

# МАКСИМИЛИАН ГОСТЕВ

## ЭВОЛЮЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ГОРОДСКОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ТРАНСПОРТА:

### РАЗРАБОТКА ЭВРИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**Гостев Максимилиан Вадимович**, магистр градостроительства, Высшая школа урбанистики имени А.А. Высоковского ФГРР НИУ ВШЭ; начальник отдела транспортного планирования МБУ «Институт «Казгражданпроект»; ассистент кафедры географии и картографии Казанского (Приволжского) федерального университета; специалист в области прикладной математики и информатики, Казанский федеральный университет; Российская Федерация, 420012, Казань, ул. Достоевского, 35/10, тел.: +7 (987) 418-88-76

E-mail: mailtogmv@gmail.com

Статья посвящена разработке эвристической модели развития города, или градостроительной системы. Предлагается подход, в рамках которого задача проектирования эффективной пространственно-функциональной организации той или иной градостроительной подсистемы формулируется как частная задача проектирования всей системы в целом, что обеспечивает преимущество подхода и по отношению к проектированию прикладных моделей, и по отношению к развитию теоретических положений. С этой целью разработка эвристической модели города реализуется как уточнение ряда механизмов территориально-коммуникационной модели, которая, в свою очередь, базируется на фундаменте каркасно-тканевой модели А.Э. Гутнова.

Приводится принципиальная схема модели градостроительной системы – ее статическое, динамическое и эволюционное описание. Обсуждается комбинированный, нормативно-прогнозный характер модели, позволяющий сбалансировать долгосрочные стратегические цели с краткосрочными тактическими задачами, а плановые решения – с естественным ходом развития города. Предлагается критерий оценки пространственно-планировочной организации системы. Выделяются и формализуются системы землепользования и транспорта, частные и публичные агенты.

Механизмы модели формулируются в терминах относительно независимых подзадач. Для системы землепользования рассматривается задача оптимального пространственного размещения жилищного и общественно-делового фондов относительно друг друга на основе оценок градостроительного потенциала территории и пространственных диспропорций. Для транспортной сети рассматриваются задачи оптимального выбора пропускных способностей сегментов сети и повышения связности сети. Предлагаются алгоритмы решения каждой из этих подзадач.

Описывается положение разработанной модели в структуре актуальных знаний о городе в контексте системного подхода к градостроительной деятельности. Характеризуется процесс управления развитием города с применением разработанной модели: в качестве примеров разбираются такие этапы, как обоснование проектных решений и подготовка программы реализации генерального плана.

Обоснованные в рамках структуры модели инструменты обладают свойством универсальности, то есть не зависят от конкретной моделируемой территории.

**Ключевые слова:** городские модели; транспортные модели; городские системы; городская динамика; эвристические модели; эволюция города

**Цитирование:** Гостев М.В. (2019) Эволюционное развитие систем городского землепользования и транспорта: разработка эвристической модели // Городские исследования и практики. Т. 4. № 4. С. 70–92. DOI: <https://doi.org/10.17323/usp44201970-92>

## Введение

Практика принятия решений в области физической городской транспортной инфраструктуры в отечественном городском планировании отличается рядом особенностей. Принятие решений в этой области зачастую носит политический характер и потому тактическую, а не стратегическую направленность. К этому аспекту решений относится и практика количественного, а не качественного развития городской транспортной инфраструктуры: отчеты органов власти сообщают о протяженности проложенных и отремонтированных дорог, но не характеризуют их топологическую структуру. Также принятие решений в области транспортной инфраструктуры носит отраслевой характер. Традиционно транспортные модели нацелены на анализ текущей транспортной ситуации или на прогнозирование транспортных потоков при разработке генеральных планов. В случаях, когда результаты прогнозирования транспортных потоков служат для обоснования строительства новых дорог, критерии оптимальности транспортного планирования представляются как более приоритетные, чем критерии оптимальности землепользования. В то же время критическая важность взвешенности таких решений обусловлена законодательством, которое позволяет производить изъятие земельных участков у собственников под линейные объекты и объекты транспортной инфраструктуры. С другой стороны, развитие городских территорий также зачастую происходит без учета уже существующей и будущей транспортной нагрузки, что вопреки увеличению объемов застройки снижает эффективность землепользования в целом. Между тем широко признается, что системы городского землепользования и транспорта неразрывно связаны друг с другом [Wegener, 2004]. Следовательно, для принятия эффективных градостроительных решений их функционирование должно рассматриваться в комплексе, а их взаимное влияние — как непрерывный итеративный процесс; разовое решение в рамках каждой из систем быстро утрачивает актуальность.

Хотя правовая культура в части регулирования городского землепользования путем принятия и актуализации генеральных планов и правил землепользования и застройки утвердилась в практике значительной части российских городов, развитие городской улично-дорожной сети (далее — УДС) остается проблемой, разрешение которой не получило последовательного системного подхода.

Особая актуальность этой проблемы для российских городов обусловлена сложившимися в советский период характеристиками УДС: низкой плотностью, малой долей площади относительно площади всего города, топологической неразвитостью [Белянин, 2015]. Подобная ситуация сложилась как в силу недооценки темпов автомобилизации страны, так и в силу перехода от квартальной застройки к микрорайонной [Глазычев, 2008]. По замечанию Г. Шелейховского, УДС не проектировалась, а «рисовалась» [Шелейховский, 1946]. Советские строительные нормы и правила планировки городов, исходящие из перспективного уровня автомобилизации 180 автомобилей на 1000 жителей [Госстрой СССР, 1985], применяются и сегодня, в то время как фактический уровень автомобилизации на 1 января 2017 года в среднем по стране составил 288 автомобилей на 1000 человек [Тимерханов, 2017]. Хотя сама идея сдерживания роста автомобилизации — преимущественно по примеру азиатских городов — становится все популярнее, о ее внедрении говорить рано: в российских городах не сложились предпосылки для формирования устойчивой транспортной системы. В условиях роста национального дохода, с одной стороны, и разбалансированной системы землепользования, формирующей неизбежное преобладание спроса на продолжительные автомобильные поездки над спросом на поездки на общественном транспорте — с другой, повышение уровня автомобилизации населения неизбежно.

Можно заключить, что в настоящее время в российских городах отсутствует ясная транспортная политика, а мероприятия по развитию УДС недостаточно обоснованы; долгосрочным эффектом такой практики является дальнейшая рассинхронизация развития землепользования и транспорта.

Ответом на заявленную проблему может служить теоретическое обоснование проектов УДС. Нецелесообразно рассматривать транспорт в отрыве от землепользования: необходима общая фундаментальная теория, которая объясняла бы их взаимодействие. Операционная модель, построенная на базе такой теории, могла бы служить инструментом обоснования проектных решений и проведения политики и в области землепользования, и в области транспорта.

## 1. Обзор практики моделирования

Область разработки прикладных моделей, получивших обобщенное название «интегрированные модели землепользования и транспорта», развивается с 1950-х годов [*Acheampong, Silva, 2015*]. Несмотря на значительную эволюцию, которую прошли эти модели в вопросах репрезентации системы землепользования, от гравитационных моделей [*Lowry, 1964*] до клеточных автоматов [*Batty, Xie, 1994*], их транспортный компонент остался преимущественно ограничен стандартной четырехэтапной транспортной моделью [*Chang, 2006*]. Даже в развитых интегрированных моделях фактически принимается во внимание лишь одно из направлений «обратной связи» между двумя системами — влияние существующей транспортной инфраструктуры, выраженное в виде показателей транспортной доступности, на развитие землепользования [*Geurs, Wee, 2004*]. В интегрированных моделях действует все тот же отраслевой принцип, хотя и включенный в итеративный цикл. Такие модели предлагают эмпирические инструменты, основанные на анализе эмпирических данных: связи в таких моделях обусловлены анализом реальных процессов и, следовательно, неизбежно репрезентируют закономерности частных случаев, поскольку не обоснованы универсальными теоретическими положениями.

С другой стороны, появившаяся как результат применения системного подхода к градостроительству в 1980-е годы в СССР [*Гутнов, 1985*] каркасно-тканевая модель города [*Гутнов, 1984*] предложила фундаментальное теоретическое описание функционирования и развития города. Разработанные позднее территориально-коммуникационная модель [*Баевский, 2001*] и неравномерно-районированная модель [*Высоковский, 2005*] также декларируют сложную функционально-пространственную организацию и эволюционный характер развития города. Учет эволюционного характера городского развития 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, 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 позволяла бы явным образом моделировать развитие УДС (и ее топологию, и параметры сегментов) как неотъемлемой части градостроительной системы, еще не решена.

В случае интегрированных моделей систем землепользования и транспорта развитие прикладных операционных моделей шло в направлении усложнения их внутренних структур и диверсификации учитываемых факторов, в то же время отдельные модели были нацелены преимущественно на решение локальных задач. Такой подход лишен универсальности. Оптимальный подход связан с противоположным направлением: строится максимально обобщенная модель, а затем по мере необходимости детализируется. Обобщенная модель при этом является отражением общей теории, которой недостает «количественному» подходу. В отношении предмета моделирования целесообразно использовать понятие «градостроительная система» (далее — ГС). По определению А. Гутнова, ГС — 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» [*Гутнов, 1984, с. 98*]. Термин «градостроительная система» позволяет избавиться от смысловой неоднозначности термина «город», так как включает область функционирования объекта, даже если она не совпадает с формальными административными границами. Также в этом понятии на первый план выведена структурная организация системы, ее внутренние взаимосвязи.

