходимо провести процедуру выбора пропускных способностей сегментов дорожно-транспортной сети согласно алгоритму 1 или алгоритму 2.

Как будет показано далее, в части про оценку бюджетных эффектов от развития дорожно-транспортной сети, аналогичным критерием включения дуги в граф может быть показатель экономической эффективности, либо свертка двух критериев.

2.5 Жилищный сектор: выбор мест размещения жилищного фонда и мест проживания

Действия агентов жилищного сектора разворачиваются в три этапа:

- оценка градостроительного потенциала территории;
- оценка диспропорции территории;
- принятие решения.

2.5.1 Оценка градостроительного потенциала территории

Градостроительный потенциал территорий жилищного сектора – их связность с местами приложения труда и обслуживания населения. Количественно градостроительный потенциал территории определяется как суммарная численность мест приложения труда и обслуживания населения, которые расположены на территориях, попадающих в изохрону времени комфортной доступности рассматриваемой жилой территории. Градостроительный потенциал территории характеризует транспортную доступность для бизнеса и управления «рабочих рук», посетителей и пользователей объектов, как аналогичную меру экономической привлекательности территории для размещения и развития соответствующих объектов. Чем выше градостроительный потенциал территории, тем такая территория социально привлекательнее для проживания и экономически выгоднее для размещения нового жилищного фонда.¹⁴⁶

Рассмотрим задачу оценки градостроительного потенциала жилых территорий в следующей формулировке.

Задача 3.

Задана территориально-коммуникационная система в виде графа $G = (V, U)$, где множеству вершин графа $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ соответствует множество территориальных элементов системы, а множеству дуг $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – множество коммуникационных элементов системы.

¹⁴⁶ Баевский О.А. Закономерности непрерывного развития жилой среды крупнейшего города (на примере Москвы) // Экология города и проблемы управления. М., 1989.

Для каждого сегмента $u_i \in U$, $i = \overline{1, m}$ дорожно-транспортной сети градостроительной системы заданы значения его емкости, или пропускной способности c_i , и интенсивности транспортного потока f_i .

Для каждого жилого территориального элемента системы $v_k \in V$, $k = \overline{1, n}$ заданы значения объема занятых жилых площадей W_k^H , а также значения объема доступных рабочих мест $D_k^J - W_k^J$.

Объекты обслуживания населения и места приложения труда имеют комфортные транспортные связи не с одной жилой территорией, а с несколькими; следовательно, градостроительный потенциал территории жилищного сектора рассчитывается как доля связности с местами приложения труда, находящимися в изохроне комфортной транспортной доступности рассматриваемой территории $v_k \in V$, которая приходится непосредственно на жилые площади W_k^H этой территории.

Таким образом, в первую очередь необходимо определить количество всех рабочих мест W_k^{total} , находящихся в пределах изохрона времени комфортной доступности от рассматриваемой территории. Величина W_k^{total} определяется следующим образом.

Алгоритм 4.

1. Для каждого сегмента дорожно-транспортной сети $u_i \in U$, $i = \overline{1, m}$, с применением BPR-модели рассчитывается продолжительность поездки t_i по нему.

2. Для каждой вершины-территориального элемента $v_k \in V$ с ненулевым объемом жилищного фонда, $D_k^H \neq 0$, осуществляется следующая последовательность действий, $k = \overline{1, n}$.

2.1. С помощью алгоритма поиска кратчайших путей в графе¹⁴⁷ определяются кратчайшие пути от выбранной вершины $v_k \in V$ до всех остальных вершин $v_l \in V$, $l = \overline{1, n-1}$; в качестве длины дуги $u_i \in U$, $i = \overline{1, m}$, используется продолжительность поездки t_i по ней, рассчитанная на первом шаге алгоритма. Таким образом, каждой вершине $v_l \in V$, $l = \overline{1, n-1}$, ставится в соответствие продолжительность поездки t_l^v до нее от рассматриваемой вершины $v_k \in V$.

¹⁴⁷ Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.

2.2. Выбираются все вершины $v_l \in V$ такие, что $t_l^v < t_{\max}$. Подмножество таких вершин, $V^q = \{v_1, v_2, \dots, v_q\}$, $V^q \subset V$, находятся в изохроне времени комфортной доступности от рассматриваемой вершины $v_k \in V$.

2.3. Суммируется количество свободных рабочих мест на рассматриваемой территории $v_k \in V$ в пределах ее изохрона времени комфортной доступности:

$$W_k^{total} = D_k^J - W_k^J + \sum_{l=1}^q (D_l^J - W_l^J) : v_l \in V^q. \quad (29)$$

Значение W_k^{total} выражается в квадратных метрах; Рабочие места, приведенные к количеству человек, выражаются как $W_k^{total} / norm^J$.

Определим аналогичным образом связность N_k^H территории $v_k \in V$ с населением прочих территориальных элементов градостроительной системы, находящихся в ее изохроне – то есть с населением, с которым жители территории $v_k \in V$ делят рабочие места W_k^{total} :

$$N_k^H = W_k^H + \sum_{l=1}^q W_l^H : v_l \in V^q. \quad (30)$$

Содержательная интерпретация связности с населением с точки зрения мест приложения труда и обслуживания населения будет приведена в следующем разделе.

Доля рабочих мест, приходящихся на жилые площади территории $v_i \in V$ определяется следующим образом, $i = \overline{1, n}$.

Алгоритм 5.

1. Обеспеченность q_i территории $v_i \in V$ объектами обслуживания вычисляется как:¹⁴⁸

$$q_i = \sum_k \left(\frac{W_k^J}{N_k^H} \right) : v_k \in V^q. \quad (31)$$

¹⁴⁸ Бабий А.В., Каверин А.Р., Шмутьян Б.Л. Принципы организации диалога для формирования стратегии размещения обслуживающих центров в крупнейшем городе // Элементы диалоговой системы анализа и управления развитием города. Сборник трудов. Выпуск 14. М.: ВНИИСИ, 1984. С. 49–57.

2. Средняя обеспеченность местами приложения труда и обслуживания населения (в том числе других районов), связанного с объектами, расположенными в изохроне комфортной доступности рассматриваемого района, рассчитывается по формуле¹⁴⁹

$$M_i = \sum_k \left(\frac{W_k^H q_k}{N_i^H} \right) : v_k \in V^q. \quad (32)$$

3. Доля γ_i связности с местами приложения труда, которая приходится на рассматриваемую территорию $v_i \in V$, вычисляется следующим образом:

$$\gamma_i = \frac{W_i^H}{norm^H} M_i. \quad (33)$$

4. Количество рабочих мест W_i^q , которое приходится на рассматриваемую территорию $v_i \in V$, и которое выражено в количестве людей, рассчитывается как

$$W_i^q = \gamma_i \frac{W_i^H / norm^H}{W_i^{empl}}, \quad (34)$$

где W_i^{empl} – количество трудоспособных людей, проживающих на рассматриваемой территории.

2.5.2 Оценка диспропорции и принятие решения

Для принятия решения о направлении последующего развития территории $v_i \in V$ осуществляется оценка диспропорции значений ее насыщенности и связности, $i = \overline{1, n}$.

В качестве насыщенности территории принимается объем занятых жилых площадей в составе жилищного фонда территории, выраженный в количестве проживающих людей $W_i^H / norm^H$. Связность жилой территории с местами приложения труда и обслуживания населения выражается в количестве рабочих мест W_i^q , находящихся в изохроне комфортной транспортной доступности, которые приходятся на эту территорию.

¹⁴⁹ Там же.

