
РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

АГЕНТО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ МОСКВЫ*

© 2013 г. М.Р. Фаттахов

(Москва)

Рассмотрен мировой опыт мониторинга устойчивого развития городов. Дано описание нового подхода к моделированию сложной городской среды – агенито-ориентированной модели. На основе разработанной модели проведен анализ основных направлений развития г. Москвы и выполнен долгосрочный прогноз социально-экономических показателей его развития на период до 2025 г.

Ключевые слова: город, мегаполис, устойчивое развитие города, агенито-ориентированная модель, экономико-математическая модель, социально-экономическое развитие региона.

1. УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ГОРОДОВ И МЕТОДЫ ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Города сегодня растут беспрецедентно высокими темпами, формируются крупные мегаполисы и агломерации, устанавливающие социально-экономические, политические, культурные и экологические правила в мировом хозяйствовании. Еще 50 лет назад только одна треть населения планеты жила в городах, но уже к 2000 г. больше половины жителей Земли (более 3 млрд человек) стали горожанами. По данным ООН, к 2050 г. численность городского населения продолжит расти и составит две трети общей численности людей на планете, или 6 млрд человек.

Города являются многонациональными центрами производства и потребления товаров и услуг, ядрами формирования территориальных экономических комплексов и инновационных кластеров. Крупнейшие мегаполисы с высоким уровнем жизни населения играют все большую роль в стягивании демографического, инновационного и научно-образовательного потенциала. Происходит активное включение крупных городских региональных агломераций в мировую распределительную систему управления глобальными процессами.

Таким образом, устойчивая урбанизация и устойчивое развитие городов является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед мировым сообществом в XXI в. Сбалансированный рост городов является своего рода катализатором стабильного регионального и общенационального развития (Фаттахов, Бахтизин, 2010).

Для анализа и прогнозирования развития городов традиционно использовались средства математического моделирования. Так, в 1950-е и 1960-е годы был разработан ряд моделей, связанных с территориальным зонированием города, демографией, транспортом и другими аспектами развития городской среды. Многие из методов и подходов, применяемые в те годы для моделирования развития городского хозяйства, успешно используются и в настоящее время.

На сегодняшний день для моделирования городов преимущественно применяется так называемый региональный подход в экономике, известный еще с 1960-х годов. Подход основан на анализе потоков данных, например числе рабочих мест в том или ином районе города, между различными городами, регионами (элементарными единицами модели). В качестве недостатков данного подхода можно отметить использование агрегированных данных и высокие требования к производительности вычислительных систем. Примеры использования регионального подхода в моделировании жилой динамики городов можно найти в работах Л. ван Виссена и А. Рима (Wissen, Rima, 1988), М. Бэтти и П. Лонгли (Batty, Longley, 1994).

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект 11-02-00149а).

Вместе с региональным подходом широкое распространение получили следующие методы:

- статистические методы анализа и прогнозирования;
- модели, основанные на системах уравнений;
- модели системной динамики;
- дифференциальные уравнения;
- вычислимые модели общего равновесия;
- клеточные автоматы.

Несмотря на популярность описанных выше инструментов, а также на колоссальный опыт их использования для решения задач моделирования городской среды, необходимо отметить следующие недостатки их использования:

- модели имитировали только один из аспектов системы;
- статичность моделей городов;
- перед учеными и исследователями становилась проблема дезагрегирования переменных модели для достижения более полного описания процессов и явлений, протекающих в реальном мире;
- моделирование только “среднего” поведения системы;
- отсутствие визуализационных и интерактивных аспектов работы модели.

Кроме того, слабость гравитационных, энтропийных или транспортных моделей (в чистом виде) заключается в том, что слишком многие существенные характеристики городской среды считаются несущественными: в них не учитываются духовное, символическое, эстетическое пространства города при распределении площадей и определении ценности места. К тому же модели клеточного автомата городов очень чувствительны к правилам перехода и значениям их параметров. Кроме того, все автоматы одинаковы, имеют те же правила перехода, и все переходы являются синхронными. При этом правила перехода, заданные в начале симуляции, не меняются во времени, т.е. в модели нет автономного динамического поведения. В клеточном автомате отсутствуют агенты как лица, принимающие решения, изменения происходят только на уровне среды.