Было продемонстрировано [*Гостев, 2018*], что модели, явным или неявным образом построенные на теории общего городского развития, 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 [*Romanycia, Pelletier, 1985*]. Такие модели используются на практике, поскольку предлагают решения, представляющиеся проектировщикам близкими к оптимальным, в условиях неопределенности результатов и неполноты информации. Схождение решения к оптимальному обусловлено свойствами

эвристического подхода: ядром любой эвристической модели служит некоторая гипотеза, которая обеспечивает определенную степень уверенности в результатах.

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

Хотя, как было отмечено, транспортная составляющая эволюционных городских моделей изначально выражена слабее, особый интерес представляют именно они. Безусловно, область разработки городских моделей (в том числе эвристических) со значимым транспортным компонентом широка<sup>1</sup>. Однако одна из задач статьи, наравне с собственно описанием модели, — проследить (в отношении существующих моделей) и продолжить (в части разрабатываемой модели) преемственность по отношению к определенному подходу путем последовательного разворачивания механизмов, уже заложенных в существующей модели (моделях). Именно поэтому решающее значение имеет не столько контекст предметной области в целом, сколько контекст в виде каркасно-тканевой и территориально-коммуникационной моделей.

## 2. Обоснование подхода к построению новой модели

В данной статье предлагается подход, при котором локальные задачи выделяются как частные, уточненные случаи общей задачи проектирования ГС, а модели, нацеленные на решение этих задач, строятся на фундаменте теории общего городского развития. Это связано с тем, что в динамической развивающейся системе развитие инфраструктуры неотделимо от развития землепользования, и наоборот, задачу развития УДС также целесообразно формулировать в терминах задачи проектирования ГС в целом. Таким образом, задача заключается в построении такой модели, которая:

- отражает эволюционный характер развития ГС;
- предлагает явную репрезентацию УДС;
- рассчитывает оптимальные параметры УДС 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, в процессе решения задачи необходимо балансировать перспективный взаимообусловленный спрос на застройку различного назначения с учетом взаимоналожения изохронов транспортной доступности, причем после каждого крупного градостроительного преобразования системы.

Подход заключается в поэтапном уточнении и формализации отдельных компонентов ГС и механизмов взаимодействия между ними. Территориально-коммуникационная модель является первым этапом в уточнении и операционализации эволюционной модели; она включает в себя многократно апробированный на практике инструментарий.

Территориально-коммуникационная модель ГС, разработанная в Институте Генплана Москвы, развивает идеи А. Гутнова применительно к современным экономическим условиям [Баевский, 1989; 2001]. В названии модели отражена структура системы: ее элементы, территории, связаны в единую систему комплексом транспортно-коммуникационных связей — корреспонденций. Объекты, размещенные в границах территориальных элементов системы, могут быть как источниками корреспонденций, так и их целями.

<sup>1</sup> Помимо приведенных ранее источников по «интегрированным моделям», см., напр.: [Ding, Ujang et al. 2017; Gallo, D'Acerno, Montella, 2010; Kozlov, Buslaev, 2012; Manley, Orr, Cheng, 2015; Navarro-Ligero, Soria-Lara, Valenzuela-Montes, 2019; Suwansirikul, Friesz, Tobin, 1987; Switzer, Bertolini, Grin, 2013]. В этих работах осуществляются постановки и решения задач оптимизации транспортных сетей, в том числе с применением эвристического подхода.

Модель основана на гипотезе, согласно которой «целевая функция» города заключается в расширении пространственно-временной доступности выбора. Выбор, который предоставляет каждая территория, — количество и разнообразие возможных взаимодействий между объектами и их потребителями, которые находятся на территории и в пределах времени ее комфортной доступности. Объем выбора зависит от двух базовых факторов. Первый — насыщенность территории населением или объектами тяготения населения, целями корреспонденций — является индикатором ее привлекательности. Второй — обширность транспортных связей территории с другими, ее транспортная доступность. Индикаторами доступности являются значения связности территории с населением и с местами приложения труда и обслуживания. Выбор, который предоставляет каждая территория, тем больше, чем выше значения этих показателей. Объем выбора определяет эффективность организации территории.

Взаимосвязь насыщенности и связности подчиняется механизмам самоорганизации, свойственным сложным системам. 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 прочие значения. Одновременное изменение значений показателей возможно в результате проведения масштабных проектов, однако естественный процесс эволюционного развития реализуется путем действий большого количества городских агентов. Он имеет дискретный характер и представляет собой последовательное движение навстречу максимально эффективной форме градостроительной организации территории. Таким образом, в ГС имеет место эволюционная тенденция к обеспечению сбалансированных значений характеристик насыщенности и связности, с одной стороны, и к совместному повышению их абсолютных значений — с другой. В схематическом виде эволюционная схема развития приведена на *рис. 3*.

Из всех упомянутых ранее моделей ГС 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.

При этом решение подзадачи оптимизации УДС в заданном контексте также будет обеспечивать выполнение принципов безопасности и сохранения идентичности. Безопасность будет обеспечиваться за счет «выравнивания» транспортной доступности территорий с учетом существующего и перспективного спроса на перемещения со стороны системы землепользования, а также за счет определения оптимальных параметров пропускной способности сегментов сети. В свою очередь ценностная составляющая генерируемых моделью решений обусловлена тем, что допустимые трассировки сегментов УДС определяются в качестве исходных данных модели заранее, с учетом сложившейся структуры землепользования, в которой отражены вопросы сохранения сложившейся жилой среды и локальной идентичности, а также вопросов наследия.

### 3. Принципиальная схема модели ГС

Согласно исследовательской программе построения общей теории городского развития А. Гутнова, изучение ГС включает три основные задачи: статическое описание системы, динамическое описание системы и описание эволюционного развития системы [Гутнов, 1984]. Так как предлагаемая в статье модель базируется на основных положениях этой программы и положениях производной от нее территориально-коммуникационной модели ГС, целесообразно описывать проектируемую модель в тех же категориях.

#### 3.1. Статическое описание модели ГС

Статическое описание приводится в терминах территориально-коммуникационной модели и теории графов [Оре, 1980], поскольку задача сформулирована так, что решения в части УДС должны проявляться явным образом; применение теории графов в транспортном планировании имеет давнюю историю [Берж, 1962; Тархов, 2005].

Модель ГС представляется в виде ориентированного графа  $G = (V, U)$ , где множеству вершин графа  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  соответствует множество территориальных элементов, а множеству дуг  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$  — множество коммуникационных элементов. Каждая дуга  $u_i = (v_k, v_l) \in U$  представляет сегмент УДС из узла  $v_k$  в узел  $v_l$ ,  $k, l \leq n$ ,  $k \neq l$ .

Территориальные элементы служат для размещения жилищного и общественно-делового фонда; их масштабы могут варьироваться в зависимости от задачи и могут представлять земельный участок, квартал, микрорайон, планировочный район, функциональную зону. Каждый элемент  $v_i \in V$ ,  $i = \overline{1, n}$ , имеет атрибуты, выражаемые в квадратных метрах:

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

Атрибуты близки понятию «технико-экономические показатели», которые используются при разработке проектов планировки территорий и генеральных планов поселений.

Коммуникационные элементы представляют собой автомобильные дороги, которые составляют единую городскую УДС. Каждый элемент  $u_k \in U$ ,  $k = \overline{1, m}$ , имеет атрибуты:

- $c_k$ , пропускная способность сегмента УДС;
- $f_k$ , интенсивность транспортного потока, движущегося по сегменту УДС;
- $t_k$ , продолжительность поездки по сегменту УДС;
- $t_{0k}$ , продолжительность поездки по сегменту УДС без задержек, «в свободном потоке»;
- $s_k$ , стоимость строительства сегмента УДС.

Принимаются следующие допущения относительно коммуникационных элементов.

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

$$s_k = a_k c_k + b_k,$$

где  $a_k > 0$  и  $b_k \geq 0$  — коэффициенты стоимости,  $k = \overline{1, m}$ .

2. Продолжительность поездки по сегменту УДС зависит от его пропускной способности и интенсивности транспортного потока. Модели, построенные по такому принципу, относятся к классу BPR-моделей [Bureau of Public Roads, 1964]. В соответствии со стандартной BPR-моделью продолжительность поездки по сегменту сети  $u_k \in U$  выражается как

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

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

BPR-модель относится к классу статических транспортных макромоделей; транспортный поток описывается упрощенно: на каждом сегменте УДС используется одна его макроскопическая характеристика — интенсивность. Макромодели предназначены для моделирования транспортной ситуации на крупномасштабных транспортных сетях городов, регионов, стран [Воробьев и др., 2015]. Их прогнозы доставляют средние значения продолжительностей поездок, которые применяются для долгосрочного планирования, а не управления транспортными потоками в реальном времени; в последнем случае применяется теория микромоделирования потоков [Блинкин, 2015; Швецов, 2003].

