

М.В. ГОСТЕВ

ОБ ЭВРИСТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ МОДЕЛЕЙ ЭВОЛЮЦИОННОГО ГОРОДСКОГО РАЗВИТИЯ

Введение

По мере того как город перестал восприниматься как нечто статичное, начал формироваться взгляд на него как на сложную систему. Ранние модели, такие как концентрическая модель Р. Парка и Э. Берджесса [Burgess, 1924], секторная модель Г. Хойта [Hoyt, 1939], многоядерная модель (модель субцентров) Ч. Харриса и Э. Ульмана [Harris, Ullman, 1945], модель рынка городских земель В. Алонсо [Alonso, 1965], внесли значительный вклад в развитие знания о городе, но перестали отражать его радикально усложнившуюся к середине XX в. функционально-пространственную организацию. Системный подход, возобладавший в исследованиях города с 1960-х годов, дал толчок дальнейшему развитию теории его пространственной организации и, более того — его эволюции во времени. При этом территориальный рост, увеличение численности населения, возрастающая пространственная интеграция функций городской жизни не изменили природу города, а, напротив, выявили его фундаментальный функциональный признак — высокую коммуникативность [Гутнов, 1984], которая обеспечивает «минимум необходимых и максимум возможных передвижений» [Blumenfeld, 1964]. Именно коммуникативность определяет пространственную организацию города как интенсивно освоенной территории в границах допустимого радиуса контактов. Однако трактовка города как системы оставалась максимально разнообразной.

В западной традиции системный подход применялся с целью декомпозиции города: его «всеохватывающее» описание заключалось в попытке учесть все возможные подсистемы и связи между ними [Southworth, 1995; Lundqvist, 2003; Acheampong, Silva, 2015]. Такие

Гостев Максимилиан Вадимович, ассистент кафедры географии и картографии Казанского (Приволжского) федерального университета, специалист в области прикладной математики и информатики (Казанский федеральный университет), магистр градостроительства (ВШУ имени А.А. Высоковского НИУ ВШЭ); Российская Федерация, 420111, Казань, ул. Кремлевская, д. 6/20, тел. +7 (987) 418-88-76

E-mail: mailtogmv@gmail.com

Статья посвящена сравнительному анализу четырех динамических структурно-функциональных моделей города: каркасно-тканевой, территориально-коммуникационной, неравномерно-районированной и клеточно-фрактальной. Демонстрируется, что эти модели укладываются в рамки общей теории эволюционного городского развития, основы которой были сформулированы А.Э. Гутновым. Показывается, что эти модели по своей природе являются эвристическими.

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

Цитирование: Гостев М.В. (2018) Об эвристической природе моделей эволюционного городского развития // Городские исследования и практики. Т. 3. № 1. С. 7–22. DOI: <https://doi.org/10.17323/usp3120187-22>

логические описания заменяли собой фундаментальную теорию, на базе которой можно было бы строить операционные модели. Действительно, развитие городских теорий и моделей, хотя и оказывало взаимное влияние, в целом шло параллельно [Batty, 2008]. Модели применялись для ситуационного управления, а не для прогнозирования или понимания пространственно-функциональной организации города. Лишь относительно недавно возникшие модели удалось свести с актуальной теорией пространственного развития города. В данной статье это направление обозначено как клеточно-фрактальные модели.

Основоположник системного подхода в отечественном градостроительстве, А.Э. Гутнов, ввел в качестве предмета исследований понятие «градостроительная система» — «от-

носителем обособленная, функционально связанная область организованной человеком пространственной среды, в пределах которой реализуется комплекс основных видов социальной активности населения, обусловленных достигнутым уровнем развития общества»¹ [Гутнов, 1984; 1985]. Это определение легло в основу его теории городского развития. Модели, которые продолжили эту традицию, отличаются прикладным характером, базирующийся на понимании эволюционных городских процессов.

Содержательно описание того, как устроена система, это и есть построение модели. Может возникнуть впечатление, что различным системным представлениям об одном предмете соответствуют различные модели. Иными словами, разнообразие моделей неизбежно вызывает вопрос: каким образом они представляют один и тот же предмет и насколько достоверно? Чтобы попытаться это объяснить, предлагается сравнить четыре городских модели с точки зрения того, как они, во-первых, представляют структуру системы, а во-вторых, как они представляют ее эволюцию.

Для сравнения выбраны три отечественные модели, каждая из них не только предоставляет теоретические инструменты, но и неоднократно применялась на практике при разработке документов территориального планирования, а также теоретическая модель, которая в некотором смысле служит промежуточным итогом пятидесятилетней истории развития зарубежных прикладных городских моделей, так называемых интегрированных моделей городского землепользования и транспорта.

Каркасно-тканевая модель градостроительной системы

Структура градостроительной системы

Теория общего городского развития А.Э. Гутнова возникла в начале 1980-х годов в результате обобщения теорий, которые описывали характер распространения городских процессов в ходе территориального расширения города [Гутнов, 1984]. Данная теория описывает строение градостроительной системы через понятия «каркас» и «ткань». Каркас — устойчивая структурообразующая часть сис-

темы, которая характеризуется высокой интенсивностью пространственного освоения; это «двигатель», обеспечивающий «эффективную и бесперебойную работу «городской машины»». Его главный параметр — «коммуникативная мощность». Она определяет потенциал обмена, который город предлагает жителям. Ткань — основной материальный субстрат системы, остальные ее компоненты.