Кроме того, при оценке территорий и принятии решений о направлении их дальнейшего развития также необходимо принимать во внимание физические резервы развития территории D_i .

Итак, если

$$\frac{W_i^H}{norm^H} < W_i^q \quad (35)$$

то в настоящее время у жилой территории есть резервы развития; возможно увеличение объема занятых жилых площадей в размере (квадратных метрах)

$$\Delta W = W_i^q norm^H - W_i^H. \quad (36)$$

Если, кроме того,

$$D < W_i^q, \quad (37)$$

то в ближайшей перспективе также целесообразно дальнейшее жилищное строительство на территории.

Если

$$\frac{W_i^H}{norm^H} > W_i^q, \quad (38)$$

то в настоящее время ресурсы жилой территории исчерпаны. В этом случае необходимо развивать места приложения труда и обслуживания населения на территориях $v_k \in V^q$, которые находятся в пределах комфортной транспортной доступности. Также есть вероятность, что будет принято решение о смене места жительства у горожан, занимающих жилую площадь рассматриваемой территории.

Особенностью данного расчета территориальных диспропорций и важным отличием от инструментария, предоставляемого территориально-коммуникационной моделью является то, что в данном случае оценки диспропорций не относительные матричные, а выражены в явном количественном виде. Иными словами, если в территориально-коммуникационной модели для

оценки диспропорций используется трехчастное деление матрицы по категориям значений «низкие», «средние» и «высокие», то приведенный выше метод рассчитывает абсолютные значения диспропорций.

2.6 Общественно-деловой сектор: выбор мест размещения мест приложения труда и обслуживания населения

Действия агентов общественно-делового сектора разворачиваются в три этапа:

- оценка градостроительного потенциала территории;
- оценка диспропорции территории;
- принятие решения.

2.6.1 Оценка градостроительного потенциала территории

Градостроительный потенциал территорий общественно-делового сектора – их связность с населением. Градостроительный потенциал каждой отдельной территории количественно определяется как суммарная численность населения, которое проживает на территориях, попадающих в изохрону времени комфортной доступности рассматриваемой общественно-деловой территории. Градостроительный потенциал территории характеризует транспортную доступность для жителей мест приложения труда, товаров и услуг, как укрупненную меру социального комфорта проживания на территории. Чем выше градостроительный потенциал территории, тем экономически привлекательнее такая территория для размещения мест приложения труда и объектов обслуживания населения.¹⁵⁰

Как и в случае оценки градостроительного потенциала территорий жилищного сектора, оценка градостроительного потенциала территории $v_i \in V$ с объемом общественно-деловых площадей W_i^J , $i = \overline{1, n}$, осуществляется в два основных этапа.

1. Определение объема всех жилых площадей W_k^{total} , расположенных на территориях в пределах изохрона комфортной временной доступности $v_k \in V^q = \{v_1, v_2, \dots, v_q\}$, $V^q \subset V$.

Расчет значения W_k^{total} осуществляется аналогично приведенному алгоритму 4.

2. Определение доли W_i^q жилых площадей, приходящихся непосредственно на общественно-деловые площади W_i^J территории $v_i \in V$. Расчет значения W_i^q осуществляется аналогично приведенному алгоритму 5.

¹⁵⁰ Баевский О.А. Закономерности непрерывного развития жилой среды крупнейшего города (на примере Москвы) // Экология города и проблемы управления. М., 1989.

2.6.2 Оценка диспропорции и принятие решения

Для принятия решения о направлении последующего развития территории $v_i \in V$ осуществляется оценка диспропорции значений ее насыщенности и связности, $i = \overline{1, n}$.

В качестве насыщенности территории принимается объем площадей в составе общественно-делового фонда территории, занятых местами приложения труда и обслуживания населения. Насыщенность выражается в количестве рабочих мест $W_i^J / norm^J$. Связность общественно-деловой территории с населением выражается в количестве горожан, W_i^q , проживающих в изохроне комфортной транспортной доступности, которые пользуются объектами общественно-делового назначения, расположенными на этой территории.

Если

$$\frac{W_i^J}{norm^J} < W_i^q, \quad (39)$$

то территория $v_i \in V$ обладает ресурсом развития; возможно увеличение объема общественно-деловых площадей в размере (квадратных метрах)

$$\Delta W = W_i^J - W_i^q norm^J. \quad (40)$$

Если

$$\frac{W_i^J}{norm^J} > W_i^q, \quad (41)$$

то необходимо снизить интенсивность использования территории, так как общественно-деловыми объектами пользуются горожане, проживающие вне изохрона комфортной временной доступности рассматриваемой территории.

2.7 Оценка бюджетных эффектов от развития дорожно-транспортной сети градостроительной системы

2.7.1 Понятие бюджетных эффектов

Финансовый модуль данной модели не предназначен для полноценной репрезентации финансовых отношений между всеми возможными участниками таких отношений – агентами градостроительной системы, но, по построению модели, способен применяться для оценки так называемых бюджетных эффектов. Бюджетные эффекты¹⁵¹ – положительные внешние эффекты, которые испытывают на себе все участники финансовых отношений при финансировании публичной стороной общественного блага, то есть развития дорожно-транспортной городской сети, и которые выражены в денежном эквиваленте. Оценка бюджетного эффекта отвечает на вопрос: какую выгоду получит собственник жилья, если рядом с его домом будет проведена дорога? Какую выгоду получит публичная сторона после тех же мероприятий? Или, иначе: каким образом эффект от повышения транспортной доступности может быть выражен в денежном эквиваленте для каждой из сторон?

Общая логика выявления бюджетных эффектов заключается в следующем. Публичная сторона располагает некоторым бюджетом, либо целевой частью бюджета S , который целиком предназначен для развития дорожно-транспортной сети градостроительной системы. В той или иной степени, такой бюджет пополняется за счет налогов с городских территорий – в частности, земельного налога и налога на недвижимое имущество. Объем взимаемого налога напрямую зависит от стоимости недвижимости (либо земельного участка) – как жилых зданий, так и зданий общественно-делового назначения. Стоимость недвижимости, в свою очередь, зависит от эффективности территориальной организации, то есть, сочетания показателей насыщенности и связности. В случае общественно-деловых территорий их организация влияет не только на стоимость недвижимости, но и на доход, получаемый посредством использования ее площадей. Так, на общественно-деловых территориях агентами ведется экономическая деятельность, которая приносит им доход. Максимальный доход ограничен минимальным из двух значений насыщенности и связности. Очевидно, что если насыщенность меньше связности, то доход так или иначе пропорционален насыщенности. Если насыщенность больше связности, то доход так или иначе пропорционален связности. Повышение каждого из территориальных показателей ведет к

¹⁵¹ Сухарев О.С. Бюджетные расходы, эффективность и приоритеты развития экономики // Финансовый журнал. 2015. № 1. С. 17-28.

качественным изменениям территории, которые, в конечном итоге, влияют на оценку стоимости объектов недвижимости.

Отметим, что в данном случае имеет место непрерывный цикл, аналогичный эволюционному циклу градостроительной системы.

2.7.2 Алгоритм оценки бюджетных эффектов от развития дорожно-транспортной сети градостроительной системы

1. На шаге *time* осуществляются следующие действия агентов.

1.1. Действия агентов жилищного и общественно-делового секторов.

1.1.1. Фиксируется суммарная стоимость p_k объектов недвижимости, размещенных в границах каждого территориального элемента системы $v_k \in V$, $k = \overline{1, n}$.