BPR-модель использовалась в Институте Генплана Москвы при разработке транспортной модели Москвы, Московской области, Казани и ряда других городов [Воробьев и др., 2015].

Параметр  $\alpha$  определяет отношение времени пути в свободном потоке к времени пути по дороге с ненулевым потоком; параметр  $\beta$  определяет, насколько быстро возрастает продолжительность поездки при увеличении потока. Традиционно применяются значения параметров  $\alpha = 0,5$  и  $\beta = 4$ , полученные эмпирическим способом [Dowling, Skabardonis, 1993].

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

Определенная в 1990-х годах как «антропологический инвариант транспортного поведения», она заключается в том, что горожане в среднем тратят 60–90 минут на поездки до мест приложения труда и обратно [Marchetti, 1994]. Аналогичная величина, «константа пространственной самоорганизации населения», была введена в 1970-х годах Г. Гольцем и определена как 30–40 минут в один конец [Гольц, 1981].

При определении  $t_{\max}$  следует исходить из приведенных инвариантов, с поправкой на особенности моделируемой ГС.

В случае территориальных элементов горожане репрезентируются объемами занятых площадей; в случае коммуникационных элементов — транспортными потоками. Значения атрибутов взаимопереводимы на основании значений обеспеченности людей жилыми и рабочими площадями,  $\text{norm}^H$  и  $\text{norm}^I$  соответственно. Если жилищный фонд территории  $v_i \in V$  генерирует транспортный поток  $f_k$ , то связь между объемом потока и занятыми жилыми площадями должна удовлетворять выражению

$$W_i^H = f_k \text{norm}^H.$$

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

$$W_i^I = f_k \text{norm}^I.$$

Статическое описание модели ГС в графическом виде приведено на рис. 1.

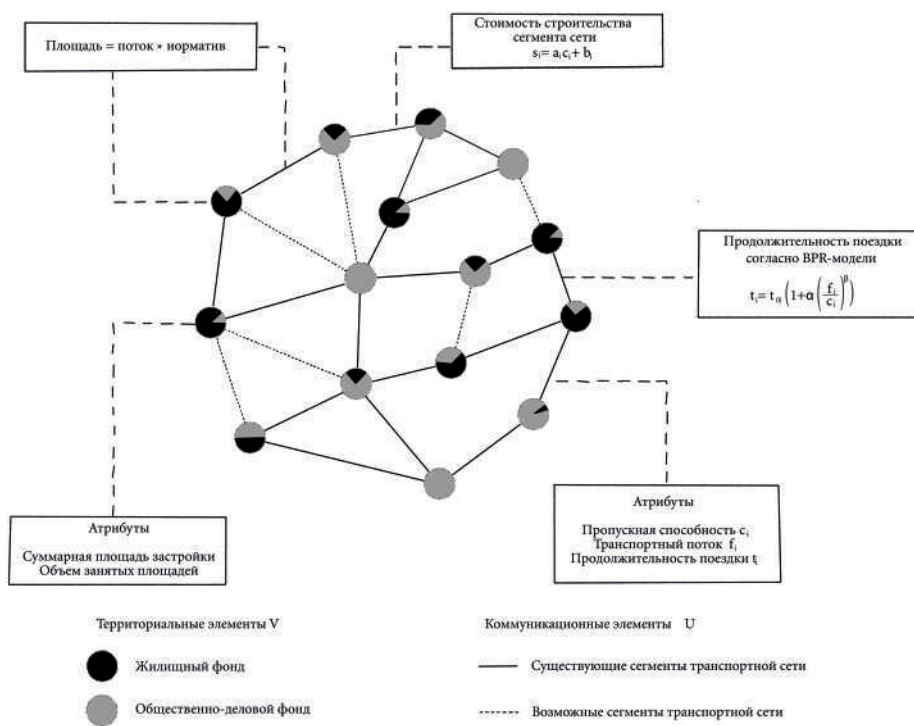


Рис. 1. Статическое описание модели ГС

Источник: схема составлена автором.

### 3.2. Динамическое описание ГС

Динамическое состояние обеспечивается за счет целенаправленных действий городских агентов, которые разворачиваются во времени.

1. Цель органов публичной власти — выровнять транспортную обеспеченность для всех территорий ГС за счет преобразований УДС, выполнив ограничения бюджета. 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, изменению показателей доступности всех территорий.

Нормативная задача публичной стороны — минимизировать суммарную продолжительность поездок по всей УДС.

Поскольку определение ГС не ограничивает ее пределами административных границ, под публичной стороной понимаются органы власти любого возможного масштаба.

2. Цель агентов жилищного сектора (жителей и застройщиков) — разместить жилье ближе к местам приложения труда и обслуживания путем занятия вакантных площадей существующей застройки и строительства нового жилищного фонда.

3. Цель агентов общественно-делового сектора (предприятий, предоставляющих рабочие места и места обслуживания населения, и застройщиков) — разместить места приложения труда и обслуживания населения ближе к жилью путем занятия вакантных площадей существующей застройки и строительства нового общественно-делового фонда.

«Ближе» интерпретируется в смысле затрачиваемого на поездки времени.

В реальности действия всех городских агентов разворачиваются во времени непрерывно и одновременно; в модели считается, что городские агенты поочередно осуществляют дискретные действия, зацикленные во времени.

Динамическое описание модели ГС в графическом виде приведено на рис. 2.



Рис.2. Динамическое описание модели ГС

Источник: схема составлена автором.

### 3.3. Описание эволюционного развития ГС

Эволюционное развитие ГС обеспечивается инструментами, посредством которых городские агенты осуществляют свои действия и направленности этих действий.

Механизм эволюционного развития ГС заложен в территориально-коммуникационной модели. Действия агентов жилищного и общественно-делового секторов направлены на устранение территориальных диспропорций с точки зрения критерия привлекательности территорий: они используют градостроительный потенциал территории, большие значения ее транспортной доступности, повышая насыщенность. Агенты публичной стороны, развивая УДС, устраняют диспропорции с точки зрения связности территорий. Эффективность таких решений способствует естественному ходу развития города, поэтому поведение агентов можно охарактеризовать как рациональное.

Такой принцип укладывается в актуальную концепцию «компактного города» [Jenks, Burton, Williams, 1996]; для развития используются внутренние пространственные резервы: увеличиваются плотность застройки и УДС, ее доля от территории города.



«Направленность» исправлений диспропорций в графическом виде приведена на *рис. 3*. Описания действий агентов как решения подзадач будут приведены далее.

Физические резервы и внешние нормативные ограничения закладываются в модель следующим образом:

- для территориальных элементов: пространственные резервы территорий,  $L_i, i = \overline{1, n}$ ;
- для коммуникационных элементов: граф возможных соединений  $\bar{U} = \{\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_{m+r}\}$ ,  $\bar{U} = U \cup \bar{U}$ , где  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$  — множество существующих сегментов, а  $\bar{U} = \{\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_r\}$  — множество дуг, у которых пропускная способность равна нулю, но существует возможность строительства соответствующего сегмента; через предельные значения пропускных способностей всех возможных дуг  $\bar{c} = (\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_{m+r})$ .



**Рис. 3.** Описание эволюционного развития ГС

Источник: схема составлена автором.

### 3.4. Нормативно-прогнозный характер эволюционной эвристической модели

Модель, действующая в соответствии с описанными принципами, носит нормативно-прогнозный характер, то есть сочетает два подхода к выработке градостроительного решения.

При нормативном проектировании проект ГС представляется как описание будущего, в котором зафиксированы значения ряда параметров: затрат времени на поездки, плотности застройки, обеспеченности жильем и пр. Цель нормативного проекта — формирование оптимального варианта развития ГС с учетом имеющихся ресурсов. В данной модели цель сформулирована в терминах гипотезы о повышении коммуникативности города, а в числе ресурсов учитывается бюджет времени, средства городского бюджета и пространственные ресурсы.

Прогнозный проект ГС основывается на аналитико-исследовательском подходе и отражает степень уверенности в том, что действия проектировщика окажут необходимое воздействие на процесс эволюционного развития ГС.

Комбинированный характер модели заключается в том, что на основании прогноза изменения интенсивности землепользования вырабатываются нормативы для развития УДС и предлагаются методы их достижения; и наоборот, на основании заданного норматива вырабатывается стратегия развития землепользования, подчиняющаяся тенденциям эволюционного развития. Сочетание двух подходов позволяет преодолеть слабые стороны и ограничения каждого подхода в отдельности, сбалансировать долгосрочные стратегические цели с краткосрочными тактическими задачами, а плановые решения — с естественным ходом развития города.

#### 4. Публичная сторона: развитие УДС ГС

##### 4.1. Критерий оценки пространственно-планировочной организации ГС

Модель строится в условиях гипотезы о городе как «системе, сокращающей расстояния», что в современных условиях 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. Учет времени делает город соразмерным масштабу ежедневной человеческой жизнедеятельности. Задача проектирования эффективной организации ГС решается не только в пространстве, но и во времени [Гутнов, 1984].