Усредненные показатели, содержащие тысячи элементов, например домохозяйства или люди, делают большинство описанных выше подходов нечувствительными к поведению отдельных агентов. Индивидуальное поведение нельзя недооценивать с точки зрения моделирования развития городов, зачастую оно имеет очень серьезный глобальный характер (например, вспышки эпидемий, революции и т.д.). Эти ограничения, а также все вышеперечисленные недостатки привели к созданию и развитию нового подхода к моделированию, позволяющего учесть “человеческий” характер развития жилой динамики города – агенто-ориентированного подхода (Batty, 2007; Benenson, 2004).

2. АГЕНТО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД

Ключевым инструментарием исследования, анализа, разработки прогнозов и сценариев развития городов становятся математические методы моделирования. Современные модели мегаполисов должны отражать различные аспекты жизнедеятельности города (демографию, миграцию, транспорт, экологию и др.), а также учитывать индивидуальное поведение его жителей, быть гибкими и способными предсказывать поведение городской системы на микроуровне в результате взаимодействия модельных агентов. Еще одной немаловажной составляющей современной модели развития городов должны стать визуализационные и интерактивные аспекты ее работы.

В качестве актуального подхода, вобравшего в себя все эти требования к моделированию сложной городской среды, выступает построение нового класса экономико-математических моделей – агенто-ориентированных моделей (далее – АОМ) или мультиагентных моделей, известных в зарубежной литературе как Agent-Based Modeling (ABM).

Агенто-ориентированные модели – специальный класс вычислимых моделей, основанных на индивидуальном поведении множества агентов, и создаваемых для компьютерных симуляций. Они сочетают в себе элементы теории игр, сложных систем, вычислительной социологии, метода Монте-Карло и эволюционного программирования (Бахтизин, 2008).

Основная идея данного подхода как метода имитационного моделирования заключается в построении вычислительного инструмента, представляющего собой множество агентов с определенным набором свойств и правил поведения. Здесь заложен принцип моделирования “снизу вверх”, т.е. деятельность независимых агентов на микроуровне влияет на показатели макроуровня. При этом простые правила, заложенные в модели, могут давать весьма интересные результаты и предсказывать появление сложных, глобальных явлений (так называемый “эмерджентный феномен”).

Агенто-ориентированное моделирование неразрывно связано с двумя понятиями – “агент” и “среда”. В АОМ не существует точного определения термина “агент”, оно является предметом широких дискуссий. “Агент” – интеллектуальная автономная компьютерная сущность, находящаяся в окружающей ее среде и взаимодействующая с другими подобными сущностями для достижения целей своего существования.

В качестве агентов в АОМ выступают вирусы, животные, роботы, люди, инфраструктура, города, страны, а не только экономические агенты (домохозяйства, предприятия, государство и внешний мир) – субъекты экономических отношений, принимающие участие в производстве, распределении, обмене и потреблении экономических благ в классическом понимании. Неоднородность агентов является важным аспектом агенто-ориентированного подхода. Если в начале моделирования АОМ все агенты были одинаковыми, то с течением времени они могут изменяться или эволюционировать ввиду различного характера поведения, наличия или отсутствия определенных ресурсов, используемых методов принятия решений, получаемых в процессе существования данных, дальности горизонта виденья, различных способностей к обучению и адаптации.

В качестве основных свойств и атрибутов агентов АОМ можно выделить: автономность, интеллектуальность, репрезентативность, расположенность во времени и пространстве, наличие жизненного цикла, независимость агентов от разработчика или внешнего оператора, взаимодействие, целеустремленность, способность воспринимать мир, обучаться и адаптироваться, наличие у агента ресурса.

Среда – пространство (совокупность объектов, ландшафта), окружающее совокупность агентов одного или нескольких видов, определяющее условия их функционирования и оказывающее на них прямое или косвенное воздействие.

В АОМ среда представляет собой непрерывное пространство заданной формы и размера (среда может быть представлена в виде геоинформационной системы), характеризуется возможными состояниями, сферами влияния, определенными правилами динамического изменения и многим другим. В ряде случаев среда может быть представлена в виде дискретной решетки (состоящей из квадратов, треугольников или шестиугольников) или пассивной платформы для агентов, что существенно ограничивает потенциал модели.