1.1.2. Осуществляется выплата налогов на объекты недвижимости с каждого территориального элемента системы в размере $tax(v_k)$, $k = \overline{1, n}$.

1.2. Действия публичной стороны.

1.2.1. Осуществляется сбор налогов со всех территориальных элементов системы:

$$s = \sum_{k=1}^n tax(v_k), \quad (42)$$

где $tax(\cdot)$ – функция расчета объема взимаемого налога.

1.2.2. Осуществляется трата бюджета s на развитие дорожно-транспортной сети города. В результате увеличивается транспортная доступность территорий, что в короткой перспективе приводит к изменению стоимости объектов недвижимости, а в длинной перспективе – к повышению насыщенности территории.

2. На шаге *time* + 1 осуществляются следующие действия агентов.

2.1. Действия агентов жилищного и общественно-делового секторов.

2.1.1. Фиксируется суммарная стоимость P_k объектов недвижимости, размещенных в границах каждого территориального элемента системы $v_k \in V$, $k = \overline{1, n}$.

2.1.2. Осуществляется выплата налогов на недвижимость с каждого территориального элемента системы в размере $tax(v_k)$, $k = \overline{1, n}$.

2.2. Публичной стороной осуществляется сбор налогов со всех территориальных элементов системы:

$$S = \sum_{k=1}^n tax(v_k). \quad (43)$$

3. Расчет бюджетного эффекта за трату средств бюджета в объеме s на развитие дорожно-транспортной сети города за период времени $(time, time + 1)$.

3.1. Суммарная стоимость объектов недвижимости, размещенных в границах каждого территориального элемента системы $v_k \in V$, $k = \overline{1, n}$, выросла на

$$\Delta P_k = P_k - p_k. \quad (44)$$

3.2. После развития дорожно-транспортной сети объем собираемых публичной стороной налогов вырос на

$$\Delta S = S - s. \quad (45)$$

2.7.3 Бюджетный эффект как критерий принятия решения о строительстве нового сегмента дорожно-транспортной сети градостроительной системы

Бюджетный эффект, выраженный в денежном эквиваленте, может служить в качестве критерия при принятии решения о строительстве нового сегмента дорожно-транспортной сети. В данном случае, как и в случае объема экономии времени ΔT_{eff} , необходимо целевым образом задать значение ΔE_{eff} – объем бюджетного эффекта, при достижении которого целесообразно строительство нового сегмента дорожно-транспортной сети. При этом в качестве критерия можно использовать как эффект, испытываемый публичной стороны, $\Delta E_{eff} = \Delta S$, так и суммарный эффект, испытываемый жилищным и общественно-деловым секторами $\Delta E_{eff} = \sum_{k=1}^n \Delta P_k$.

Алгоритм принятия решения о строительстве нового сегмента в данном случае будет аналогичен алгоритму 3. Для каждой дуги-кандидата на включение $\tilde{u}_i$ после ее тестового включения в транспортный граф рассчитывается объем генерируемого в результате этих мероприятий бюджетного эффекта ΔE^i . Таким образом, каждому элементу из множества $\tilde{U} = \{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_r\}$ будут поставлены в соответствия элементы множества $\{\Delta E^1, \Delta E^2, \dots, \Delta E^r\}$.

Далее среди элементов получившегося таким образом множества $\{\Delta E^1, \Delta E^2, \dots, \Delta E^r\}$ находится такое i , при котором значение ΔE^i максимально:

$$i: \Delta E^i = \max\{\Delta E^1, \Delta E^2, \dots, \Delta E^r\}. \quad (46)$$

Это наибольший достижимый бюджетный эффект, возможный при включении одной из дуг в транспортный граф градостроительной системы.

Если

$$\Delta E^i \geq \Delta E_{eff}, \quad (47)$$

то осуществляется окончательное добавление дуги $\tilde{y}_k$ в граф U .

В качестве дальнейшей работы в этом направлении можно рассмотреть также свертку критериев

$$\lambda_1 \Delta T_{eff} + \lambda_2 \Delta E_{eff}, \quad (48)$$

где λ_1 и λ_2 – веса соответствующих критериев.

ГЛАВА 3 ПОЛОЖЕНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В ПРОЦЕССЕ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМ РАЗВИТИЕМ

3.1 Положение эвристической эволюционной модели градостроительной системы в структуре знаний о городе

Разработанная модель является иллюстрацией предложенного в предыдущей главе подхода: это пример того, как в рамках общей теории городского развития последовательно уточняются инструменты моделирования городских процессов до нужного уровня детализации.

В силу принципа своего построения, можно утверждать, что данная модель относится к классу эвристических: она приводит к оптимальному, либо близкому к оптимальному решению.

В фундаменте модели лежит построенная на базе системного подхода в градостроительной деятельности и долгосрочных эмпирических наблюдений за развитием градостроительной системы теория общего городского развития;¹⁵² ранее было показано, что каркасно-тканевая модель удовлетворяет всем критериям «действующей» эвристики. Территориально-коммуникационная модель градостроительной системы – первый этап «уточнения»: она содержит детализацию теории, которой сопутствует многократно апробированный в практической работе инструментарий. На втором этапе «уточнения» происходит разработка операционных инструментов с привлечением элементов теории транспортного планирования (четырёхэтапной транспортной модели и BPR-модели), а также путем адаптации общей концептуальной структуры действующих интегрированных моделей систем землепользования и транспорта.

Кроме того, известно, что используемый в модели метод выбора пропускных способностей сегментов транспортной сети доставляет оптимальные, либо близкие к таковым, решения, так как они были получены методом математического программирования.

Однако даже в случае точных математических формулировок задач и методов решений, они имеют смысл только если параметр времени в действительности является важным

¹⁵² Гутнов А. Э. Системный подход в изучении города: основания и контуры теории городского развития // Системные исследования. Методологические проблемы. М.:Наука, 1985. С. 211–232.

критерием; иными словами, если развитие градостроительной системы происходит в направлении повышения уровня ее коммуникативности, выраженной в формуле «максимум возможностей при минимуме передвижений». В конечном итоге, любое решение, даже обладая формальной строгостью, базируется все на той же главной гипотезе о целевой функции города.

На рисунке 3.1 изображено положение разработанной эвристической эволюционной модели градостроительной системы в пространстве общего знания о городе – как теоретических положений, так и проектных подходов.