Следовательно, показатель суммарной продолжительности поездок — не просто характеристика городского транспорта, а обобщающая комплексная оценка всей пространственно-планировочной организации ГС [Бочаров, Кудрявцев, 1972].

##### 4.2. Прогнозирование транспортных потоков

На некоторых этапах принятия решений необходим прогноз нагрузки на УДС — интенсивности транспортных потоков на всех сегментах сети при имеющейся структуре землепользования. Наиболее подходящий для решения этой задачи инструмент — классическая четырехэтапная транспортная модель [Воробьев и др., 2015; Bates, 2000; Швецов, 2003; 2009], которая на основании входных данных — жилых площадей  $W_k^j$  и мест приложения труда и обслуживания населения  $W_k^l$ ,  $k = \overline{1, n}$  — выдает значения интенсивностей транспортных потоков  $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$  для каждого сегмента сети  $u_i \in U$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Далее подразумевается, что прогнозы транспортных потоков рассчитываются в соответствии с указанной моделью<sup>2,3</sup>.

##### 4.3. Задача выбора пропускных способностей коммуникационных элементов

Продолжительность поездки по сегменту УДС зависит от его загруженности, максимальная загруженность определяется пропускной способностью. Следовательно, минимальная продолжительность поездки напрямую зависит от пропускных способностей сегментов УДС.

В данной модели приводится решение макроуровня — принципиальные решения, методы определения оптимальных значений пропускных способностей. Решения микроуровня, технические решения (обеспечение пропускных способностей путем установления параметров протяженности сегмента сети, количества полос, размещения светофоров, дорожных знаков и пр.) находятся за пределами рассматриваемой задачи.

Содержательно задача развития УДС состоит из двух подзадач:

– выбор пропускных способностей отдельных сегментов существующей УДС;

- 2 Четырехэтапная транспортная модель традиционно состоит из последовательного выполнения следующих этапов: генерация поездок — распределение поездок — расщепление поездок по видам транспорта — наложение транспортных потоков на сеть (распределение корреспонденций по маршрутам). На третьем этапе для каждой пары территорий отправления и прибытия определяется вероятность использования того или иного вида транспорта для осуществления поездки (личного автомобиля, такси, общественного транспорта и т.д.). Однако в представленной в настоящей статье модели принято допущение об одном виде используемого транспорта — личном автомобиле. Следовательно, на текущем уровне детализации предлагаемой модели третий этап транспортной модели можно опустить. Решение «полной» версии задачи прогнозирования транспортных потоков будет заключаться в суммировании результатов четвертого этапа по отдельным видам транспорта для каждого элемента сети. Аналогичным образом могут быть учтены и грузовые перевозки, с тем исключением, что для них также предварительно производятся и самостоятельные вычисления на всех этапах.
- 3 Поскольку для определения времени поездки используется BPR-модель, особую роль приобретает расчет значений  $t = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  для пиковых нагрузок на УДС, то есть максимальных значений  $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$  (что чаще всего имплицитно подразумевается при решении аналогичных транспортных задач и построении операционных транспортных моделей): учет максимальных значений транспортных потоков даст более экстремальную картину с точки зрения взаимной временной доступности городских объектов различного функционала. При этом структурно алгоритмы разрабатываемой модели никаких изменений не претерпят. Таким образом, для учета указанного фактора, на первом этапе в четырехэтапной модели определяется не среднесуточная генерация поездок, то есть содержательно, матрица корреспонденций, а матрица, соответствующая часу пик — утреннему (чаще) или вечернему.

– принятие решений о строительстве нового сегмента.

Определение пропускной способности сегмента УДС является предметом давних обсуждений [Kalae, 2010]; наиболее универсальное для макро моделирования определение описывает пропускную способность сегмента как «предел» его «транспортонесущей (vehicle-carrying) возможности» [Lorenz, Elefteriadou, 2001].

Рассмотрим задачу выбора пропускных способностей коммуникационных элементов ГС  $G = (V, U)$  в следующей постановке.

Считаем, что публичная сторона располагает бюджетом в объеме  $S$ . Суммарная продолжительность поездок по всей УДС при прогнозируемых потоках  $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$  выражается как

$$T = \sum_{k=1}^m [t'_{ok} (1 + \alpha (\frac{f_k}{c_k})^\beta) + t''_{ok} (1 + \alpha (\frac{f_k}{c_k})^\beta)],$$

где  $f'_k$  и  $f''_k$  – потоки, проходящие по дугам ребра  $u_k \in U$  в противоположных направлениях,  $t'_{ok}$  и  $t''_{ok}$  – продолжительности поездок в свободном потоке по соответствующим дугам,  $k = \overline{1, m}$ . Как было показано,  $T$  – оптимальный критерий оценки эффективности организации пространственно-планировочной структуры ГС.

Для транспортных сетей типичен случай несимметричных потоков, а пропускные способности дуг в двух направлениях, составляющих ребро, как правило, одинаковы. Задача оптимального выбора пропускных способностей дуг графа транспортной сети с условием равенства их значений для разнонаправленных дуг одного ребра заключается в следующем.

Необходимо определить такие значения пропускных способностей  $c = (c_1, c_2, \dots, c_m)$  сегментов УДС, что суммарная продолжительность поездок по ним минимальна, а их суммарная стоимость не превышает заданной величины, то есть которые минимизируют функцию  $T$  и удовлетворяют ограничениям

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

$$c_k > \bar{f}_k, k = \overline{1, m}.$$

Для этой задачи существует точное и единственное численное решение, которое обладает некоторой трудоемкостью. Также было получено приближенное решение в аналитическом виде, которое обладает малой погрешностью и применение которого позволит сократить время имплементации модели. Таким образом, решение поставленной задачи заключается в следующем [Гостев, Хабибуллин, 2014а; Гостев, Хабибуллин, 2014б].

1. Для каждого сегмента УДС определяется максимальный из двух противоположно направленных транспортных потоков:

$$\bar{f}_k = \max \{f'_k, f''_k\}, k = \overline{1, m}$$

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

2. Вычисляется

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

минимальная сумма бюджетных средств, которая необходима, чтобы обеспечить пропускные способности всех сегментов дорожно-транспортной сети при прогнозируемой нагрузке.

3. Вычисляется

$$\Delta S = S - S_0.$$

Если публичная сторона располагает средствами  $S > S_0$ , то задача заключается в оптимальном распределении средств  $\Delta S$  между всеми коммуникационными элементами при прогнозируемой нагрузке.

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

$$f_k = \bar{f}_k = \max \{f'_k, f''_k\}; \quad (1)$$

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

$$f_k = \sqrt{(f'_k f''_k)}, \text{ если } \min \{f'_k, f''_k\} > 0. \quad (3)$$

5. Оптимальная пропускная способность каждого сегмента сети  $u_i \in U, i = \overline{1, m}$  рассчитывается как

$$c_k = \frac{\Delta S + \sum_{k=1}^m a_k f_k}{\sum_{k=1}^m a_k} \beta^{+1} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m a_k f_k^\beta t_{0k}}{\sum_{k=1}^m a_k f_k^\beta t_{0k}}}. \quad (4)$$

Если в формуле (4) при  $S > S_0$  в качестве  $f_k, k = \overline{1, m}$  взять выражение (1), (2) или (3), 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  $S = \sum_{k=1}^m (a_k c_k + b_k)$ , и такие значения  $c = (c_1, \dots, c_m)$  являются допустимыми решениями задачи.

Для оценки относительных погрешностей приближенных решений, получаемых по формуле (4) с использованием выражений (1), (2) и (3) 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 (2) или (3) вместо трудоемкого численного решения задачи [Гостев, Хабибуллин, 2014а; Гостев, Хабибуллин, 2014б].

Модель позволяет осуществлять поиск решения не для всех элементов УДС, а для некоторого подмножества. При принятии окончательного решения о выборе пропускных способностей сегментов УДС необходимо принимать во внимание предварительно определенные предельные значения пропускных способностей всех возможных дуг транспортного графа.

#### 4.4. Принятие решения о строительстве нового сегмента УДС ГС

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 не представлен в явном виде; изменения топологии УДС не репрезентируются ни в каком случае. Для учета топологической конфигурации транспортной сети сформулируем задачу для ГС  $G = (V, \bar{U})^4$  следующим образом.

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

Считаем, что известны прогнозируемые транспортные потоки  $f = (f_1, f_2, \dots, f_m)$ , а также соответствующие значения продолжительностей поездок  $t = (t_1, t_2, \dots, t_m)$  для каждой дуги.

Поскольку строительство нового сегмента УДС имеет долгосрочный эффект, принятие решения должно быть обосновано с точки зрения целесообразности и эффективности. Так как главным критерием оценки эффективности организации УДС является суммарная продолжительность поездок, новый сегмент должен настолько сокращать значение этого критерия, что затраты на его строительство будут целесообразны и с точки зрения финансирования, и с точки зрения использования пространственных резервов.

Пусть  $\Delta T_{\text{eff}}$  — экономия времени, которая отвечает таким требованиям; поскольку принятие решений публичной стороной представляет целевую сторону программно-прогнозной модели, значение  $\Delta T_{\text{eff}}$  задается нормативным образом.