На сегодняшний день АОМ применяется во многих областях, охватывающих социальные, физические и биологические аспекты жизнедеятельности человека. Так, благодаря относительной простоте отображения агентов в социальных системах и их естественной иерархической самоорганизации Л. Тасфатсон и Р. Аксельрод (Borrill, Tesfatsion, 2010) считают именно решение задач социологии и экономики приоритетным направлением использования агенто-ориентированного подхода. Социальные науки стремятся понять не только, как ведут себя люди, но и то, как они взаимодействуют между собой и окружающим их миром, как эти пространственные взаимодействия приводят к глобальным изменениям системы. При этом зачастую результатом их деятельности становится синергетический эффект, изучение которого представляет особый интерес для ученых. Агенто-ориентированный подход в моделировании социально-экономических явлений позволяет явным образом моделировать индивидуальное поведение и взаимодействие агентов модели. Таким образом, АОМ является удобным инструментарием моделирования таких сложных объектов, как городские системы.

Разработанная в ходе проведенного исследования Комплексная агенто-ориентированная модель развития городов (Complex Agent-Based Model of Urban Development, далее – CABMUD) состоит из 5 блоков и представлена двумя типами агентов: это люди – жители города и предприятия (Фаттахов, 2011). В качестве среды модели выступают районы города, линии общественного транспорта и дороги общего пользования (рис. 1).

В процессе работы модели люди взаимодействуют с другим видом агентов – предприятиями (тип связи агент–агент), т.е. они либо уже работают и получают ежемесячный доход, либо находятся на бирже труда и ищут работу (рис. 1, стрелка 1).

Взаимодействуя со средой модели (тип связи агент–среда), агенты проживают в районах города (рис. 1, стрелка 2). Здесь они платят цену проживания (платежи ЖКХ, арендную плату). Агенты могут изменить район проживания, исходя из своих предпочтений или текущего финансового положения.

Перемещаясь между домом и работой, агенты-люди взаимодействуют с еще двумя видами среды – дорогами общего пользования (рис. 1, стрелка 3) и общественным транспортом (рис. 1, стрелка 4). От выбора типа транспорта зависит размер ежемесячных расходов и время, проведенное агентами в пути.

Аргументами данного типа агентов являются: возраст, память, денежный баланс, размер ежемесячного дохода, район проживания, район работы, время начала рабочего дня, размер ежемесячных транспортных расходов, наличие или отсутствие личного транспортного средства.

Неоднородность моделируемого объекта (города) достигается благодаря различной комбинации атрибутов (характеристик) агентов, что влияет на их поведение и правила принятия решений. Атрибуты задаются из внешней по отношению к модели статистической базы данных в виде вероятностного распределения величин, а не как средние значения.

Поведение агентов модели описывается диаграммой состояний (рис. 2), необходимой для выделения нескольких состояний у агентов, последовательно сменяющих друг друга при возникновении определенных событий или в ходе ответной реакции на изменившуюся среду. Различные состояния влияют на методы принятия решений и типы поведения агентов модели. Агенты-люди могут находиться в одном из четырех состояний: удовлетворения, нейтральном, недовольства и в состоянии ожидания.

Функционирование агентов-предприятий в модели рассматривается с позиции их взаимодействия с агентами-людьми, т.е. описывается механизмами найма и увольнения работников, выплаты ежемесячной заработной платы и т.д. (рис. 1, стрелка 1).

Предприятия, находящиеся в районах города, взаимодействуют со средой путем внесения ежемесячной арендной платы (рис. 1, стрелка 5). Размер аренды устанавливается посредством рыночных механизмов, т.е. под влиянием спроса и предложения на коммерческую недвижимость в данном конкретном районе города.

В качестве аргументов данного типа агента выступают: район фактического размещения, денежный баланс предприятия, штат работников, фонд заработной платы, число свободных вакансий на предприятии, максимальное число рабочих мест. Поведение данного типа агента, также как и людей, описывается диаграммой состояний и зависит от состояния, в котором он находится.