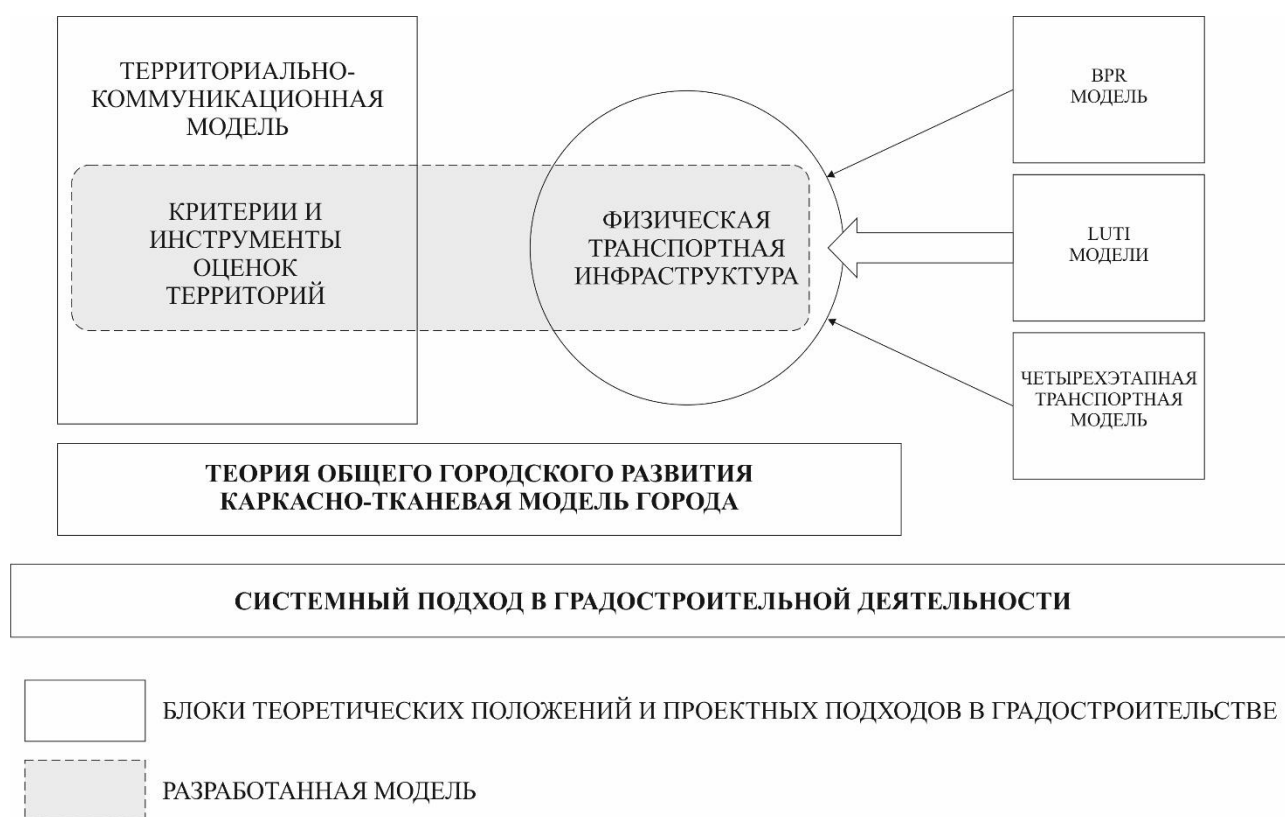


Рисунок 3.1 – Положение эволюционной эвристической модели градостроительной системы в структуре знаний о городе.

3.2 Процесс управления развитием города с применением эволюционной эвристической модели градостроительной системы

В качестве оснований для оценки перспектив внедрения разработанной модели в процесс принятия градостроительных решений, обратимся к следующим положениям:

– положения, сформулированные А.Э. Гутновым относительно направлений повышения эффективности градостроительной деятельности;¹⁵³

– положения, сформулированные А.А. Высоковским относительно внедрения экстраполяционного прогноза в градостроительное проектирование.¹⁵⁴

Принимая во внимание указанные методики градостроительного проектирования и прогнозирования, процесс управления развитием градостроительной системы с учетом эвристической эволюционной модели состоит в выполнении следующих этапов.

1. Предпроектный анализ градостроительной системы.

На этапе анализа существующего положения осуществляется объективная оценка всего предшествующего развития градостроительной системы, включая состояние системы на момент принятия решений о проведении градостроительных преобразований. С учетом особенностей структуры разработанной модели, особое внимание должно быть уделено оценке территориальных элементов градостроительной системы – параметров насыщенности и связности, а также построению транспортной модели системы – в частности, определению спроса на поездки для каждой из территорий. Результатом этого этапа должно быть обобщенное представление о текущем состоянии системы.

2. Имплементация эволюционной эвристической модели градостроительной системы.

Разработанная модель носит нормативно-прогнозный, или прогнозно-целевой характер, то есть сочетает в себе два основных подхода к выработке проектного решения в градостроительной деятельности.

2.1 Формирование программной части проектного решения.

При нормативном проектировании проект градостроительной системы представляется в виде описания будущего, в котором зафиксировано достижение значений ряда заданных параметров – затрат времени на поездки, плотности застройки, обеспеченности жильем и обслуживанием. Цель нормативного проекта – формирование оптимального варианта

¹⁵³ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

¹⁵⁴ Высоковский А.А. Пространственное прогнозирование застройки сложившихся городов. Серия: Гражданское строительство и архитектура. М.: ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1986.

развития градостроительной системы. Само проектирование носит регламентирующую направленность: проект содержит в себе программу по достижению заданных нормативов.

При постановке целей должны быть учтены имеющиеся ресурсы. В данной модели цель сформулирована в терминах гипотезы о повышении коммуникативности города, а в числе ресурсов учитывается бюджет времени, выделены ограничения по средствам городского бюджета и пространственные ресурсы.

2.2. Формирование прогнозной части проектного решения.

Прогноз определяет вероятный результат процесса развития градостроительной системы. Прогнозный проект основывается на аналитическом, исследовательском подходе; он отражает степень уверенности в том, что действия проектировщика окажут необходимое воздействие на естественный процесс эволюционного развития градостроительной системы.

2.3. Преимущества комбинированного подхода.

Комбинированный характер разработанной модели заключается в том, что на основании прогноза развития землепользования, изменения интенсивности использования территорий, вырабатываются нормативы для развития транспортной инфраструктуры и предлагаются методы их достижения; и наоборот – на основании заданного норматива вырабатывается стратегия развития землепользования, подчиняющаяся тенденциям естественного эволюционного развития. Сочетание двух подходов позволяет преодолеть слабые стороны и ограничения каждого подхода в отдельности.

Комбинированный подход обеспечивает достижение максимально эффективного градостроительного решения. Выработка проектного решения таким образом позволяет сбалансировать долгосрочные стратегические проблемы с краткосрочными тактическими задачами, а плановые решения – с естественным ходом развития города.

Хотя существуют исследования, указывающие на «естественный» характер развития транспортных сетей в результате независимых действий ведущих свою экономическую деятельность агентов,¹⁵⁵ представляется, что управление ее развитием должно быть ответственностью публичной стороны. Управление развитием транспортной инфраструктуры следует осуществляться путем целенаправленного финансирования как повышения пропускных способностей отдельных сегментов транспортной сети, так и качественного изменения ее пространственной структуры, или топологии. Стратегический долгосрочный характер планирования транспортной инфраструктуры особенно актуален для российских городов по причинам, изложенным во введении данной работы.

¹⁵⁵ Xie F., Levinson D. *Evolving Transportation Networks*. Springer, 2011. 278 p.

3. Обоснование проектных решений: разработка «генеральной схемы» развития города.

Как было проиллюстрировано на примере принятия решений в области транспортной инфраструктуры, проблема объективного обоснования градостроительных проектных решений – одна из самых актуальных на сегодняшний день.

В настоящее время градостроительное проектирование сопряжено с расчетами и методиками, которые учитывают территориальные, демографические, социальные, экономические, экологические факторы развития градостроительной системы. Однако теория, которая объясняла бы взаимосвязь между социально-экономическими и функционально-пространственными аспектами развития слабо. Поэтому существующие отраслевые расчеты и методики большей частью относительно слабо связаны друг с другом. Как следствие, они неэффективны на стадии выработки принципиальных градостроительных решений. Ключевой этап градостроительного проектирования, определение наиболее эффективной структурно-функциональной организации градостроительной системы во многом опирается на субъективные экспертные суждения.