С точки зрения отражения структуры системы каркас характеризуется следующим образом.

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

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

Эволюция градостроительной системы

Динамическое состояние системы проявляется в соотношении каркаса и ткани: различные значения соотношения соответствуют различным фазам ее развития. Это справедливо как для коротких временных интервалов текущего функционирования, так и для долговременных эволюционных изменений. Эволюция градостроительной системы проявляется в поочередном разворачивании двух фаз (рис. 1).

Первая фаза — количественный рост системы. На этом этапе динамическое поведение системы определяется положительными обратными связями, за счет чего воспроизводится ткань. При этом увеличение размеров системы не обеспечивается соответствующим увеличением «коммуникативной мощности» каркаса. Подобная форма развития 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, проявляются нарушения в ра-

¹ Далее термин «город» будет использоваться в том же смысле, что и термин «градостроительная система».

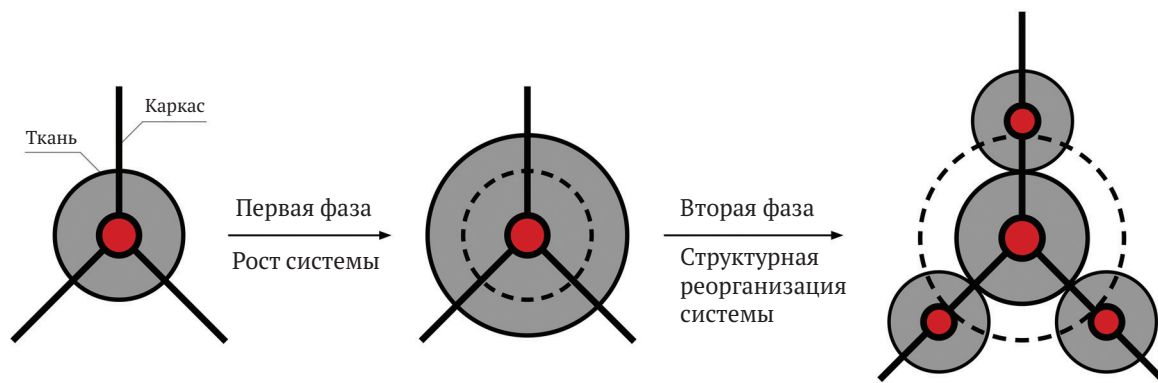


Рис. 1. Эволюционное развитие градостроительной системы

Источник: [Гутнов, 1984].

боте различных функциональных подсистем. Например, с увеличением размеров системы транспортная нагрузка начинает создавать препятствия в осуществлении ежедневных потребностей горожан. В итоге темпы роста замедляются: система переходит в то состояние, когда дальнейшее развитие невозможно без внутренней реорганизации.

Вторая фаза — качественная структурная реорганизация системы. Динамическое поведение системы на этом этапе обеспечивается отрицательными обратными связями. 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 навстречу друг другу. В результате в систему закладываются резервы, пространственные и функциональные, которые необходимы для последующего развития. Тем самым в конце этой фазы возникают предпосылки и возможности для последующего увеличения размеров системы: начинается новый этап территориального роста.

Две формы динамического поведения системы составляют две взаимосвязанные стороны единого процесса развития. Несмотря на равнозначность этих двух этапов, 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 которо-

го происходят его колебания в соответствии с универсальным принципом циклического развития.

Хотя А.Э. Гутновым были предложены прикладные методы выявления каркаса и проведены расчеты для Московской градостроительной системы, первоочередной задачей каркасно-тканевой модели было создание фундаментальной теоретической базы для реализации дальнейшей программы изучения строения градостроительной системы, ее функционирования и развития во времени. В качестве операционных моделей, которые учитывали бы эволюционную динамику городского развития, в дальнейшем были разработаны территориально-коммуникационная и неравномерно-районированная модели.

Территориально-коммуникационная модель градостроительной системы

Структура градостроительной системы

Эволюционная территориально-коммуникационная модель градостроительной системы, разработанная в Институте Генплана Москвы, развивает идеи А.Э. Гутнова применительно к современным экономическим условиям [Баевский; 1989; 2001; 2016]. В названии модели отражена предлагаемая структура системы: ее элементы, территории, 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).

Модель основана на гипотезе, согласно которой «целевая функция» города заключается в расширении пространственно-временной доступности выбора. Выбор, который предоставляет каждая территория системы, — количество и разнообразие возможных взаимодействий между объектами и их потребителями, которые находятся на территории, а также в пределах времени комфортной доступности последней.

Объем выбора зависит от двух базовых факторов. Первый — насыщенность территории населением или объектами тяготения населения, целями корреспонденций. Насыщенность территории является индикатором ее привлекательности. Второй фактор — обширность транспортных связей территории с другими территориями, ее транспортная доступность. Индикаторами транспортной доступности территории 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. При этом увеличение выбора может осуществляться повышением значений как каждого фактора в отдельности, так и обоих одновременно.