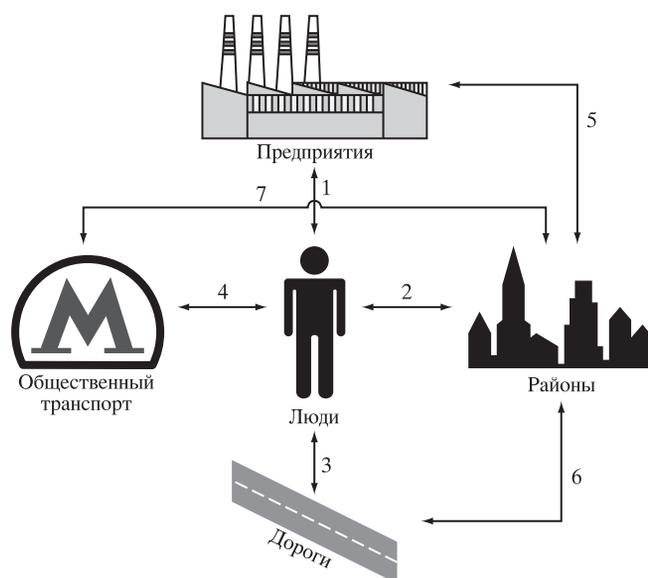


Рис. 1. Концептуальная схема АОМ развития городов

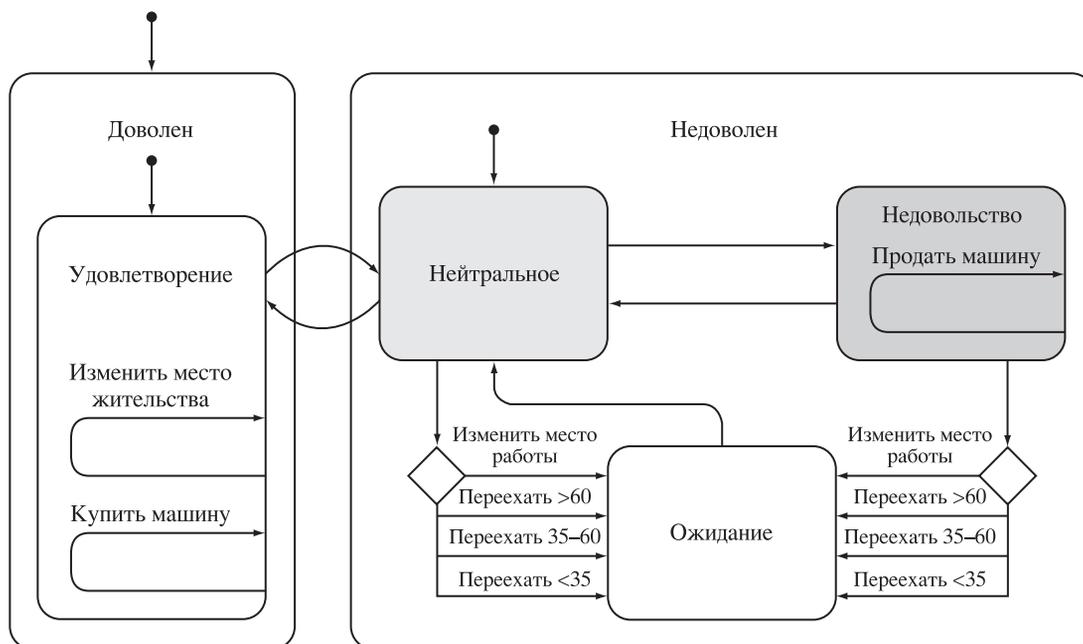


Рис. 2. Диаграмма состояний агентов-людей АОМ развития городов

В Комплексной агенто-ориентированной модели развития городов реализован принцип иерархического построения среды. На верхнем уровне находятся районы города. В них находятся агенты модели: люди, проживающие в районах, и предприятия, осуществляющие в них свою деятельность, а также два других типа среды (низшего уровня): дороги общего пользования (рис. 1, стрелка 6) и линии общественного транспорта (рис. 1, стрелка 7). Наличие развитой инфраструктуры и благоприятный экологический фон сказывается на привлекательности района как места проживания агентов-людей.

Районы характеризуются числом жителей и предприятий, осуществляющих в них свою деятельность, стоимостью услуг ЖКХ, размерами арендных ставок на коммерческую недвижимость, размерами жилищного фонда и коммерческих и производственных площадей, уровнем комфорта района, размером субсидий по оплате услуг ЖКХ, налоговыми льготами и преференциями для предприятий, числом мигрантов из других районов города.

Дороги и общественный транспорт, которыми пользуются агенты-люди, располагаются внутри районов и являются связующими звеньями между ними. Участки дорог и линии общественного транспорта являются ребрами сетевого графа, а перекрестки и остановки – его вершинами. В данном блоке определяется начало и конец маршрута, а также время, проведенное агентами в пути, с учетом “пробок” и ограничений скорости на конкретных участках дороги.