Общая теория городского развития, в свою очередь, дает возможность обобщенно оценивать текущее состояние системы, а также прогнозировать его изменения в результате реализации некоторых проектных решений. Теоретическая модель предлагает инструменты количественной оценки организации системы; этим обеспечивается конструктивное использование модели в структуре практической деятельности. Тем же свойством обладает и практическая операционная модель, которая построена на фундаменте такой теории, и, следовательно, выдает объективные, теоретически обоснованные, проектные решения.

Таким образом, в качестве ядра обоснования проектного решения может выступать «генеральная схема» развития города, которая опирается на результаты имплементации эвристической эволюционной модели – на прогнозы и программы развития. Иными словами, генеральная схема содержит в себе основные направления долгосрочного функционально-пространственного развития градостроительной системы с учетом поставленных целей и ресурсов. Необходимость создания такого документа, а также его принципиальное содержательное отличие от проекта генерального плана также было обосновано А.Э. Гутновым.¹⁵⁶ В настоящее время разработка генеральной схемы не входит в структуру градостроительной деятельности; однако разработка генеральной схемы на этапе обоснования проекта позволила бы развести принципиальные стратегические положения проекта генерального плана от деталей, связанных с тактическими планами его реализации.

¹⁵⁶ Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

Результат прогноза не может «автоматически» переносится в проект, поскольку не учитывает внешние управляющие воздействия на систему. Поэтому разработка генеральной схемы содержательно должна включать оценку и отбор тех решений, чья реализация ведет к достижению программных целей. Проектное решение вырабатывается путем сближения целенаправленного преобразования и естественного развития, поэтапным сопоставлением, совмещением по срокам и по территориальной локализации.

Так, например, в методике по внедрению экстраполяционного прогноза в градостроительное проектирование предложен следующий вариант.¹⁵⁷ На основании рисунка топологической структуры самых мощных сегментов дорожно-транспортной городской сети, магистральных дорог, строится схема осей планировочного развития градостроительной системы. Далее происходит «совмещение» этой схемы с результатами прогноза, после чего осуществляется подсчет количественных характеристик градостроительных мероприятий (плотностей), которые приходятся на оси (в случае разработанной модели – на узлы дорожно-транспортной сети, т.е. вершины графа). Наиболее целесообразными для размещения застройки являются максимально нагруженные территории.

4. Разработка проекта генерального плана.

5. Разработка программы реализации генерального плана.

Хотя в настоящее время программа реализации генерального плана исключена из перечня обязательных при разработке проектов генеральных планов работ, осталась практика подготовки как минимум программы реализации «первой очереди».

В выделение первой очереди реализации генерального плана прогноз имеет значение главного фактора. В качестве территорий, на которых следует осуществлять первоочередные градостроительные действия, следует выбирать те, на которых проектные решения совпадают с прогнозируемым вариантом.¹⁵⁸ Реализация мероприятий именно на этих территориях будет наиболее эффективна как с точки зрения использования имеющихся ресурсов, так и с точки зрения организации самих мероприятий. В лучшем случае прогнозные показатели застройки могут быть полностью идентичны целевым; тогда не требуется никакого дополнительного регулирования процессом. В том случае, если планируемое решение никаким образом не соотносится с прогнозом, целесообразнее всего не допустить размещение планируемых объектов на территории.

¹⁵⁷ Высоковский А.А. Пространственное прогнозирование застройки сложившихся городов. Серия: Гражданское строительство и архитектура. М.: ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1986.

¹⁵⁸ Там же.

На каждом этапе, последующим за выработкой прогнозно-целевого решения, последующее использование модели может служить для динамичной корректировки проекта в текущем режиме, вследствие необходимости исполнения дополнительных решений, а также наличия либо недостатка ресурсов, не выявленных на этапе предварительного анализа.

Разработанная модель может служить для выработки некоторого эталонного проекта, оптимального с точки зрения целеполагания, учета эволюционной составляющей городского развития и наиболее эффективного использования имеющихся ресурсов. Реальный разработанный проект может оцениваться в сравнении с таким эталонным проектом по всем указанным позициям, и, по мере возможности, путем коррекций приближаться к нему.

Помимо оценки эффективности использования ресурсов, разработанная модель может указать на то, достаточно ли ресурсов, а в случае отрицательного ответа, путем многократной имплементации указать, через какой расчетный период времени градостроительная система будет располагать требуемыми ресурсами.

На рисунке 3.2 приведена графическая схема процесса управления развитием города с применением разработанной эволюционной эвристической модели градостроительной системы.

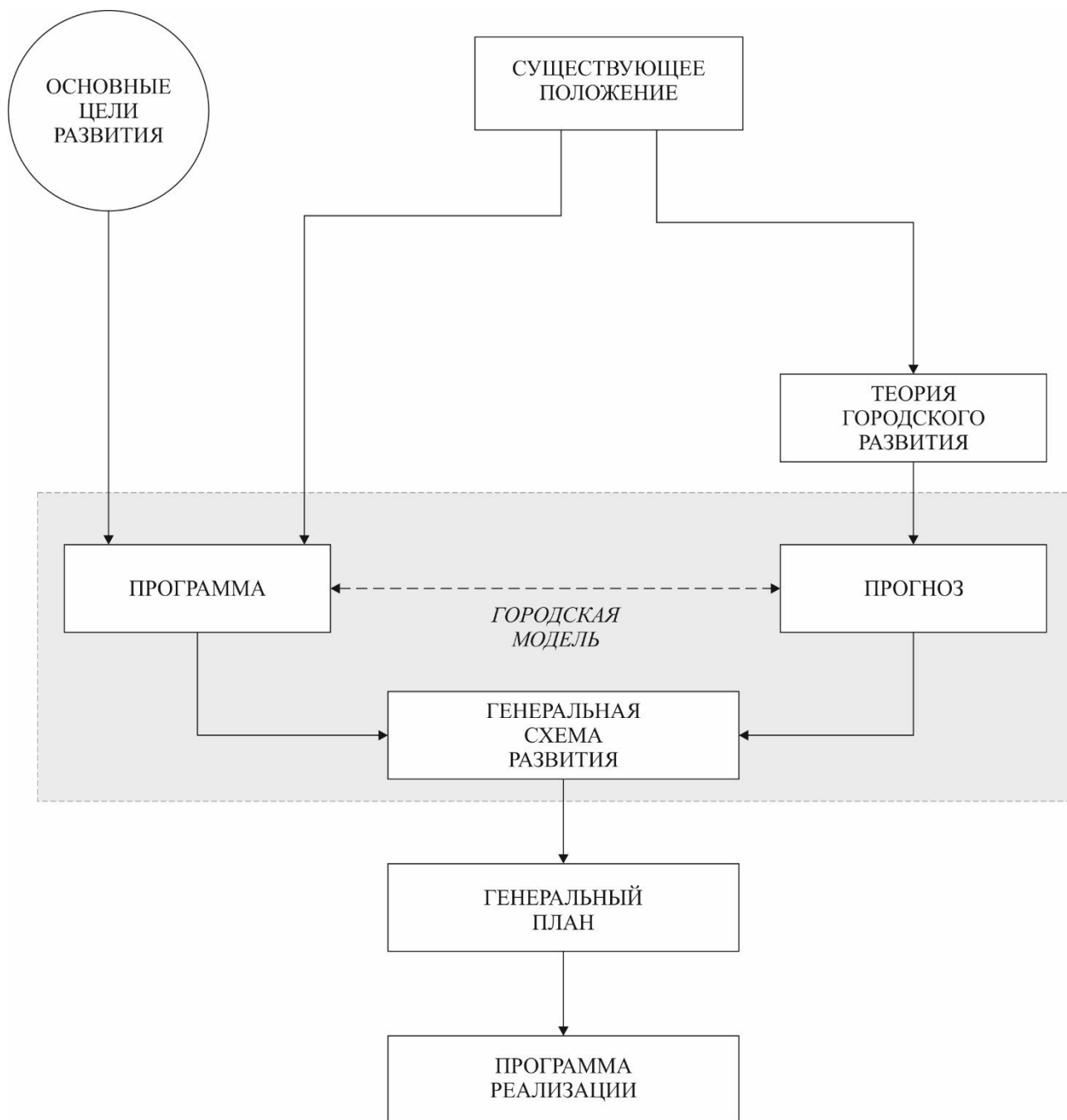


Рисунок 3.2 – Процесс управления развитием города с применением эволюционной эвристической модели градостроительной системы.