Эволюция градостроительной системы

Взаимосвязь 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 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 и целей 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 прочие значения. Одновременное изменение значений показателей возможно в результате проведения масштабных проек-

тов. 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 градостроительной системе имеет место эволюционная тенденция к обеспечению сбалансированных значений характеристик насыщенности и связности, с одной стороны, и совместному повышению их абсолютных значений, с другой.

Выявление предпосылок развития территорий

Оценочная матрица — основной аналитический инструмент территориально-коммуникационной модели [Баевский, 2016]. Измерения матрицы — градостроительный потенциал территории (связность) и уровень ее градостроительного использования (насыщенность). Матрица состоит из девяти ячеек, которым соответствуют комбинации значений исходных ранговых оценок территорий: высоких, средних, низких. По значениям исходных признаков территорий матрица определяет ряд показателей их структурной развитости (рис. 2).

1. Эффективность градостроительной организации территории, объем выбора. «Эталонная» организация представлена территориями с высокими значениями связности и насыщенности. Изменения на такой территории влияют на состояние системы в целом. «Слабые звенья» — территории с низкими значениями насыщенности и связности, у которых отсутствуют предпосылки повышения эффективности организации. Большую часть 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 зоны сбалансированности, недостатка связности, недостатка насыщенности. Недоиспользуемая 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 недоиспользуется привлекательность территории, следует повышать связность. Если территория негативно воздействует на окружение, следует уменьшать насыщенность.

Неравномерно-районированная модель градостроительной системы

Пространственное прогнозирование городской инерционной застройки

Экстраполяционные прогнозы, методы определения параметров объекта при сохранении тенденций предшествующего периода, долгое время применялись в градостроительстве к непространственным явлениям. А.А. Высоковский предложил метод пространственного экстраполяционного прогноза — метод определения размещения новых городских объектов [Высоковский, 1986].

Объектом прогнозирования может быть как градостроительная система в целом, так и ее отдельные функциональные части. Однако объект должен обладать признаком, который монотонно изменяется во времени и который возможно описать количественно (например, плотность застройки). Прогноз строится на базе территориального распределения значений признака. Территория покрывается сеткой из ячеек; местоположение элементов описывается показателями плотности, записанными в ячейках. На пространственное размещение новых объектов влияет много 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, детерминированного 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 системы. Подобные объекты характеризуют качества, выгодные при градостроительном проектировании: они вписываются в сложившуюся ситуацию с минимальными изменениями планировочной структуры.

Построение экстраполяционного прогноза завершается сводным прогнозом инерционного развития застройки. Цель свода — воспроизведение целостной картины развития пространственной организации системы. Сводный прогноз должен ответить на вопрос о соотношении развития жилищного фонда и общественно-делового фонда, местах их размещения.

Структура градостроительной системы

Развитием идей пространственного прогнозирования застройки сложившихся городов стало появление неравномерно-районированной эволюционной модели градостроительной системы [Высоковский, 2005; 2015]. Инструмент выявления инерционной застройки в этой модели применяется для определения функционально-пространственной организации города, а также для прогнозирования формирования новых городских центров [Котов и др., 2016].

Концепция неравномерно-районированной пространственной структуры города основана на фундаментальных характеристиках поведения горожан. 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 — узловы районы. Узловы районы, по определению Б.Б. Родомана, это «моноцентрические ареалы, объединенные центробежными и центростремительными потоками вещества, энергии или информации» [Родоман, 1999]. Каждый узловый район состоит из двух частей.

Первая часть — центр, коммуникационно-публичная система. Он формируется путем



Рис. 2. Оценочная матрица

Источник: [Баевский, 2016].

концентрации общественно-деловых объектов и 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 минимум один значимый уникальный объект; связевые элементы — территории с интенсивными пешеходными и транспортными потоками, но средней интенсивностью использования.

Вторая часть — монофункциональные территории, расположенные на периферии района и состоящие 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, который 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.

Эволюция градостроительной системы

Эволюция системы базируется на принципе ризомы и заключается в создании, развитии, соединении и разделении узловых районов — территориальных единиц. Формирование системы начинается с одной пространственной единицы, по мере роста формируются следующие. Развитие единиц проходит через этапы насыщения и структурной трансформации. Порядок присоединения каждой единицы к центральной более важен, чем физические расстояния между ними, поэтому расстояния измеряются ранговыми номерами присоединения, дистанциями. Центральная единица — первая дистанция; следующие, примыкающие к ней единицы формируют вторую дистанцию, и т.д. Уровень структурной развитости единиц снижается по мере удаления от центральной единицы.

Пространственное развитие системы характеризует аппликативная динамика: каждая пространственная единица развивается и как автономный узловой район, предоставляя относительно полноценную среду проживания, и как элемент системы. Таким образом, пространственная структура градостроительной системы состоит из главной (центральной) единицы, рядовых (срединных) единиц, расположенных на любой дистанции, и пери-

ферийных единиц, находящихся на начальной стадии развития (рис. 3).