3. АГЕНТО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ МОСКВЫ

В качестве объекта исследования особый интерес представляет город Москва – как современный динамично развивающийся мегаполис, обладающий колоссальным потенциалом экономического роста и качественного развития городской среды. Становится очевидным, что сложившаяся на этапе перехода к рыночным методам хозяйствования парадигма развития мегаполиса, ориентированная в первую очередь на создание “капиталистического города” и привлечение в него инвестиций любыми способами, себя полностью изжила и нуждается в скорейшей трансформации. Наблюдаемый заметный отрыв Москвы от других регионов по показателям уровня жизни приводит к неумеренному притоку людей в мегаполис. Ограниченность географического пространства города, перенасыщенность Москвы населением деформирует демографиче-

скую структуру города, обостряет жилищную и транспортную проблемы, проблему занятости, углубляет имущественное и доходное неравенство москвичей. В силу отмеченных обстоятельств устойчивое социально-экономическое развитие г. Москвы требует решения ряда сложных проблем. Становится актуальным выход на качественно новые целевые рубежи – развитие мегаполиса как зоны с высоким уровнем жизни населения.

Для обеспечения устойчивого социально-экономического развития столицы как зоны с высоким уровнем жизни населения нами была разработана Комплексная агента-ориентированная модель социально-экономического развития Москвы (далее – САВМUD г. Москвы), позволяющая разрабатывать стратегический курс развития города в среднесрочной и долгосрочной перспективе, а также проигрывать сценарии развития столицы с учетом уровня комфортности проживания ее жителей.

Для реализации САВМUD г. Москвы нами использовался специализированный программный продукт – AnyLogic. Несмотря на поддержку принципа визуального построения модели “drag and drop” и имеющийся набор встроенных библиотек в AnyLogic, при разработке АОМ развития городов было написано более 17 тысяч строк программного кода. Модель полностью дублирована на английском языке.

САВМUD г. Москвы в среде AnyLogic состоит из 11 блоков: пять элементов агента-ориентированной модели, описанных выше (агенты-люди, агенты-предприятия, районы города, линии общественного транспорта и дороги общего пользования) и шесть дополнительных блоков: главного, двух графических, воспроизведения модели, записи видео и узлов-элементов транспортных сетей города.

Главный блок – интегрирующий, он обеспечивает связь всех частей модели. Здесь производится расчет интегральных показателей, находятся механизмы управления и синхронизации событий, инструменты визуализации и анимации модели, проводится работа с внешней базой данных и многое другое. Графические блоки отвечают за визуализационные и анимационные аспекты работы модели. Блок воспроизведения необходим для компиляции программного кода и запуска модели как Java-приложения, здесь задается единица модельного времени, время начала и конца работы модели, осуществляется управление библиотеками классов. Блок записи видео позволяет записывать проводимые эксперименты в видеоформат, что облегчает сравнение различных сценариев развития системы и позволяет разрабатывать видеопрезентации и обучающие курсы. Блок узлов выступает в качестве вершин транспортных графов модели.

Интерфейс Комплексной агента-ориентированной модели развития г. Москвы в среде AnyLogic можно условно разделить на шесть элементов (рис. 3):

- 1) настройки характеристик работы модели и окна презентации;
- 2) ГИС города (карта города с нанесенными на нее слоями: районами, дорогами, людьми и т.д.);
- 3) интерактивной навигации по блокам модели;
- 4) на месте четвертого элемента интерфейса в зависимости от выбранной выше категории отображается: описание модели, перечень основных социально-экономических показателей, панель агентов-людей, агентов-предприятий района, панель транспорта и экологической обстановки в городе;
- 5) отображения слоев ГИС, атрибутов агентов модели (людей и предприятий), он содержит легенду и условные обозначения, используемые в модели;
- 6) строка состояния модели.

САВМUD г. Москвы была построена в масштабе 1:1000. Это означает, что все параметры модели – например численность населения, число предприятий и организаций, осуществляющих на территории города хозяйственную деятельность, пропускная способность дорог общего пользования, жилой фонд каждого района, а также и другие параметры – были поделены на 1000. Данный масштаб позволяет с запасом проводить ретроспективные исследования на модели и оптимальным образом использовать ресурсы современных компьютеров.