4 Множество  $\bar{U}$  определено в соответствии с параграфом «3.3. Описание эволюционного развития ГС» настоящей статьи.

Алгоритм принятия решения о строительстве нового сегмента сети будет иметь следующий вид.

1. Вычисляется суммарная продолжительность поездок по всем существующим сегментам УДС при прогнозируемых потоках:

$$T^0 = \sum_{k=1}^m t_k.$$

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  $f = (f_1, f_2, \dots, f_{m+1})$ .

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

2.4. Вычисляется суммарная продолжительность поездок по всей новой УДС с учетом «временно» включенной дуги  $\tilde{u}_i$

$$T^i = \sum_{k=1}^{m+1} t_k.$$

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

$$\Delta T^i = T^0 - T^i.$$

3. Каждой дуге-кандидату на включение  $\tilde{u}_i \in \tilde{U}$ ,  $i = \overline{1, r}$  ставится в соответствие значение времени  $\Delta T^i$ , которое будет сэкономлено в случае включения дуги в граф. В множестве  $\{\Delta T^1, \Delta T^2, \dots, \Delta T^r\}$  находим  $i$ , при котором разница между суммарной продолжительностью поездок до включения дуги  $\tilde{u}_i \in \tilde{U}$  и после максимальна:

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

Экономия времени  $\Delta T^i$  — наибольший эффект, возможный при включении одной из возможных дуг в транспортный граф.

4. Если

$$\Delta T^i \geq \Delta T_{\text{eff}}$$

то происходит окончательное включение дуги  $\tilde{u}_i$  в граф  $U$ :  $\tilde{u}_i \in U$ ,  $\tilde{u}_i \notin \tilde{U}$ . Затем проводится процедура выбора пропускных способностей сегментов УДС.

## 5. Жилищный сектор

### 5.1. Оценка градостроительного потенциала территории

На первом этапе действий агентов жилищного сектора осуществляется оценка градостроительного потенциала территории, который определяется как суммарная численность мест приложения труда и обслуживания населения на территориях, попадающих в изохрону времени комфортной доступности рассматриваемой территории. Потенциал территории характеризует транспортную доступность для бизнеса и управления «рабочих рук» и пользователей объектов как меру экономической привлекательности территории для размещения и развития соответствующих объектов. Чем выше градостроительный потенциал территории, тем она социально привлекательнее для проживания и выгоднее для размещения нового жилищного фонда [Баевский, 1989].

Рассмотрим задачу оценки градостроительного потенциала жилых территорий ГС  $G = (V, U)$  в следующей формулировке.

Для каждого сегмента  $u_i \in U$ ,  $i = \overline{1, m}$  заданы значения его пропускной способности  $c_i$  и интенсивности транспортного потока  $f_i$ .

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

Объекты обслуживания и места приложения труда имеют транспортные связи не с одной жилой территорией, а с несколькими; градостроительный потенциал территории рассчитывается как доля связности с местами приложения труда, находящимися в изохроне комфортной транспортной доступности рассматриваемой территории, которая приходится непосредственно на жилые площади этой территории.

В первую очередь определяется количество всех рабочих мест, находящихся в пределах изохрона времени комфортной доступности от рассматриваемой территории следующим образом.

1. Для каждого сегмента УДС  $u_i \in U$ ,  $i = \overline{1, m}$  рассчитывается продолжительность поездки  $t_i$ .

2. Для каждого территориального элемента  $v_k \in V$ , такого что  $D_k^l \neq 0$ , осуществляется следующая последовательность действий,  $k = \overline{1, n}$ .

2.1. С помощью алгоритма поиска кратчайших путей в графе [Кристофидес, 1978] определяются кратчайшие пути от 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  $t_i$ . Так каждой вершине  $v_l \in V$ ,  $l = \overline{1, n - 1}$  ставится в соответствие продолжительность поездки  $t^l$  до нее от вершины  $v_k \in V$ .

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

2.3. Суммируются площади свободных рабочих мест на рассматриваемой территории и в пределах ее изохрона времени комфортной доступности:

$$W_k^{\text{total}} = D_k^l - W_k^l + \sum_{l=1}^q (D_l^l - W_l^l); v_l \in V^q.$$

Рабочие места, приведенные к количеству человек, выражаются как  $W_k^{\text{total}} / \text{norm}^l$ .

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

$$N_k^H = W_k^H + \sum_{l=1}^q W_l^H; v_l \in V^q.$$

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

1. Обеспеченность  $q_i$  территории  $v_i \in V$  объектами обслуживания вычисляется согласно [Бабий, Каверин, Шмульян, 1984] как

$$q_i = \sum_k \left( \frac{W_k^l}{N_k^H} \right); v_k \in V^q.$$

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 согласно [Бабий, Каверин, Шмульян, 1984] как

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

3. Доля  $\gamma_i$  связности с местами приложения труда, которая приходится на территорию  $v_i \in V$ , вычисляется как

$$\gamma_i = \frac{W_i^H}{\text{norm}^H} M_i.$$

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

$$W_i^q = \gamma_i \frac{W_i^H / \text{norm}^H}{W_i^{\text{empl}}},$$

где  $W_i^{\text{empl}}$  — количество трудоспособных людей, проживающих на рассматриваемой территории.

## 5.2. Оценка диспропорции и принятие решения

Для решения о последующем развитии территории  $v_i \in V$  оцениваются диспропорции значений ее насыщенности и связности,  $i = \overline{1, n}$ .

В качестве насыщенности территории принимается площадь занятых жилых помещений в составе жилищного фонда территории, выраженная в количестве проживающих людей  $W_i^H / \text{norm}^H$ . 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.

При оценке также необходимо учитывать физические резервы развития территории  $D_i$ .

Итак, если

$$\frac{W_i^H}{\text{norm}^H} < W_i^q,$$

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

$$\Delta W = W_i^q \text{norm}^H - W_i^H.$$

Если

$$D < W_i^q,$$

то также целесообразно дальнейшее жилищное строительство на территории.

Если

$$\frac{W_i^H}{\text{norm}^H} > W_i^q,$$

то ресурсы жилой территории исчерпаны. Необходимо развивать места приложения труда и обслуживания населения на территориях в пределах комфортной транспортной доступности.

Особенностью расчета территориальных диспропорций и отличием от инструментария территориально-коммуникационной модели является то, что в данном случае оценки диспропорций не относительные матрично-оценочные, а выражены в абсолютном, количественном виде.

## 6. Общественно-деловой сектор

Действия агентов общественно-делового сектора в целом аналогичны действиям агентов жилищного сектора и разворачиваются в три этапа: оценка градостроительного потенциала территории, оценка диспропорции территории, принятие решения.

Ключевое отличие заключается в определении градостроительного потенциала. Градостроительный потенциал каждой территории общественно-делового сектора количественно определяется как суммарная численность населения, которое проживает на территориях, попадающих в изохрону времени комфортной доступности территории. Потенциал территории характеризует транспортную доступность для жителей рабочих мест, товаров и услуг как укрупненную меру социального комфорта проживания на территории. Чем выше потенциал территории, тем она привлекательнее для размещения мест приложения труда и объектов обслуживания населения [Баевский, 1989].

## 7. Положение эвристической эволюционной модели ГС в структуре знаний о городе

Приведенная модель — пример того, как в рамках общей теории городского развития последовательно уточняются инструменты моделирования городских процессов до нужного уровня

детализации. В силу принципа построения можно утверждать, что модель относится к классу эвристических и приводит к близкому к оптимальному решению.

В фундаменте модели лежит построенная на базе системного подхода в градостроительстве теория общего городского развития [Гутнов, 1985]. Территориально-коммуникационная модель ГС — первый этап «уточнения»: она содержит детализацию теории, воплощенную в многократно апробированном инструментарии. На втором этапе «уточнения» происходит привлечение элементов транспортного планирования, а также адаптация концептуальной структуры интегрированных моделей систем землепользования и транспорта.

Используемый метод выбора пропускных способностей сегментов УДС доставляет близкие к оптимальным решения, так как они получены методом математического программирования.

Даже в случае точных математических формулировок задач и методов решений они имеют смысл, только если параметр времени в действительности является важным критерием; иными словами, если развитие ГС 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 на главной гипотезе о целевой функции города.

На рис. 4 изображено положение разработанной модели ГС в пространстве общего знания о городе.



**Рис. 4.** Положение эволюционной эвристической модели ГС в структуре знаний о городе

Источник: схема составлена автором.

## 8. Процесс управления развитием города с применением эволюционной эвристической модели ГС

Для оценки перспектив внедрения разработанной модели в процесс принятия решений обратимся к следующим положениям:

- положения А. Гутнова о повышении эффективности градостроительной деятельности [Гутнов, 1984];
- положения А. Высоковского о внедрении экстраполяционного прогноза в градостроительное проектирование [Высоковский, 1986].

С учетом указанных методик проектирования и прогнозирования процесс управления развитием ГС с применением эвристической эволюционной модели содержит следующие этапы.