Клеточно-фрактальная модель градостроительной системы

Интегрированные модели систем городского землепользования и транспорта

Клеточно-фрактальная модель градостроительной системы возникла как результат более чем пятидесятилетнего развития интегрированных моделей городского землепользования и транспорта. В истории интегрированных моделей выделяют «волны» [Timmermans, 2003], или «поколения» [Silva, Wu, 2012], вызванные переходами от одной техники моделирования к другой, новыми теоретическими открытиями и эмпирическими наблюдениями. Хотя в основе функционирования различных групп моделей лежали различные принципы принятия решений и механизмы, с помощью которых принимались попытки описать развитие города, в целом развитие моделей шло в направлении все более дизагрегированной репрезентации действующих в городе агентов и пространственных структур, дифференциации учитываемых факторов [Sivakumar, 2007].

К первому поколению относят агрегированные статичные гравитационные модели, разработка которых началась в 1950-х годах. Согласно гравитационному принципу, уровень пространственных взаимодействий между двумя городскими зонами прямо пропорционален количеству размещенных в них объектов притяжения и обратно пропорционален расстоянию между ними. Динамика в таких моделях направлена в сторону установления равновесия. Гравитационные модели не имели строгого теоретического обоснования, но широко применялись, поскольку предлагали принципы пространственного распределения видов землепользования. Первой гравитационной моделью, примененной к задачам прогнозирования землепользования и транспорта, стала «Модель Метрополиса» Лоури [Lowry, 1964], которая породила целое семейство моделей [Horowitz, 2004].

На смену им пришли модели на базе эконометрической теории и теории пространственной экономики, включавшие модели математического программирования, модели полезности со случайным эффектом, динамическую вариацию модели Алонсо [Chang,

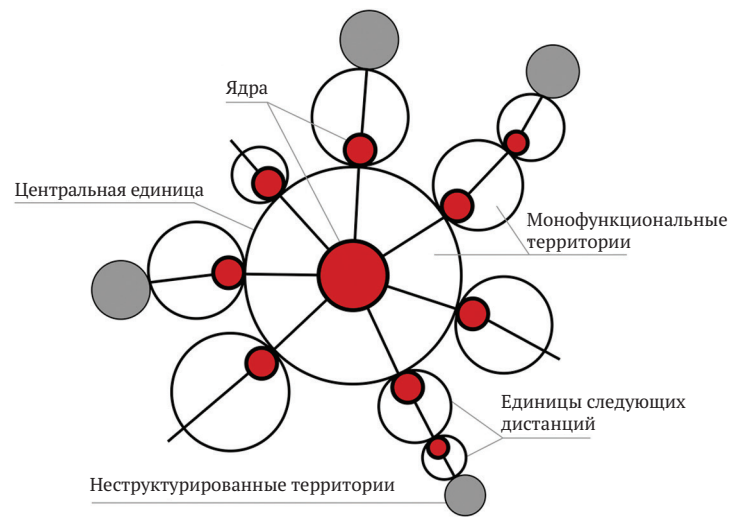


Рис. 3. Неравномерно-районированная пространственная структура градостроительной системы

Источник: [Высоковский, 2015].

2006; Sivakumar, 2007]. Эконометрические модели 1970–1980-х годов утвердили взгляд на город как на динамическую систему, которая никогда не пребывает в равновесии, но в большинстве своем они мало что сообщали о пространственных структурах.

Главный недостаток интегрированных моделей ранних поколений заключается в том, что они не опирались на какую-либо единую фундаментальную теорию развития структурно-функциональной организации градостроительной системы. Даже когда результаты использования моделей были правдоподобными и применимыми на практике, они способствовали накоплению эмпирических знаний о городе. Иными словами, такие модели страдали от недостатка теоретической обоснованности, с одной стороны, и не вносили значительный вклад в теоретическое знание о городе, с другой.

Структура градостроительной системы

В основе моделей третьего поколения, получивших развитие с конца 1980-х годов, лежит представление о том, что градостроительные системы формируются путем коллективных действий большого количества агентов в пространстве и во времени. Новые подходы к моделированию начали принимать во внимание принципы самоорганизации в городском развитии [Batty, 2005]. Один из этих подходов нашел свое выражение в дизагрегирован-

ных агентных моделях микросимуляции. Такие модели нацелены на имитацию поведения целого населения территории и способны представлять городские процессы с требуемым уровнем детализации [Miller, 2003].

Другой подход — модели, основанные на клеточных автоматах [Batty, Xie, 1994; Batty, Coucleis, Eichen, 1997]. Такие модели состоят из нескольких базовых элементов. Первый элемент — регулярная решетка клеток. Второй элемент — множество возможных состояний клеток; применительно к моделированию градостроительных систем это множество видов землепользования, выстроенных в иерархию (неосвоенные территории, жилые, коммерческие, производственные, и т.д.). Третий элемент — определение соседства, или окрестности клетки. Соседство может определяться через окрестности Мура (смежные, а также соседние по диагоналям клетки), либо через окрестности фон Неймана (только смежные клетки). Четвертый элемент — правила перехода, которые управляют эволюцией отдельных клеток и представляют собой механизмы пространственного взаимодействия. Для каждой клетки рассчитывается потенциал перехода, который репрезентирует действия акторов, формирующих землепользование. На каждом дискретном шаге времени все клетки с наибольшим потенциалом одновременно меняют свое состояние на более высокое согласно иерархии (например, производство в коммерцию, но не наоборот). Клетки меняются до тех пор, пока не будет удовлетворен заданный спрос на клетки в каждом из состояний.