3.2 Экспертная оценка модели и перспективные направления ее развития

В качестве апробации модели была проведена экспертная оценка модели практикующими специалистами в области городского моделирования; экспертами выступили: Антон Юрьевич Меньшутин, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Научного центра РАН в Черноголовке; Алексей Эдуардович Воробьев, независимый эксперт по моделированию, в прошлом – разработчик транспортных моделей ГУП «НИиПИ Генплана Москвы»; Владимир Алексеевич Гаврилин, кандидат физико-математических наук, независимый эксперт по моделированию, ранее – заместитель начальника отдела проектного моделирования ГУП «НИиПИ Генплана Москвы».

Модель была оценена как перспективная, однако было отмечено, что она находится на стадии прототипа, содержит основные эвристические принципы и правила принятия решений в области землепользования и транспорта. Этот прототип может послужить базой для последующей практической программной реализации прикладной модели. Таким образом, по результатам экспертной оценки и обсуждений модели был выявлен ряд направлений ее последующего развития, направленных на уточнение применяемых в ней методик и устранение ее недостатков.

1. Модуль землепользования модели, выраженный в созависимости размещения и развития жилищного и общественно-делового фондов, должен быть активно сопряжен с экономическими условиями, помимо пространственно-временных. Иными словами, должны быть учтены экономические факторы, влияющие на принятие решений агентами градостроительной системы.

1.1. Экономический фактор следует учитывать в репрезентации поведения городского населения – выборе мест проживания и мест приложения труда. В частности, территориальные атрибуты градостроительной системы должны включать стоимость арендной платы (для жилищного фонда) и уровень заработной платы (для общественно-делового фонда). Как следствие, эти факторы будут влияют на уровень вакантности всех типов объектов недвижимости. Вместе с этим, следует составить более явные уравнения баланса численности населения и количества мест приложения труда.

1.2. Учет экономических факторов в выборе мест размещения новой застройки может быть выражен через стоимость строительства объекта недвижимости, через стоимость земельного участка, либо размера арендной платы за него.

2. Целесообразно уточнение ряда методик транспортного модуля.

2.1. В четырехэтапной транспортной модели для прогнозирования потоков следует учитывать несколько видов транспорта, поскольку в предложенном описании модели используется допущение об одном виде транспорта.

2.2. Следует описать действия публичной стороны в случае недостатка бюджетных средств для развития дорожно-транспортной сети.

2.3. Следует учитывать влияние новых сегментов дорожно-транспортной сети друг на друга.

2.4. Следует рассмотреть частный случай задачи выбора оптимальных значений пропускных способностей сегментов дорожно-транспортной сети – а именно, приращение пропускных способностей Δc_k относительно существующего положения.

3. Представляется целесообразным расширение деятельности публичной стороны за рамки управления развитием только дорожно-транспортной сети градостроительной системы.

3.1. Следует описать принципы принятия решений публичной стороной в деятельности по застройке территорий и ограничению застройки территорий.

3.2. Принятие решений публичной стороной должно более явным образом учитывать внешние, внеэволюционные факторы, которые неизбежно влияют на развитие градостроительной системы. Наиболее актуальным из таких факторов является включение обширных неразвитых территорий в административные границы города, которые необходимо учитывать как часть градостроительной системы.

3.3. Как следствие предыдущего пункта – необходимы дополнительные механизмы учета территорий, находящихся в границах градостроительной системы, но имеющих крайне малые перспективы развития в силу низких значений насыщенности и связности. Для таких территорий необходимо предусмотреть альтернативные определения градостроительного потенциала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача разработки эвристической эволюционной модели градостроительной системы была сформулирована исходя из проблемы недостаточной обоснованности транспортной политики в области физической реорганизации дорожно-транспортных сетей российских городов. Поскольку город – динамическая развивающаяся система, а ее основные составные части, – системы землепользования и транспорта, – непрерывно влияют друг на друга, разработка проектов для каждой из подсистем в отдельности быстро утрачивает актуальность. Вместе с тем, согласованное в пространстве и синхронизированное во времени планирование этих двух подсистем обеспечивает устойчивость проектных решений в целом.

В процессе обоснования постановки задачи и подхода к ее решению были получены следующие теоретические результаты.

1. Было продемонстрировано, что все динамические структурно-функциональные модели градостроительной системы укладываются в рамки общей теории городского развития, основы которой были сформулированы А.Э. Гутновым. Это справедливо как в отношении «качественных» моделей – неравномерно-районированной и территориально-коммуникационной моделей, каждая из которых по-своему репрезентирует эволюционный процесс городского развития, так и в отношении «количественных» моделей – интегрированных моделей систем городского землепользования и транспорта, в которых эволюционный механизм заложен неявным образом.

2. Было доказано, что все городские модели по существу являются эвристическими, так как удовлетворяют всем основным соответствующим критериям этого класса моделей. Во-первых, они строятся на сильной гипотезе – о повышении уровня коммуникативности в результате естественного процесса развития, или, иначе, эволюции. Во-вторых, пространственно-функциональные городские структуры, удовлетворяющие этой гипотезе, значительно сокращают обширное пространство поиска решения. Наконец, результат градостроительного проектирования всегда до конца не определен, но применение эвристической модели позволяет говорить об определенной степени уверенности в конечном результате.

3. Было показано, что задача проектирования эффективной пространственно-функциональной организации той или иной городской подсистемы следует формулировать как частную задачу проектирования градостроительной системы в целом, чтобы обеспечить преемственность подхода к проектированию; с той же целью был сформулирован подход к разработке прикладной модели как «уточнения» ряда методик

территориально-коммуникационной модели, которая, в свою очередь, базируется на фундаменте каркасно-тканевой модели города.

В процессе разработки обозначенной эволюционной эвристической модели градостроительной системы были получены следующие методические результаты.

1. Был преодолен недостаток моделей обеих («качественной» и «количественной») категорий, а именно – отраслевой подход к транспортному компоненту моделей, выраженный в отсутствии явной репрезентации динамики физических городских дорожно-транспортных сетей.

2. На основе включения явной репрезентации физической транспортной инфраструктуры города была уточнена методика территориально-коммуникационной городской модели в части количественных (численных) расчетов значений показателей территориальных оценок связности.

3. Был разработан прогнозный модуль, учитывающий естественные эволюционные тенденции развития города, реализуемые частной стороной – пространственно-временное движение мест проживания населения (жилищный фонд) и мест приложения труда и обслуживания населения (общественно-деловой фонд) навстречу друг другу, мотивируемое путем повышения транспортной доступности и тех, и других.

4. Был разработан целевой модуль, за реализацию мероприятий по проектным решениям которого ответственна публичная сторона. Модель вырабатывает оптимальные параметры проекта дорожно-транспортной сети (пропускные способности сегментов сети и принятие решения о топологической реорганизации – строительстве нового сегмента) вследствие прогнозируемого изменения интенсивности использования городских территорий.