### 8.1. Обоснование проектных решений

В настоящее время градостроительное проектирование сопряжено с расчетами и методиками, которые учитывают территориальные, демографические, социальные, экономические,



экологические факторы. Однако теория, которая объясняла бы взаимосвязь между социально-экономическими и функционально-пространственными аспектами, развита слабо. Существующие отраслевые расчеты и методики большей частью слабо связаны и неэффективны на стадии выработки принципиальных решений. Ключевой этап градостроительного проектирования, определение наиболее эффективной структурно-функциональной организации ГС, во многом опирается на субъективные экспертные суждения.

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

На этапе анализа существующего положения осуществляется объективная оценка состояния ГС на момент принятия решений о проведении градостроительных преобразований. Особое внимание должно быть уделено оценке территориальных элементов — параметров насыщенности и связности, а также построению транспортной модели системы — определению спроса на поездки для каждой из территорий.

В качестве ядра обоснования проектного решения может выступать «генеральная схема» развития города, которая опирается на результаты имплементации эвристической эволюционной модели. Генеральная схема содержит основные направления долгосрочного функционально-пространственного развития ГС с учетом целей и ресурсов. Необходимость создания такого документа, а также его принципиальное содержательное отличие от проекта генплана также было обосновано А. Гутновым [Гутнов, 1984]. Хотя разработка генеральной схемы не входит в структуру градостроительной деятельности, ее создание позволило бы развести принципиальные стратегические положения проекта генплана от деталей, связанных с тактическими планами его реализации.

Результат прогноза не может «автоматически» переноситься в проект, поскольку не учитывает внешние управляющие воздействия на систему. 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.

## 8.2. Программа реализации генерального плана

Хотя программа реализации генерального плана исключена из перечня обязательных в соответствии с Градостроительным кодексом РФ работ, осталась практика подготовки как минимум «первой очереди». В качестве территорий, на которых следует осуществлять первоочередные градостроительные действия, следует выбирать те, на которых проектные решения совпадают с прогнозируемым вариантом [Высоковский, 1986]. Реализация мероприятий на этих территориях будет наиболее эффективна как с точки зрения использования имеющихся ресурсов, так и с точки зрения организации самих мероприятий.

На последующих этапах 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 эталонного проекта, оптимального с точки зрения целеполагания, учета эволюционной составляющей городского развития, наиболее эффективного использования имеющихся ресурсов. Реальный проект может оцениваться в сравнении с эталонным по всем указанным позициям и по мере возможности путем корректировок приближаться к нему.

На рис. 5 приведена графическая схема процесса управления развитием города с применением разработанной эволюционной эвристической модели ГС.

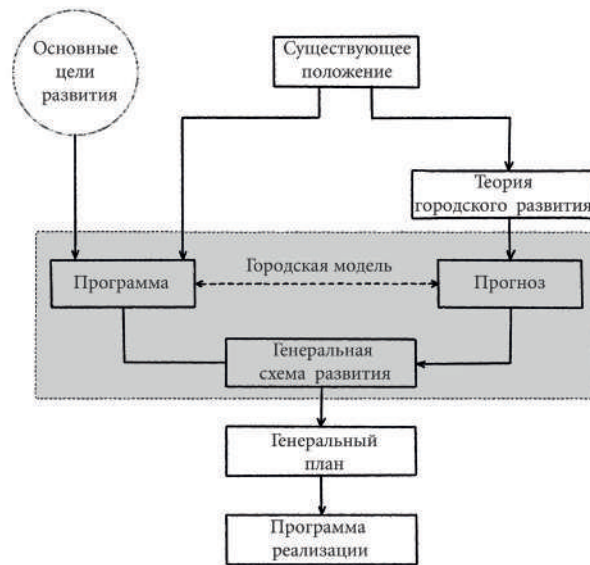


Рис. 5. Процесс управления развитием города с применением эволюционной эвристической модели ГС

Источник: схема составлена автором.

## Заключение

Задача разработки эвристической эволюционной модели ГС была сформулирована исходя из проблемы недостаточной обоснованности транспортной политики в области физической реорганизации УДС 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; и наоборот, согласованное в пространстве и синхронизированное во времени планирование этих двух подсистем обеспечивает устойчивость проектных решений в целом.

Был предложен подход, в рамках которого задача проектирования эффективной пространственно-функциональной организации той или иной городской подсистемы формулируется как частная задача проектирования ГС в целом, что обеспечивает преемственность подхода к проектированию и разработке моделей; с этой 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; при этом разработанные инструменты обладают свойством универсальности, то есть не зависят от конкретной моделируемой территории.

В частности, в процессе разработки обозначенной эволюционной эвристической модели ГС были получены следующие методические результаты.

1. Был преодолен отраслевой подход к транспортному компоненту моделей, выраженный в отсутствии явной репрезентации динамики физических городских УДС.

2. На основе включения явной репрезентации УДС была уточнена методика территориально-коммуникационной городской модели в части численных расчетов показателей территориальных оценок связности.

3. Был разработан прогнозный модуль, учитывающий эволюционные тенденции развития города, реализуемые частной стороной, — пространственно-временное движение мест проживания населения и мест приложения труда и обслуживания 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 УДС (пропускные способности сегментов сети, решения о топологической реорганизации) вследствие прогнозируемого изменения интенсивности использования городских территорий.

Следующим этапом работы в данной области наиболее перспективным представляется программная реализация представленной модели ГС и ее калибровка на реальных эмпирических данных, собранных на материале крупного города.

#### Источники

- Бабий А.В., Каверин А.Р., Шмульян Б.Л. (1984) Принципы организации диалога для формирования стратегии размещения обслуживающих центров в крупнейшем городе // Элементы диалоговой системы анализа и управления развитием города. Сборник трудов. Вып. 14. М.: ВНИИСИ. С. 49–57.
- Баевский О.А. (1989) Закономерности непрерывного развития жилой среды крупнейшего города (на примере Москвы) // Экология города и проблемы управления. Москва.
- Баевский О.А. (2001) Эволюционный подход к управлению градостроительным развитием крупнейшего города. Московский опыт // Градостроительство России XXI века. Сборник научных статей РААСН. М.: Московские учебники и картолитография.
- Белянин А. (2015) Удовольствие от пробок: поведенческая экономика о транспортной реформе // Стимулы, парадоксы, провалы: город глазами экономистов. М.: Strelka Press. С. 136–159.
- Берж К. (1962) Теория графов и ее применения. М.: Иностранная литература.
- Блинкин М.Я. (2015) Качество планирования городских транспортных сетей в зеркале классических моделей теории транспортного потока // Городские исследования и практики. Пилотный выпуск. С. 55–66.
- Бочаров Ю.П., Кудрявцев О.К. (1972) Планировочная структура современного города. М.: Стройиздат.
- Воробьев А.Э., Титов А.Ю., Гаврилин В.А., Меньшутин А.Ю., Бахирев И.А. (2015) Транспортная модель Московского региона // Вычислительные технологии в естественных науках. Методы суперкомпьютерного моделирования. Сборник трудов. М.: ИКИ РАН. С. 49–62.
- Высоковский А.А. (2005) Правила землепользования и застройки: руководство по разработке. Опыт введения правового зонирования в Кыргызстане. Бишкек: Ега-Басма.
- Высоковский А.А. (1986) Пространственное прогнозирование застройки сложившихся городов. Серия: Гражданское строительство и архитектура. М.: ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре.
- Глазычев В.Л. (2008) Урбанистика. М.: Европа.
- Гольц Г.А. (1981) Транспорт и расселение. М.: Наука.
- Госстрой СССР (1985) СНиП II-60-75\*\*. Планировка и застройка городов, поселков и сельских населенных пунктов. М.: ЦИТП Госстроя СССР.
- Гостев М.В. (2018) Об эвристической природе моделей эволюционного городского развития // Городские исследования и практики. Т. 3. №1. С. 7–22.
- Гостев М.В., Хабибуллин Р.Ф. (2014а) Об оптимальном выборе пропускных способностей каналов транспортных сетей // Системы управления и информационные технологии. № 2.1 (56). С. 120–124.
- Гостев М.В., Хабибуллин Р.Ф. (2014б) Об одной задаче оптимального выбора пропускных способностей каналов транспортных сетей // Проблемы теоретической кибернетики: Материалы XVII международной конференции. Казань: Отечество. С. 69–72.
- Гутнов А.Э. (1984) Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат.
- Гутнов А.Э. (1985) Системный подход в изучении города: основания и контуры теории городского развития // Системные исследования. Методологические проблемы. М.: Наука. С. 211–232.
- Кристофидес Н. (1978) Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир.
- Оре О. (1980) Теория графов. М.: Наука.
- Тархов С.А. (2005) Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск–Москва: Универсум.
- Тимерханов А.В. (2017) России на тысячу жителей приходится 288 легковых автомобилей // Автостат. Режим доступа: <https://www.autostat.ru/news/29682/> (дата обращения: 01.05.2017).
- Швецов В.И. (2009) Алгоритмы распределения транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. №10. С. 148–157.
- Швецов В.И. (2003) Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. №11. С. 3–46.
- Шелейховский Г.В. (1946) Композиция городского плана как проблема транспорта. М.: ГИПРОГОР.
- Acheampong R., Silva E. (2015) Land Use–Transport Interaction Modeling: A Review of the Literature and Future Research Directions // The Journal of Transport and Land Use. Vol. 8. No. 3. P. 1–28.
- Bates J. (2000) History of Demand Modeling // Handbook of Transport Modeling. Amsterdam; Oxford: Pergamon. P. 11–33.
- Batty M., Xie Y. (1994) From Cells to Cities // Environment and Planning B. No. 21. P. 31–48.