Гибкость этого математического инструмента обеспечивает разнообразие моделей: от детерминистических, в которых для построения правил перехода используются логические утверждения «если-то-иначе», до стохастических, в которых клетки меняют состояние согласно некоторой вероятности, и состояния клеток являются функциями от состояний соседних клеток [Iacono, Levinson, El-Geneidy, 2008].

Эволюция градостроительной системы

Развитие моделей градостроительных систем на базе клеточных автоматов обусловлено двумя факторами. Во-первых, клеточные автоматы по своей природе являются пространственными моделями. Во-вторых, клеточные автоматы способны порождать

сложные структуры путем применения простых правил [White, Engelen, 1993]. Иными словами, городские модели, основанные на клеточных автоматах, знаменуют переход к простоте репрезентации системы с точки зрения представления ее пространственной структуры, но также способны отражать глубинные процессы, которые порождают эту структуру «снизу-вверх»: пространственные решения индивидов, их групп и институтов.

М. Бэтти, занимающийся городскими моделями с 1970-х годов, одним из первых предложил использовать пространственную морфологию в качестве инструмента выявления этих процессов. Он обратил внимание, что городские пространственные структуры самоподобны, то есть воспроизводят себя на разных уровнях масштаба. Из этого следует, что на разных уровнях масштаба протекают схожие процессы. Иерархии, порождаемые этими структурами, в 1980-х годах стали интерпретировать как фракталы. Действительно, город в своем естественном развитии редко заполняет все пространство: он заполняет пространство тем же образом, которым фрактальные формы заполняют пространство в целочисленных измерениях [Batty, 2012].

Различные городские формы и процессы объединяет идея масштабирования, объясняющая, как изменяются формы и размеры отдельных элементов системы и системы в целом. Масштабирование, в свою очередь, подчиняется трем законам [Ibid.].

Первый закон масштабирования — это правило Ципфа «ранг-размер», которое устанавливает связь между размером города и его рангом, то есть его местом в иерархии городов страны или региона. Применительно к масштабам агломерации можно использовать указанное правило для приблизительной оценки плотности населения в границах отдельных регулярных модулей, на которые поделена территория.

Второй закон масштабирования описывает, как атрибуты города изменяются относительно его размера и друг друга. Этот закон объясняет, почему зарплаты растут с большей скоростью, чем население города, а физическая инфраструктура медленнее, иллюстрируя положительный и отрицательный эффекты от масштаба соответственно.

Третий закон масштабирования, сформулированный в виде видоизмененной гравитационной формулы, описывает, как увеличивается число взаимодействий индивида

с ростом населения города. Закон объясняет, как благодаря эффекту взаимодействий в больших городах наблюдается агломерационный эффект, что возвращает к идее коммуникативности как фундаментального признака города.

Многолетние эксперименты с городскими моделями, а также ряд теоретических обобщений позволили М. Бэтти заявить о необходимости появления «новой науки о городе», которая воссоединит теорию и практику [Batty, 2012]. Обобщенная эволюционная модель градостроительной системы в парадигме этой «новой науки» выражается в том, что целесообразно обозначить как клеточно-фрактальную модель — фрактальную структуру, моделируемую с помощью клеточного автомата, которая подчиняется законам масштабирования.

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

Все рассмотренные модели объединяет представление о градостроительной системе как о динамическом, непрерывно развивающемся объекте. Разнообразие моделей 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 — задает набор дискретных состояний, выраженный в матричной форме. Такой подход позволяет изучить свойства каждого выделенного состояния, количественным образом измерить параметры элементов, предложить индивидуальные стратегии для их управления — выявить стадию эволюционного развития не только всей системы, но и отдельных ее элементов. Различные комбинации насыщенности и связности, выраженные ячейками 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.

Далее, 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. Эту 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 и периферийные территории узловых районов относятся к ткани. В данной модели наиболее выпукло проявляется обоснование введения термина «градостроительная система»: каждый узловый район фактически представляет собой небольшую автономную градостроительную систему. Кроме того, развитие каждого узла проходит те же две фазы, что и каркасно-тканевая система. На такой самоподобный принцип развития системы, аппликативную динамику, указывал каждый из исследователей; там, где А.А. Высоковский использовал метафору ризомы как характеристику принципа пространственного развития города, М. Бэтти применил более формальное понятие «фрактал».

Территориальные элементы территориально-коммуникационной модели можно описать как узловые районы неравномерно-районированной модели разной степени структурированности; и наоборот — уровень структурной развитости узловых районов и потенциал их развития можно измерить с помощью оценочной матрицы. Эффективность пространственной организации территорий в территориально-коммуникационной модели описывается путем свертки критериев насыщенности и связности, а в неравномерно-районированной — через дистанции, где чем ниже дистанция, тем выше уровень организации. При этом значения оценочной матрицы можно интерпретировать в терминах дистанций от первого элемента, где элемент, характеризующийся как «эталонный», с наи-