С практической точки зрения, на основе результатов имплементации модели могут быть разработаны документы, нацеленные на обоснование проектных решений. Иными словами, модель может быть использована в следующих качествах.

1. Применение модели в качестве инструмента территориального и транспортного планирования.

1.1. Разработка генеральной схемы, которая описывает стратегические направления развития города, и которая представляет собой ядро материалов по обоснованию проекта генерального плана.

1.2. Выделение первой очереди реализации генерального плана путем совмещения проекта и прогноза.

2. Применение модели в качестве инструмента независимой объективной оценки качества существующего градостроительного проекта, а также вспомогательного инструмента проектирования.

2.1. Разработка «эталонного» градостроительного проекта, имеющего программно-целевой характер, в соответствие с которым целесообразно приводить действующую градостроительную документацию.

2.2. Оценка текущей эффективности использования ресурсов города – пространственных и финансовых.

Апробация разработанной эвристической эволюционной модели градостроительной системы была проведена путем ее оценки экспертами – практикующими специалистами в области городского и транспортного моделирования. В результате оценки был выделен ряд направлений дальнейшего развития модели. Следующим этапом работы в данной области наиболее перспективным представляется программная реализация представленной модели градостроительной системы, и ее калибровка на реальных эмпирических данных, собранных на материале крупного города.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амосов Н.М. Алгоритмы разума. Киев: Наукова думка, 1979. 224 с.
2. Амосов Н.М. Книга о счастье и несчастьях. М.: Молодая гвардия, 1984. 287 с.
3. Бабий А.В., Каверин А.Р., Шмутьян Б.Л. Принципы организации диалога для формирования стратегии размещения обслуживающих центров в крупнейшем городе // Элементы диалоговой системы анализа и управления развитием города. Сборник трудов. Выпуск 14. М.: ВНИИСИ, 1984. С. 49-57.
4. Баевский О.А. Эволюционный подход к управлению градостроительным развитием крупнейшего города. Московский опыт // Градостроительство России XXI века. Сборник научных статей РААСН. М.: Московские учебники и картолитогрфия, 2001.
5. Баевский О.А. Закономерности непрерывного развития жилой среды крупнейшего города (на примере Москвы) // Экология города и проблемы управления. М., 1989.
6. Белянин А. Удовольствие от пробок: поведенческая экономика о транспортной реформе // Стимулы, парадоксы, провалы: город глазами экономистов. М.: Strelka Press, 2015. С. 136-159.
7. Берж К. Теория графов и её применения. М.: Иностранная литература, 1962. 320 с.
8. Блинкин М.Я. Качество планирования городских транспортных сетей в зеркале классических моделей теории транспортного потока // Городские исследования и практики. 2015. Пилотный выпуск. С. 55–66.
9. Бочаров Ю.П., Кудрявцев О.К. Планировочная структура современного города. М.: Стройиздат, 1972. 160 с.
10. Воробьёв А.Э., Титов А.Ю., Гаврилин В.А., Меньшутин А.Ю., Бахирев И.А. Транспортная модель Московского региона // Вычислительные технологии в естественных науках. Методы суперкомпьютерного моделирования. Сборник трудов. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 49–62.
11. Высоковский А.А. Курс лекций «Теория пространственного развития» // Александр Высоковский в 3 т. Том 3. Public. М.: Grey Matter, 2015. С. 126-315.
12. Высоковский А.А. Правила землепользования и застройки: руководство по разработке. Опыт введения правового зонирования в Кыргызстане. Бишкек: Ега–Басма, 2005. 326 с.
13. Высоковский А.А. Пространственное прогнозирование застройки сложившихся городов. Серия: Гражданское строительство и архитектура. М.: ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1986.
14. Глазычев В.Л. Урбанистика. М.: Европа, 2008. 220 с.
15. Гольц Г. А. Транспорт и расселение. М.: Наука, 1981. 248 с.

16. Госстрой СССР. СНиП II-60-75**. Планировка и застройка городов, поселков и сельских населенных пунктов. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985.
17. Гостев М.В., Хабибуллин Р.Ф. Об оптимальном выборе пропускных способностей каналов транспортных сетей // Системы управления и информационные технологии. 2014. №2.1 (56). С. 120–124.
18. Гостев М.В., Хабибуллин Р.Ф. Об одной задаче оптимального выбора пропускных способностей каналов транспортных сетей // Проблемы теоретической кибернетики: Материалы XVII международной конференции. Казань: Отечество, 2014. С. 69–72.
19. Гутнов А. Э. Системный подход в изучении города: основания и контуры теории городского развития // Системные исследования. Методологические проблемы. М.:Наука, 1985. С. 211–232.
20. Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.
21. Зиммель Г. Большие города и духовная жизнь // Логос. 2002. №3–4. С. 23–34.
22. Котов Е.А., Гончаров Р.В., Новиков А.В., Никогосян К.С., Городничев А.В. Москва: курс на полицентричность. Оценка эффектов градостроительных проектов на полицентрическое развитие Москвы. М.: [б.и.], 2016.
23. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
24. Математические модели внутригородского расселения: франко-советские градостроительные исследования. М.: Стройиздат, 1974.
25. Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1980. 336 с. Перцик Е.Н. Районная планировка. М.: Мысль, 1973. 272 с.
26. Пивоваров Ю.Л. Концентрация функций и тенденции урбанизированного населения // Ресурсы, среда, расселение. М.: Наука, 1974. С. 140-149.
27. Родоман Б.Б. Территориальные ареалы и сети. Очерки теоретической географии. Смоленск: Ойкумена, 1999. 256 с.
28. Сухарев О.С. Бюджетные расходы, эффективность и приоритеты развития экономики // Финансовый журнал. 2015. № 1. С. 17-28.
29. Тархов С.А. Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск–Москва: Универсум, 2005. 384 с.
30. Тимерханов А. В России на тысячу жителей приходится 288 легковых автомобилей // Автостат. 2017. 13 апреля. URL: <https://www.autostat.ru/news/29682/> (дата обращения: 1.05.2017).
31. Трутнев Э.К. Город и право: логика циклического развертывания и свертывания из прошлого в будущее и из настоящего в прошлое институтов правового

- градорегулирования в постсоветской России // Городские исследования и практики. 2015. Пилотный выпуск. С. 13–32.
32. Трутнев Э.К. Деструкция города строительством. К постановке неопознанной проблемы – исследовательской, законотворческой, управленческой // Городские исследования и практики. Т.1. №2. 2016. С. 49–66.
33. Трутнев Э.К., Сафарова М.Д. Градорегулирование в условиях рыночной экономики. М.: Дело, 2011. 368 с.
34. Федеральный закон от 5 апреля 2013 г. N 43-ФЗ «Об особенностях регулирования отдельных правоотношений в связи с присоединением к субъекту Российской Федерации – городу федерального значения Москве территорий и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // СПС КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144623/ (дата обращения: 1.05.2017).
35. Хорев Б.С. Проблемы городов: урбанизация и единая система расселения в СССР. М.: Мысль, 1975. 428 с.
36. Швецов В.И. Алгоритмы распределения транспортных потоков // Автоматика и Телемеханика. 2009. №10. С. 148-157.
37. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и Телемеханика. 2003. №11. С. 3-46.
38. Шелейховский Г.В. Композиция городского плана как проблема транспорта. М.: ГИПРОГОР, 1946. 129 с.
39. Яргина З.Н., Косицкий Я.В., Владимиров В.В., Гутнов А.Э., Микулина Е.М., Сосновский В.А. Основы теории градостроительства. М.: Стройиздат, 1986. 326 с.
40. Acheampong R., Silva E. Land use–transport interaction modeling: A review of the literature and future research directions // The Journal of Transport and Land Use. 2015. Vol. 8. No. 3. P. 1–28.
41. Akcelik R. Travel Time Functions for Transport Planning Purposes: Davidson's Function, its Time Dependent Form and Alternative Travel Time Function // Australian Road Research. 1991. Vol. 21. No. 3. P. 49-59.
42. Alonso W. Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1965.
43. Bates J. History of demand modeling // Handbook of Transport Modeling. Pergamon, 2000. P. 11–33.
44. Batty M. Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models and fractals. Cambridge, MA: MIT Press, 2005.