- Bureau of Public Roads (1964) Traffic Assignment Manual. Washington, D.C.: U.S. Bureau of Public Roads.
- Cervero R., Kockelman K. (1997) Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity, and Design//Transportation Research Part D: Transport and Environment. Vol. 2. No. 3. P. 199–219.
- Chang J. (2006) Models of the Relationship between Transport and Land-Use: A Review//Transport Reviews. No. 26. P. 325–350.
- Dowling R., Skabardonis A. (1993) Improving the Average Travel Speeds Estimated by Planning Models//Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. No. 1360. P. 68–74.
- Ding R., Ujang N., Hamid H., Manan M.S.A., Li R., Wu J. (2017) Heuristic Urban Transportation Network Design Method. A Multilayer Coevolution Approach//Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Vol. 479. P. 71–83.
- Gallo M., D'Acerno L., Montella B. (2010) A Meta-Heuristic Approach for Solving the Urban Network Design Problem//European Journal of Operational Research. Vol. 201. No. 1. P. 144–157.
- Geurs K., Wee B. (2004) Accessibility Evaluation of Land-Use and Transport Strategies: Review and Research Directions//Journal of Transport Geography. No. 12. P. 127–140.
- Jenks M., Burton E., Williams K. (1996) The Compact City: A Sustainable Urban Form? London: E & FN Spon.
- Kalaei M.S. (2010) Investigating Freeway Speed-Flow Relationships for Traffic Assignment Applications//Dissertations and Theses. Paper 33. Portland State University.
- Kozlov V.V., Buslaev A.P. (2012) Metropolis Traffic Modeling: From Intelligent Monitoring Through Physical Representation to Mathematical Problems//Proc. International Conference on Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering. Almeria, Spain. Vol. 1. P. 750–756.
- Koncheva E., Zalesskiy N. (2016) 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. Режим доступа: <https://www.hse.ru/data/2016/07/13/1116450809/04URB2016.pdf> (дата обращения: 01.05.2017).
- Lorenz M.R., Elefteriadou L. (2001) Defining Freeway Capacity as Function of Breakdown Probability//Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Vol. 1776. P. 43–51.
- Lowry I. (1964) A Model of Metropolis. Santa Monica, CA: RAND Corporation.
- Manley E.J., Orr S.W., Cheng T. (2015) A Heuristic Model of Bounded Route Choice in Urban Areas//Transportation Research Part C: Emerging Technologies. Vol. 56. P. 195–209.
- Marchetti C. (1994) Anthropological Invariants in Travel Behavior//Technological Forecasting and Social Change. Vol. 47. No. 1. P. 75–88.
- Navarro-Ligero M.L., Soria-Lara J.A., Valenzuela-Montes L.M. (2019) A Heuristic Approach for Exploring Uncertainties in Transport Planning Research//Planning Theory & Practice. Vol. 20. No. 4. P. 537–554.
- Romanycia M.H.J., Pelletier F.F. (1985) What is a Heuristic?//Computational Intelligence. Vol. 1. No. 1. P. 47–58.
- Stanilov K. (2007) 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. Dordrecht: Springer. P. 269–284.
- Suwansirikul C., Friesz T.L., Tobin R.L. (1987) Equilibrium Decomposed Optimization: A Heuristic for the Continuous Equilibrium Network Design Problem//Transportation Science. Vol. 21. No. 4. P. 254–263.
- Switzer A., Bertolini L., Grin J. (2013) Transitions of Mobility Systems in Urban Regions: A Heuristic Framework//Journal of Environmental Policy & Planning. Vol. 15. No. 2. P. 141–160.
- Wegener M. (2004) Overview of Land-Use Transport Models//Handbook of Transport Geography and Spatial Systems. No. 5. P. 127–146.
- Xie F., Levinson D. (2011) Evolving Transportation Networks. New York: Springer.

MAKSIMILIAN GOSTEV  
**THE EVOLUTIONARY  
DEVELOPMENT OF URBAN  
LAND-USE AND TRANSPORT  
SYSTEMS:  
HEURISTIC MODEL ENGINEERING**

**Maksimilian V. Gostev**, MA in Urban Planning (Vysokovsky Graduate School of Urbanism, HSE University); Chief of Transportation Planning Department in “Kazgrazhdanproject” Institute; Assistant in Geography and Cartography Department of Kazan Federal University, Specialist in Applied Mathematics and Computer Science in Kazan Federal University; 35/10 Dostoevsky str., Kazan, 420012, Russian Federation, tel.: +7 (987) 418-88-76  
E-mail: mailtogmv@gmail.com

**Abstract**

This article investigates the development of the heuristic urban model, or the model of urban systems. According to the approach, the design of an efficient spatial-functional organization in any urban subsystem is formulated as a special case of designing the system as a whole. This ensures the continuity of the approach in relation to the applied model engineering, and in relation to developing theoretical statements. To this end, heuristic urban model engineering is implemented as an elaboration of several instruments of the territorial-communicational model, which in turn is based on Gutnov's carcass-fabric model.

The static, dynamic and evolutionary states of the model are described and the combined characteristics of the model are discussed. The regulating and forecasting features of the model allow a balance of long-term strategic goals and short-term tactical tasks, planned decisions and natural urban development. A criterion for the evaluation of system spatial organization is presented. The land-use and transportation systems, as well as private and public agents are distinguished.

The mechanisms of the model are formulated in terms of relatively independent subproblems. The problem of optimal housing and workplace spatial allocation is presented for the land-use system. The evaluations are based on the indices of urban territorial potential and spatial disproportions. The problems of optimal network link capacity and network connectivity improvement are presented for transportation networks. Algorithms for each of these subproblems are proposed.

The position of the engineered model in the structure of the urban science is presented, according to the system approach in urban planning. The model applications for the management of urban development are described. The cases of project proposals justification and program of general plan implementation development are given as examples.

Instruments validated within the model have the property of universality: they do not depend on the specifications of the modeled territory.

**Key words:** urban models; transport models; urban systems; urban dynamics; heuristic models; urban evolution

**Citation:** Gostev M. (2019) Evolutionary Development of Urban Land-Use and Transport Systems: Heuristic Model Engineering. *Urban Studies and Practices*, vol. 4, no 4, pp. 70–92. (in Russian) DOI: <https://doi.org/10.17323/usp44201970-92>

**References**

- Acheampong R., Silva E. (2015) Land Use–Transport Interaction Modeling: A Review of the Literature and Future Research Directions. *The Journal of Transport and Land Use*, vol. 8, no 3, pp. 1–28.
- Babij A.V., Kaverin A.R., Shmul'yan B.L. (1984) Principy organizacii dialoga dlya formirovaniya strategii razmeshcheniya obsluzhivayushchih centrov v krupnejšem gorode [Principles of Dialog Organisation in Strategic Planning of Service Centers Allocation in the Largest City]. *Elementy dialogovoj sistemy analiza i upravleniya razvitiem goroda. Sbornik trudov. Vypusk 14* [Elements of a Dialogue System for Analyzing and Managing the Development of a City. Issue 14]. Moscow: VNIISI, pp. 49–57. (in Russian)