большими 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 своих теоретических аспектах клеточно-фрактальная модель, которая «подытоживает» ряд прикладных моделей, также имеет много общего с представленными отечественными моделями. Во-первых, само ее появление обусловлено обобщением идей о том, как города организованы и структурированы в рамках «новой науки о городе» — аналогично тому, как каркасно-тканевая модель возникла в рамках общей теории городского развития. Во-вторых, тезис о повышении коммуникативности города как основного вектора его эволюционного развития у М. Бэтти сформулирован как один из фундаментальных «законов масштабирования» города. В-третьих, клеточный автомат является достаточно гибким инструментом, чтобы использовать его в качестве программной основы каждой из описанных моделей. Однако аналитический инструмент неравномерно-районированной модели изначально близок клеточному автомату. Принципиальным отличием является то, что в неравномерно-районированной модели сетка ячеек не регулярная, а «настраивается» под существующую морфологию. При этом методика выявления пространственного тренда путем оценки плотности застройки территории с оценкой вероятности распространения этого тренда на другие территории в терминах клеточной модели выражается как правила перехода.

В моделях отводится важное место репрезентации проблематики поведения людей. Согласно взглядам А.А. Высоковского, движущей силой эволюции градостроительной системы является поведение людей, структурирующих пространство вокруг себя. Дальнейшим драйвером развития, согласно неравномерно-районированной модели, является инерционная составляющая сложившихся структур землепользования. Согласно интегрированным моделям, развитием движет спрос на пространство и транспорт, описываемый экономическими теориями и математическими уравнениями. Подход

М. Бэтти вернул эту проблему на уровень индивидуальных решений, формирующих пространственные структуры «снизу-вверх».

В терминах рассмотренных моделей эволюция градостроительной системы 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. Дихотомии, отраженные в синтаксисе 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 непрерывном циклическом процессе — перераспределении некоторых свойств, или признаков, между двумя структурообразующими элементами системы. Эти элементы занимают по итогам перераспределения некоторое состояние, промежуточное между двумя крайними, что ведет к изменению пространственно-функциональной структуры градостроительной системы и в конечном счете — ее эволюции.

Таким образом, было продемонстрировано, что 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.

Эвристические основания моделей эволюционного развития градостроительной системы

При изложении теории общего городского развития А.Э. Гутновым 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. Дальнейшая программа исследований включает изучение строения градостроительной системы (статическое описание), функционирования системы (динамическое описание), развития системы во времени (описание эволюционной динамики) [Гутнов, 1984].

Критическая необходимость осуществления третьего этапа программы для завер-

шения 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 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 одно-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 [Гутнов, 1984].

Хотя программа исследований была задана более тридцати лет назад, можно утверждать, что на сегодняшний день она не до конца реализована. Таким образом, формально теория общего городского развития является убедительной, но не полностью доказанной гипотезой. Несмотря на это, теория и модели, явным или неявным образом построенные на ней, используются на практике, поскольку предлагают 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 [Romanycia, Pelletier, 1985].

Применительно к градостроительным системам обычно используется понятие математических моделей. Однако, строго говоря, математическое моделирование городов означает применение математических инстру-

ментов 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 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. Именно поэтому в настоящее время получают развитие альтернативные, так называемые агентные транспортные модели [McNally, 2000].

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.

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 к размещению общественно-деловой застройки, или только к выбору configura-

ции 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.

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

Также список условий принадлежности модели к классу эвристических был предложен советским кибернетиком Н.М. Амосовым [Амосов, 1979]. 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. 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 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» [Амосов, 1984].

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 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.

Заключение

Было продемонстрировано, что динамические структурно-функциональные модели градостроительной системы укладываются в рамки общей теории городского развития А.Э. Гутнова. Было также показано, что такие городские модели по своей природе являются эвристическими, так как удовлетворяют всем основным соответствующим критериям этого класса моделей.

С точки зрения методологии эти теоретические результаты задают возможное направление дальнейшего развития моделей. Локальные задачи проектирования эффективной функционально-пространственной организации той или иной городской подсистемы целесообразно формулировать как частные случаи общей задачи проектирования градостроительной системы. Эту задачу решают описанные выше модели. Хотя они являются отражением общей теории, в некоторых аспектах они требуют формализации и операционализации. «Локальная» модель строится путем поэтапного уточнения отдельных компонентов общей модели градостроительной системы и механизмов взаимодействия между ними. Таким образом,

учет эволюционного характера городского развития позволяет обеспечить долгосрочность и устойчивость предлагаемых такими моделями проектных решений.

Представляется, что из всех рассмотренных моделей территориально-коммуникационная модель является наиболее гибкой. Во-первых, модель базируется на фундаменте каркасно-тканевой теории, то есть является первым этапом в операционализации эволюционной гипотезы. Во-вторых, модель позволяет «надстраивать» дополнительные прикладные инструменты путем формализации методов количественного расчета парамет-

ров территориальных элементов системы — насыщенности и связности. Так, поскольку связность территорий обеспечивается транспортной инфраструктурой, модель «открыта» для включения явной репрезентации последней.

Подобный методический подход обеспечивает преемственность проектирования городских моделей, которые строятся для разных локальных задач, но для единой цели — проектирования эффективной функционально-пространственной организации градостроительной системы.