45. Batty M., Couclesis H., Eichen M. Urban systems as cellular automata // Environment and Planning. 1997. No. 24. P. 159-164.
46. Batty M., Xie Y. From cells to cities // Environment and Planning B. 1994. No. 21. P. 31-48.
47. Blumenfeld H. Criteria for urban form // The Annals of the American Academy of Political and Social Science. 1964. Vol. 352.
48. Branston D. Link Capacity Functions: A Review // Transportation Research. 1976. Vol. 10. No 4. P. 223–236.
49. Bureau of Public Roads. Traffic Assignment Manual. Washington, D.C.: U.S. Bureau of Public Roads, 1964.
50. Burgess E.W. The Growth of the City: An Introduction to a Research Project // Publications of the American Sociologist Society. 1924. Vol. 18. P. 142–155.
51. Cervero R., Kockelman K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 1997. Vol. 2. No. 3. P. 199–219.
52. Chang J. Models of the relationship between transport and land-use: A review // Transport Reviews. 2006. No. 26. P. 325–350.
53. Davidson K.B. A Flow-Travel Time Relationship for Use in Transportation Planning // Proc. 3rd ARRB Conf. 1966. No. 3. P. 183-194.
54. Davidson K.B. The Theoretical Basis of a Flow-Travel Time Relationship for Use in Transportation Planning // Australian Road Research. 1978. No. 8. P. 32-35.
55. Dowling R., Skabardonis A. Improving the Average Travel Speeds Estimated by Planning Models // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1993. No. 1360. P. 68-74.
56. Garrison W.L. Connectivity of the interstate highway system // Regional Science Association, Papers and Proceedings. 1960. Vol. 6. P. 121-137.
57. Geurs K., Wee B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions // Journal of Transport Geography. 2004. No. 12. P. 127-140.
58. Clark C. Population Growth and Land Use. London: Macmillan, 1968.
59. Gottmann J. Megalopolis or the Urbanization of the Northeastern Seaboard // Economic Geography. 1957. Vol. 33. No. 3. P. 189-200.
60. Hansen W. How Accessibility Shapes Land Use // Journal of the American Institute of Planners. 1959. Vol. 25. P. 73-76.
61. Harris C.D., Ullman E.L. The Nature of Cities // The Annals of the American Academy of Political and Social Science. 1945. Vol. 242. P. 7–17.
62. Herbert J., Stevens B. A model for the distribution of residential activity in urban areas // Journal of Regional Science. 1960. No. 2. P. 21–36.

63. Horowitz A.J. Lowry-type land use models // Handbook of transport geography and spatial systems. 2004. P. 167-183.
64. Hoyt H. The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities. Chicago, IL: Chicago University Press, 1939.
65. Iacono M., Levinson D., El-Geneidy A. Models of transportation and land use change: A guide to the territory // Journal of Planning Literature. 2008. No. 22. P. 323–340.
66. Jenks M., Burton E., Williams K. The Compact City: A Sustainable Urban Form? London: E & FN Spon, 1996.
67. Kalaei M.S. Investigating Freeway Speed-Flow Relationships for Traffic Assignment Applications. Dissertations and Theses. Paper 33. Portland State University, 2010.
68. Kansky K.J. Structure of transportation networks: relationship between network geometry and regional characteristics. Chicago University, Research Paper. 1963. 156 p.
69. Koncheva E., Zalesskiy N. Spatial Development of The Largest Russian Cities During The Post-Soviet Period: Orienting Towards Transit or Maintaining Soviet Trends. Basic research program. National research university Higher School of economics, 2016. URL: <https://www.hse.ru/data/2016/07/13/1116450809/04URB2016.pdf> (дата обращения: 1.05.2017)
70. Lee D. Requiem for Large-Scale Models // Journal of the American Institute of Planners. 1973. No. 39. P. 163–178.
71. Lorenz M.R., Elefteriadou L. Defining Freeway Capacity as Function of Breakdown Probability // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2001. Vol. 1776. P. 43-51.
72. Lowry I. A Model of Metropolis. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1964.
73. Lundqvist L. Land-Use and Travel Behaviour. A Survey of Some Analysis and Policy Perspectives // European Journal of Transport and Infrastructure Research. 2003. No. 3. P. 299–313.
74. Marchetti C. Anthropological Invariants in Travel Behavior // Technological Forecasting and Social Change. 1994. Vol. 47. No. 1. P. 75-88.
75. McNally M. The Activity-Based Approach // Handbook of Transport Modeling. Pergamon, 2000. P. 53-70.
76. Miller E. Microsimulation // Transportation systems planning: Methods and applications. 2003.
77. Romanycia M.H.J., Pelletier F.F. What is a heuristic? // Computational Intelligence. 1985. Vol. 1. No. 1. Pp. 47–58.
78. Sheffi Y. Urban transportation networks. Englewood (NJ): Prentice-Hall, 1985. 399 p.

79. Sivakumar A. *Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies*. London: Imperial College, 2007.
80. Skabardonis A., Dowling R. Improved Speed-Flow Relationship for Planning Applications // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1997. No. 1572. P. 18-23.
81. Southworth F. *A Technical Review of Urban Land Use-Transportation Models as Tools for Evaluating Vehicle Travel Reduction Strategies*. Report number ORNL-6881, prepared for the U.S. Department of Energy, 1995.
82. Spiess H. Conical Volume-Delay Functions // *Transportation Science*. 1990. Vol. 24. No. 2. P. 153-158.
83. Silva E., Wu N. Surveying models in urban land studies // *Journal of Planning Literature*. 2012. No. 27. P. 139–152.
84. Stanilov K. Democracy, markets, and public space in the transitional societies of Central and Eastern Europe // *The Post-Socialist City. Urban Form and Space Transformations in Central and Eastern Europe after Socialism*. Springer, 2007. P. 269–284.
85. Tillema F. Calibration of a conceptual LUTI model based on neural networks // *Advanced OR and AI Methods in Transportation*. <http://www.iasi.cnr.it/ewgt/16conference/ID137.pdf> (дата обращения: 1.05.2017).
86. Timmermans H. The saga of integrated land use-transport modeling: How many more dreams before we wake up? // 2003. URL: http://www.ivt.ethz.ch/news/archive/20030810_IATBR/timmermans.pdf (дата обращения: 1.05.2017).
87. Wegener M. Overview of land-use transport models // *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*. 2004. No. 5. P. 127–146.
88. Xie C., Cheu R.L., Lee D.H. Calibration-Free Arterial Link Speed Estimation Model Using Loop Data // *Journal of Transportation Engineering*. 2001. Vol. 127. P. 507-514.
89. Xie F., Levinson D. *Evolving Transportation Networks*. Springer, 2011. 278 p.