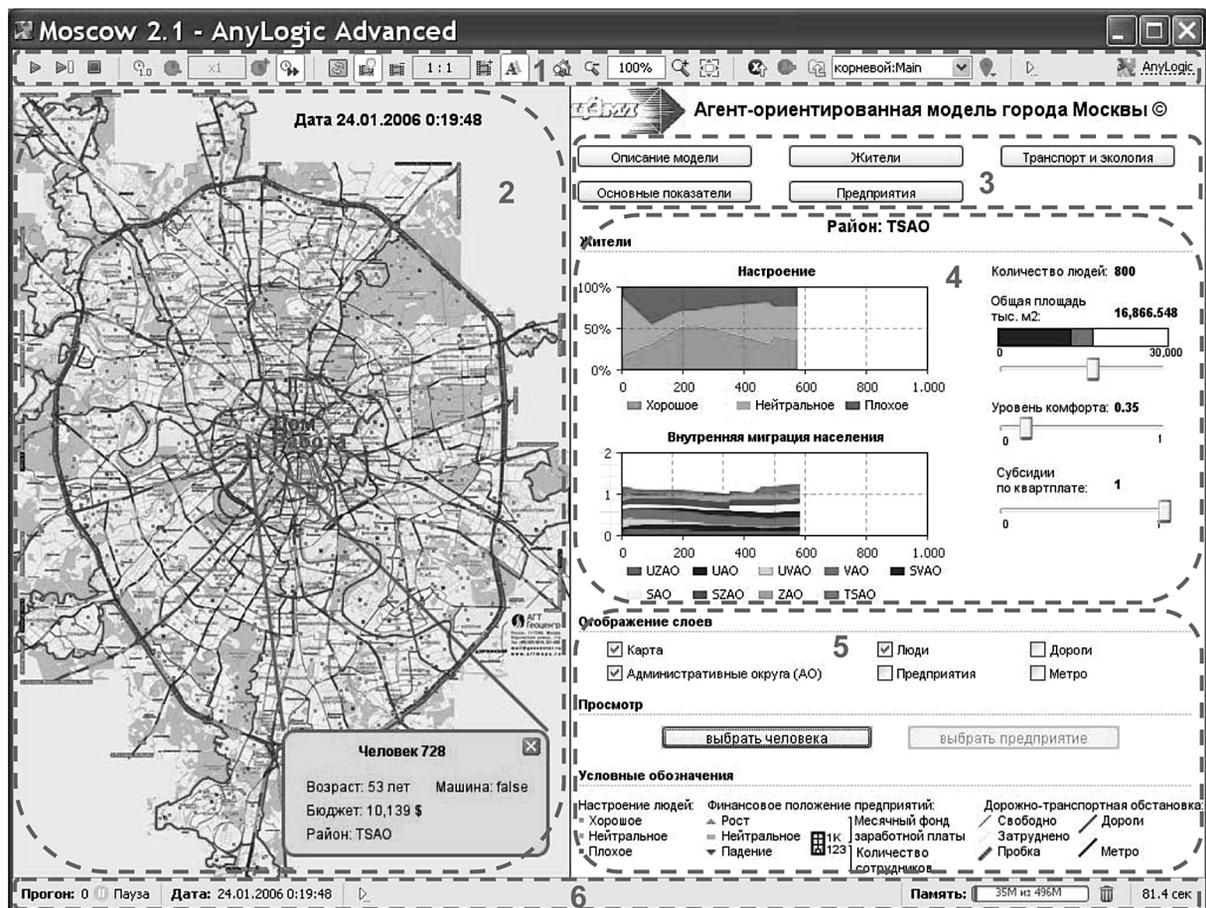


Рис. 3. Интерфейс CABMUD г. Москвы в среде AnyLogic

Принципы функционирования модели с отображением ГИС слоев “Карта г. Москвы”, “Административные округа”, слоя “Предприятия” (слева) и работы блока “Транспорт и экология” (справа) представлены на рис. 4.

В процессе оценки качества и прогностических характеристик CABMUD г. Москвы нами использовался накопленный мировой опыт исследований в данной области. При этом акцент был сделан на оценке прогностических характеристик модели посредством ретроспективного прогноза, проведении анализа чувствительности и построении набора траекторий для оценки влияния стохастических составляющих модели.

Для сопоставления результатов работы модели с фактическими данными с использованием статистических методов были выбраны следующие основные социально-экономические показатели (табл. 1):

- численность населения (на конец года), тыс. чел.;
- общая площадь жилых помещений, приходящаяся в среднем на одного жителя (на конец года) – всего, кв. м;
- среднедушевые денежные доходы (в месяц), руб.;
- удельный вес численности населения с денежными доходами ниже прожиточного минимума в общей численности населения субъекта, %;
- валовой региональный продукт всего, млн руб.;
- валовой региональный продукт на душу населения, руб.;
- число предприятий и организаций (на конец года);