Источники

- Амосов Н.М. (1979) Алгоритмы разума. Киев: Наукова думка.
- Амосов Н.М. (1984) Книга о счастье и несчастьях. М.: Молодая гвардия.
- Баевский О.А. (1989) Закономерности непрерывного развития жилой среды крупнейшего города (на примере Москвы) // Экология города и проблемы управления.
- 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.
- Баевский О.А. (2016) Территориальное планирование и проектирование на основе исследования пространственной структуры города: курс лекций / Высшая школа урбанистики имени А.А. Высоковского.
- Высоковский А.А. (1986) Пространственное прогнозирование застройки сложившихся городов. Сер.: Гражданское строительство и архитектура. М.: ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре.
- Высоковский А.А. (2005) Правила землепользования и застройки: руководство по разработке. Опыт введения правового зонирования в Кыргызстане. Бишкек: Ега-Басма.
- Высоковский А.А. (2015) Теория пространственного развития: курс лекций // Высоковский А.А.: в 3 т. Т. 3. Public. М.: Grey Matter. С. 126–315.
- 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.
- Котов Е.А., Гончаров Р.В., Новиков А.В., Никогосян К.С., Городничев А.В. (2016) Москва: курс на полицентричность. Оценка эффектов градостроительных проектов на полицентрическое развитие Москвы.
- Родоман Б.Б. (1999) Территориальные ареалы и сети. Очерки теоретической географии. Смоленск: Ойкумена.
- 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.
- Alonso W. (1965) Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Batty M. (2005) Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models and fractals. Cambridge, MA: MIT Press.
- Batty M. (2008) Fifty Years of Urban Modelling: Macro Statics to Micro Dynamics // The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach. Heidelberg: Physica-Verlag. P. 1–20.
- Batty M. (2012) Building a science of cities // Cities. Vol. 29. P. 9–16.
- Batty M., Xie Y. (1994) From cells to cities // Environment and Planning B. No. 21. P. 31–48.
- Batty M., Coucleis H., Eichen M. (1997) Urban systems as cellular automata // Environment and Planning. No. 24. P. 159–164.
- Blumenfeld H. (1964) Criteria for urban form // The Annals of the American Academy of Political and Social Science. Vol. 352.
- Burgess E.W. (1924) The Growth of the City: An Introduction to a Research Project // Publications of the American Sociologist Society. Vol. 18. P. 142–155.
- Chang J. (2006) Models of the relationship between transport and land-use: A review // Transport Reviews. No. 26. P. 325–350.

- Harris C.D., Ullman E.L. (1945) The Nature of Cities // The Annals of the American Academy of Political and Social Science. Vol. 242. P. 7–17.
- Horowitz A.J. (2004) Lowry-type land use models // Handbook of transport geography and spatial systems. P. 167–183.
- Hoyt H. (1939) The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities. Chicago, IL: Chicago University Press.
- Iacono M., Levinson D., El-Geneidy A. (2008) Models of transportation and land use change: A guide to the territory // Journal of Planning Literature. No. 22. P. 323–340.
- Lowry I. (1964) A Model of Metropolis. Santa Monica, CA: RAND Corporation.
- Lundqvist L. (2003) Land-Use and Travel Behaviour. A Survey of Some Analysis and Policy Perspectives // European Journal of Transport and Infrastructure Research. No. 3. P. 299–313.
- McNally M. (2000) The Activity-Based Approach // Handbook of Transport Modeling. Pergamon. P. 53–70.
- Miller E. (2003) Microsimulation // Transportation systems planning: Methods and applications.
- Romanycia M.H.J., Pelletier F.F. (1985) What is a heuristic? // Computational Intelligence. Vol. 1. No. 1. P. 47–58.
- Silva E., Wu N. (2012) Surveying models in urban land studies // Journal of Planning Literature. No. 27. P. 139–152.
- Sivakumar A. (2007) Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies. L.: Imperial College.
- Southworth F. (1995) 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.
- Timmermans H. (2003) The saga of integrated land use-transport modeling: How many more dreams before we wake up? Режим доступа: http://www.ivt.ethz.ch/news/archive/20030810_IATBR/timmermans.pdf (дата обращения: 01.05.2017).
- White R., Engelen G. (1993) Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns // Environment and Planning A. Vol. 25. P. 1175–1199.

MAKSIMILIAN GOSTEV

ON THE HEURISTIC NATURE OF EVOLUTIONARY URBAN DEVELOPMENT MODELS

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.
- Alonso W. (1965) Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Amosov N.M. (1979) Algoritmy razuma. Kiev: Naukova dumka. (In Russian)
- Amosov N.M. (1984) Kniga o schast'e i neschast'jah. Moscow: Molodaja gvardija. (In Russian)
- Baevsky O.A. (1989) Zakonomernosti nepreryvnogo razvitiya zhiloy sredy krupnejshego goroda (na primere Moskvy). *Jekologija goroda i problemy upravlenija*. Moscow. (In Russian)
- Baevsky O.A. (2001) Jevoljucionnyj podhod k upravleniju gradostroitel'nym razvitiem krupnejshego goroda. Moskovskij opyt. *Gradostroitel'stvo Rossii XXI veka*. Sbornik nauchnyh statej RAASN. Moscow: Moskovskie uchebniki i kartolitografija. (In Russian)
- Baevsky O.A. (2016) Kurs lekcij "Territorial'noe planirovanie i proektirovanie na osnove issledovanija prostranstvennoj struktury goroda" // Vysshaja shkola urbanistiki imeni A.A. Vysokovskogo. (In Russian)
- Batty M. (2005) Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models and fractals. Cambridge, MA: MIT Press.
- Batty M. (2008) Fifty Years of Urban Modelling: Macro Statics to Micro Dynamics. *The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach*. Heidelberg: Physica-Verlag, pp. 1–20.
- Batty M. (2012) Building a science of cities. *Cities*, vol. 29, pp. 9–16.
- Batty M., Xie Y. (1994) From cells to cities. *Environment and Planning B*, no 21, pp. 31–48.
- Batty M., Coucleis H., Eichen M. (1997) Urban systems as cellular automata. *Environment and Planning*, no 24, pp. 159–164.
- Blumenfeld H. (1964) Criteria for urban form. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, vol. 352.