- Baevskiy O.A. (2001) Evolyucionniy podkhod k upravleniyu gradostroitel'nym razvitiem krupneyshego goroda. Moskovskiy opyt [Evolutionary Approach to Urban Planning Development of the Largest City. Case of Moscow]. *Gradostroitel'stvo Rossii XXI veka. Sbornik nauchnykh statey RAASN* [Russian urban planning in XXI century: Collection of Science Papers]. Moskva: Moskovskie uchebniki i kartolitografiya [Moscow: Textbooks and Kartolitografiya]. (in Russian)
- Baevskiy O.A. (1989) Zakonomernosti nepreryvnogo razvitiya zhiloy sredy krupneyshego goroda (na primere Moskvy) [Continous Development Regularity of the Largest City Habitat Environment (Case of Moscow)]. *Ekologiya goroda i problemy upravleniya* [Urban Ecology and Management Problems]. Moscow. (in Russian)
- Bates J. (2000) History of Demand Modeling. *Handbook of Transport Modeling*. Amsterdam; Oxford: Pergamon, pp. 11–33.
- Batty M., Xie Y. (1994) From Cells to Cities. *Environment and Planning B*, no 21, pp. 31–48.
- Belyanin A. (2015) Udovol'stvie ot probok: povedencheskaya ekonomika o transportnoy reforme [Traffic Jams Enjoyment: Behavioral Economics on Transport Reform]. *Stimuly, paradoksy, provaly: gorod glazami ekonomisty* [Stimuluses, paradoxes, failures: the city through the eyes of economist]. Moscow: Strelka Press, pp. 136–159. (in Russian)
- Berzh K. (1962) Teoriya grafov i ee primeneniya [Graph Theory and Its Applications]. Moskva: Inostrannaya literature [Moscow: Foreign Languages Publishing House]. (in Russian)
- Blinkin M.Y. (2015) Kachestvo planirovaniya gorodskikh transportnykh setey v zerkale klassicheskikh modeley teorii transportnogo potoka [Urban Network Design Quality in the Classical Models of the Traffic Flow Theory]. *Gorodskie issledovaniya i praktiki. Pilotniy vypusk* [Urban Studies and Practices. Pilot Issue], pp. 55–66. (in Russian)
- Bocharov Y.P., Kudryavcev O.K. (1972) Planirovochnaya struktura sovremennogo goroda [Modern City Planning Structure]. Moscow: Stroyizdat. (in Russian)
- Bureau of Public Roads (1964) Traffic Assignment Manual. Washington, D.C.: U.S. Bureau of Public Roads.
- Cervero R., Kockelman K. (1997) Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity, and Design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 2, no 3, pp. 199–219.
- Chang J. (2006) Models of the Relationship between Transport and Land-Use: A Review. *Transport Reviews*, no 26, pp. 325–350.
- Dowling R., Skabardonis A. (1993) Improving the Average Travel Speeds Estimated by Planning Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no 1360, pp. 68–74.
- Ding R., Ujang N., Hamid H., Manan M.S.A., Li R., Wu J. (2017) Heuristic Urban Transportation Network Design Method, A Multilayer Coevolution Approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 479, pp. 71–83.
- Gallo M., D'Acerno L., Montella B. (2010) A Meta-Heuristic Approach for Solving the Urban Network Design Problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 201, no 1, pp. 144–157.
- Geurs K., Wee B. (2004) Accessibility Evaluation of Land-Use and Transport Strategies: Review and Research Directions. *Journal of Transport Geography*, no 12, pp. 127–140.
- Glazychev V.L. (2008) Urbanistika [Urbanism]. Moskva: Evropa [Moscow: Europe]. (in Russian)
- Gol't G.A. (1981) Transport i rasselenie [Transport and Settlement]. Moskva: Nauka [Moscow: Publishing House Nauka]. (in Russian)
- Gosstroy SSSR (1985) SNiP II-60-75\*\* (1985) Planirovka i zastroyka gorodov, poselkov i sel'skikh naselennykh punktov [Cities, Villages and Settlements Planning and Development]. Moskva: CITP Gosstroya SSSR [Moscow: Gosstroy USSR Publishing House]. (in Russian)
- Gostev M. (2018) On the Heuristic Nature of Evolutionary Urban Development Models. *Urban Studies and Practices*, vol. 3, no 1, pp. 7–22 (in Russian)
- Gostev M.V., Khabibullin R.F. (2014a) Ob optimal'nom vybore propusknykh sposobnostey kanalov transportnykh setey [On Transport Networks Links Capacity Optimal Selection]. *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii* [Management Systems and Information Technologies], no 2.1 (56), pp. 120–124. (in Russian)
- Gostev M.V., Khabibullin R.F. (2014b) Ob odnoy zadache optimal'nogo vybora propusknykh sposobnostey kanalov transportnykh setey [On Transport Networks Links Capacity Optimal Selection Problem]. *Problemy teoreticheskoy kibernetiki: Materialy XVII mezhdunarodnoy konferencii* [Theoretical Cybernetics Problems: Proceedings of XVII International Conference]. Kazan': Otechestvo, pp. 69–72. (in Russian)
- Gutnov A.E. (1984) Evolyuciya gradostroitel'stva [The Evolution of Urban Development]. Moscow: Strojizdat. (in Russian)
- Gutnov A.E. (1985) Sistemniy podkhod v izuchenii goroda: osnovaniya i kontury teorii gorodskogo razvitiya [System Approach to Urban Research: Basics of Urban Development Theory]. *Sistemnye issledovaniya. Metodologicheskaya problema* [System Research. Methodological Problems]. Moskva: Nauka [Moscow: Publishing House Nauka], pp. 211–232. (in Russian)

- Jenks M., Burton E., Williams K. (1996) *The Compact City: A Sustainable Urban Form?* London: E & FN Spon.
- Kalaei M.S. (2010) Investigating Freeway Speed-Flow Relationships for Traffic Assignment Applications. *Dissertations and Theses. Paper 33*. Portland State University.
- Kozlov V.V., Buslaev A.P. (2012) Metropolis Traffic Modeling: From Intelligent Monitoring Through Physical Representation to Mathematical Problems. *Proc. International Conference on Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering*. Almeria, Spain, vol. 1, pp. 750–756.
- Koncheva E., Zalesskiy N. (2016) 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. Available at: <https://www.hse.ru/data/2016/07/13/1116450809/04URB2016.pdf> (accessed 01 May 2017).
- Kristofides N. (1978) *Teoriya grafov. Algoritmicheskiy podkhod [Graph Theory. Algorithmic Approach]*. Moskva: Mir [Moscow: Mir Publishing House]. (in Russian)
- Lorenz M.R., Elefteriadou L. (2001) Defining Freeway Capacity as Function of Breakdown Probability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1776, pp. 43–51.
- Lowry I. (1964) *A Model of Metropolis*. Santa Monica, CA: RAND Corporation.
- Manley E.J., Orr S.W., Cheng T. (2015) A Heuristic Model of Bounded Route Choice in Urban Areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 56, pp. 195–209.
- Marchetti C. (1994) Anthropological Invariants in Travel Behavior. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 47, no 1, pp. 75–88.
- Navarro-Ligero M.L., Soria-Lara J.A., Valenzuela-Montes L.M. (2019) A Heuristic Approach for Exploring Uncertainties in Transport Planning Research. *Planning Theory & Practice*, vol. 20, no 4, pp. 537–554.
- Ore O. (1980) *Teoriya grafov [Graph Theory]*. Moskva: Nauka [Moscow: Publishing House Nauka]. (in Russian)
- Romanycia M.H.J., Pelletier F.F. (1985) What is a Heuristic? *Computational Intelligence*, vol. 1, no 1, pp. 47–58.
- Sheleykhovskiy G.V. (1946) *Kompozitsiya gorodskogo plana kak problema transporta [Urban Plan Composition as Transport Problem]*. Moscow: GIPROGOR. (in Russian)
- Shvecov V.I. (2009) *Algoritmy raspredeleniya transportnykh potokov [Transport Flows Distribution Algorithms]*. *Avtomatika i Telemekhanika [Automation and Telemechanics]*, no 10, pp. 148–157. (in Russian)
- Shvecov V.I. (2003) *Matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov [Transport Flows Mathematical Modeling]*. *Avtomatika i Telemekhanika [Automation and Telemechanics]*, no 11, pp. 3–46. (in Russian)
- Stanilov K. (2007) 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*. Dordrecht: Springer, pp. 269–284.
- Suwansirikul C., Friesz T.L., Tobin R.L. (1987) Equilibrium Decomposed Optimization: A Heuristic for the Continuous Equilibrium Network Design Problem. *Transportation Science*, vol. 21, no 4, pp. 254–263.
- Switzer A., Bertolini L., Grin J. (2013) Transitions of Mobility Systems in Urban Regions: A Heuristic Framework. *Journal of Environmental Policy & Planning*, vol. 15, no 2, pp. 141–160.
- Tarkhov S.A. (2005) *Evolucionnaya morfologiya transportnykh setey [Transportation Networks Evolutionary Morphology]*. Smolensk–Moscow: Universum. (in Russian)
- Timerkhanov A.V. (2017) *V Rossii na tysyachu zhitel'ey prikhoditsya 288 legkovykh avtomobiley [There are 288 Cars per Thousand Citizens in Russia]*. *AvtoStat [Autostat]*. Available at: <https://www.avtoStat.ru/news/29682/> (accessed 01 May 2017). (in Russian)
- Vorob'ev A.E., Titov A.Y., Gavrilin V.A., Men'shutin A.Y., Bakhirev I.A. (2015) *Transportnaya model' Moskovskogo regiona [Moscow Region Transport Model]*. *Vychislitel'nye tekhnologii v estestvennykh naukakh. Metody superkomp'yuternogo modelirovaniya. Sbornik trudov [Computation Technologies in Natural Science. Supercomputer Modelling Methods]*. Moscow: IKI RAN, pp. 49–62. (in Russian)
- Vysokovskiy A.A. (2005) *Pravila zemlepol'zovaniya i zastroyki: rukovodstvo po razrabotke. Opyt vvedeniya pravovogo zonirovaniya v Kyrgyzstane [Land-Use and Development Ordinance: Development Guide. Case of Zoning Ordinance Implantation in Kyrgyzstan]*. Bishkek: Ega-Basma. (in Russian)
- Vysokovskiy A.A. (1986) *Prostranstvennoe prognozirovanie zastroyki slozhivshikhsya gorodov [Spatial Forecasting of Established City Development]*. Moskva: CNTI po grazhdanskomu stroitel'stvu i arkhitekture [Moscow: Center for Scientific and Technical Information on Civil Engineering and Architecture]. (in Russian)
- Wegener M. (2004) Overview of Land-Use Transport Models. *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*, no 5, pp. 127–146.
- Xie F., Levinson D. (2011) *Evolving Transportation Networks*. New York: Springer.