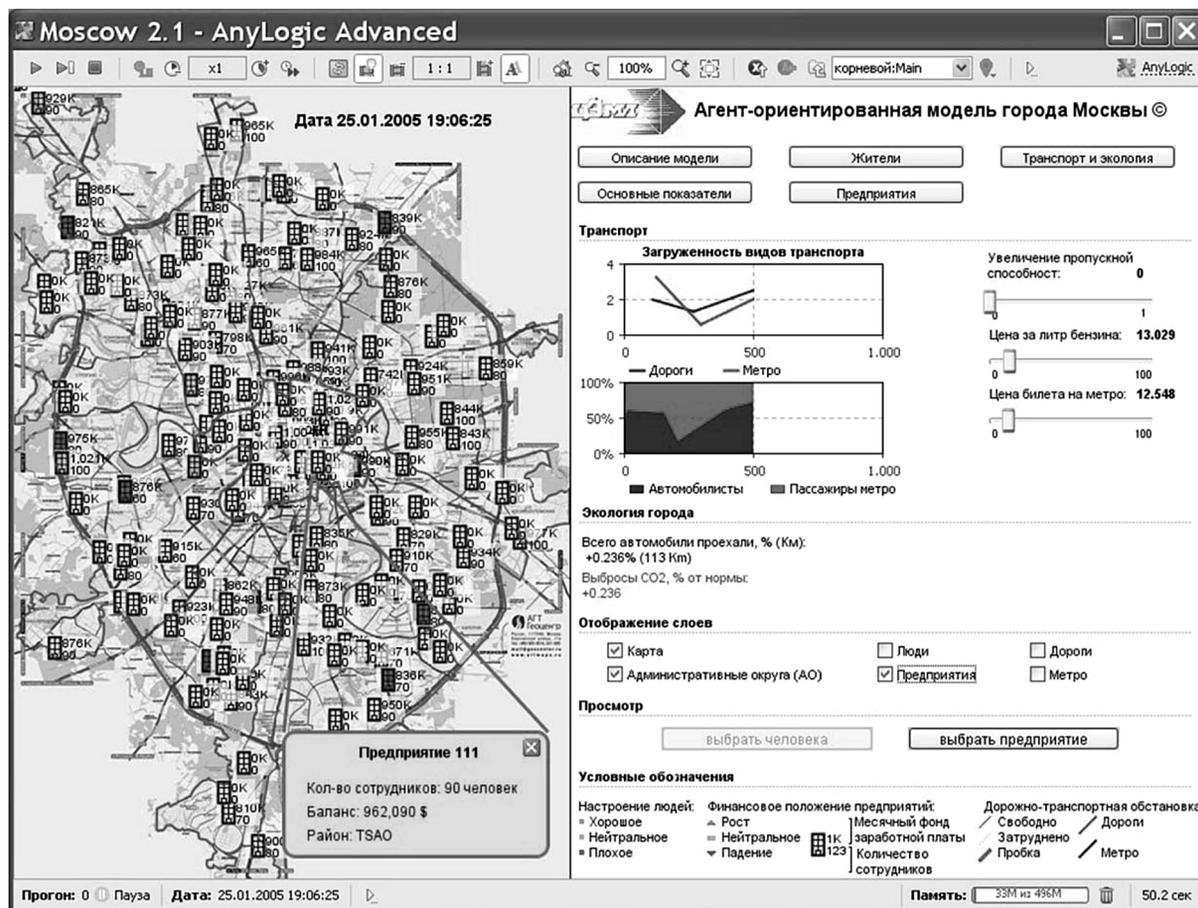


Рис. 4. Интерфейс CABMUD г. Москвы в среде AnyLogic

- среднегодовая численность работников организаций, тыс. чел.;
- уровень безработицы, %.

Проведенный в процессе оценки качества CABMUD г. Москвы анализ чувствительности показал высокую степень устойчивости модели к изменению ее параметров. При этом наибольшее влияние на результат моделирования оказывает изменение параметров перехода состояний (удовлетворенность, нейтральное, недовольство и ожидание) агентов-людей модели.

Для оценки влияния стохастической составляющей на результаты работы CABMUD нами был проведен многократный вычислительный эксперимент с использованием идентичных начальных параметров модели и построен набор траекторий по 9 основным показателям, описанным выше. Так, стандартное отклонение вариантов расчета (разброса траекторий) при 5-летнем горизонте планирования по всем показателям не превысило 1,5%.

Проведенный анализ прогностических характеристик Комплексной агента-ориентированной модели развития г. Москвы, а также анализ чувствительности параметров модели позволяет судить о высоком качестве, точности и надежности предложенного инструментария (построенной модели). Подбор вероятностных распределений используемых в CABMUD параметров позволил сохранить баланс между “свободой действия” модели и точностью прогнозируемых показателей.