Maksimilian Gostev, Geography and Cartography Department Assistant of Kazan (Volga region) Federal University, Specialist in Applied Mathematics and Computer Science (Kazan Federal University), Master in Urban Planning (Vysokovsky Graduate School of Urbanism, HSE); 6/20 Kremlevskaya Street, Kazan, 420111, Russian Federation.

E-mail: mailtogmv@gmail.com

Abstract

This article focuses on a comparative analysis of four dynamic structural-functional urban models: carcass-fabric, territorial-communicatory, irregularly-zoned, and cellular-fractal. It is demonstrated that these models fit the framework of Gutnov's general evolutionary urban development theory. It is shown that these models are heuristic in nature.

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

Citation: 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). DOI: <https://doi.org/10.17323/usp3120187-22>

- Burgess E.W. (1924) The Growth of the City: An Introduction to a Research Project. *Publications of the American Sociologist Society*, vol. 18, pp. 142–155.
- Chang J. (2006) Models of the relationship between transport and land-use: A review. *Transport Reviews*, no 26, pp. 325–350.
- Gutnov A.E. (1984) Jevoljucija gradostroitel'stva. Moscow: Strojizdat. (In Russian)
- Gutnov A.E. (1985) Sistemnyj podhod v izuchenii goroda: osnovanija i kontury teorii gorodskogo razvitiya. *Sistemnye issledovanija. Metodologicheskie problemy*. Moscow: Nauka, pp. 211–232. (In Russian)
- Harris C.D., Ullman E.L. (1945) The Nature of Cities. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, vol. 242, pp. 7–17.
- Horowitz A.J. (2004) Lowry-type land use models. *Handbook of transport geography and spatial systems*, pp. 167–183.
- Hoyt H. (1939) The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities. Chicago, IL: Chicago University Press.

- Iacono M., Levinson D., El-Geneidy A. (2008) Models of transportation and land use change: A guide to the territory. *Journal of Planning Literature*, no 22, pp. 323–340.
- Kotov E.A., Goncharov R.V., Novikov A.V., Nikogosyan K.S., Gorodnichev A.V. (2016) Moskva: kurs na policentrichnost'. Ocenka ehffektov gradostroitel'nyh proektov na policentricheskoe razvitie Moskvyy. Moscow. (In Russian)
- Lowry I. (1964) A Model of Metropolis. Santa Monica, CA: RAND Corporation.
- Lundqvist L. (2003) Land-Use and Travel Behaviour. A Survey of Some Analysis and Policy Perspectives // *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, no 3, pp. 299–313.
- McNally M. (2000) The Activity-Based Approach. *Handbook of Transport Modeling*. Pergamon, pp. 53–70.
- Miller E. (2003) Microsimulation. *Transportation systems planning: Methods and applications*.
- Rodoman B.B. (1999) Territorial'nye arealy i seti. Ocherki teoreticheskoy geografii. Smolensk: Ojkumena. (In Russian)
- Romanycia M.H.J., Pelletier F.F. (1985) What is a heuristic? *Computational Intelligence*, vol. 1, no 1, pp. 47–58.
- Silva E., Wu N. (2012) Surveying models in urban land studies. *Journal of Planning Literature*, no 27, pp. 139–152.
- Sivakumar A. (2007) Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies. London: Imperial College.
- Southworth F. (1995) 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.
- Timmermans H. (2003) The saga of integrated land use-transport modeling: How many more dreams before we wake up? Available at: http://www.ivt.ethz.ch/news/archive/20030810_IATBR/timmermans.pdf (accessed 1 May 2017).
- Vysokovsky A.A. (1986) Prostranstvennoe prognozirovanie zastrojki slozhivshijsja gorodov. Serija: Grazhdanskoe stroitel'stvo i arhitektura. Moscow: CNTI po grazhdanskomu stroitel'stvui arhitekture. (In Russian)
- Vysokovsky A.A. (2005) Pravila zemlepol'zovanija i zastrojki: rukovodstvo po razrabotke. Opyt vvedenija pravovogo zonirovanija v Kyrgyzstane. Bishkek: Ega-Basma. (In Russian)
- Vysokovsky A.A. (2015) Kurs lekcij "Teoriya prostranstvennogo razvitija" // Vysokovsky Aleksandr: 3 vol. Vol. 3. Public. M.: Grey Matter, pp. 126–315. (In Russian)
- White R., Engelen G. (1993) Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, vol. 25, pp. 1175–1199.