Для обеспечения устойчивого развития и функционирования городской среды на основе CABMUD г. Москвы был построен среднесрочный и долгосрочный прогноз по 9 основным социально-экономическим показателям развития столицы на период до 2025 г. (табл. 2).

При сохранении сложившихся за последние годы в городе тенденций роста (заметим, что прогноз на основе CABMUD не является методом экстраполяции тенденций, т.е. не является ме-

Таблица 1. Характеристики прогностической пригодности САВМУД г. Москвы

Показатель	Стандартное отклонение (<i>SD</i>)	Средняя абсолютного значения относительной ошибки прогноза (<i>MAPE</i>), %	Коэффициент корреляции (<i>R</i>)	Коэффициент несоответствия Тейла
Численность населения (на конец года), тыс. чел.	376	2,79	0,9986	0,0102
Общая площадь жилых помещений, приходящаяся в среднем на одного жителя (на конец года), всего, кв. м	0,15	0,65	0,9844	0,0022
Среднедушевые денежные доходы (в месяц), руб.	1 627	4,35	0,9760	0,0152
Удельный вес численности населения с денежными доходами ниже величины прожиточного минимума в общей численности населения субъекта, %	2,05	15,62	0,7812	0,0441
Валовой региональный продукт всего, млн руб.	749 664	6,08	0,9513	0,0367
Валовой региональный продукт на душу населения, руб.	53 279	5,42	0,9579	0,0278
Число предприятий и организаций (на конец года; по данным государственной регистрации)	65 198	3,23	-0,0118	0,0172
Число предприятий и организаций (на конец года; по данным государственной регистрации) за 2006–2009 гг.	18 688	1,66	0,7222	0,0041
Среднегодовая численность работников организаций, тыс. человек	127	1,92	0,9038	0,0072
Уровень безработицы, %	0,62	29,82	0,5079	0,1345
Уровень безработицы, % (без учета данных 2009 г.)	0,27	25,42	0,8516	0,0592

тодом трендового прогнозирования), плавного перехода от естественной убыли к естественному приросту населения данного региона и стабилизации миграции из регионов России и сопредельных государств на уровне, не превышающем 85–95 тыс. человек в год, численность населения г. Москвы к 2025 г. будет находиться в диапазоне 12,75–13,0 млн человек.

Сохранение темпов застройки, освоение новых территорий за МКАД и строительство на них социального жилья позволит существенно улучшить условия проживания москвичей и увеличить к 2025 г. общую площадь жилых помещений, приходящуюся в среднем на одного жите-

Таблица 2. Прогноз основных социально-экономических показателей развития г. Москвы на 2015, 2020 и 2025 г.

Показатель	Год			
	2010	2015	2020	2025
Численность населения (на конец года), тыс. человек	11 336	11 683	12 194	12 899
Общая площадь жилых помещений, приходящаяся в среднем на одного жителя (на конец года), всего, кв. м	20,46	21,38	22,51	23,68
Среднедушевые денежные доходы (в месяц), руб.	45 196	72 741	126 978	223 635
Удельный вес численности населения с денежными доходами ниже величины прожиточного минимума в общей численности населения субъекта, %	12,11	8,98	8,76	10,10
Валовой региональный продукт всего, млрд руб.	9 589	15 411	24 338	43 609
Валовой региональный продукт на душу населения, руб.	845 932	1 319 054	1 995 876	3 380 898
Число предприятий и организаций (на конец года; по данным государственной регистрации)	1 100 550	1 162 407	1 214 418	1 282 671
Среднегодовая численность работников организаций, тыс. человек	5 479	6 181	6 692	7 187
Уровень безработицы, %	1,39	1,37	1,68	1,59

ля города, до 23,7 кв. м, что ниже запланированного в Актуализированном генеральном плане г. Москвы уровня в 25 кв. м.

В период с 2000 по 2009 г. (за 10 лет) прирост среднедушевого денежного дохода населения составил 524% (т.е. 19–35% ежегодно, за исключением 2008 г. – 3,6%), а к 2025 г. по сравнению с 2010 г. (за 15 лет) прирост составит 534%, что говорит о сохранении высоких темпов роста благосостояния жителей столицы. Ежегодный рост реального денежного дохода москвичей в среднем на 6–7% обеспечит стабильное улучшение уровня жизни всех слоев населения.

За счет увеличения реальных доходов населения и, как следствие, растущего уровня жизни москвичей удельный вес численности населения с денежными доходами ниже величины прожиточного минимума в общей численности населения г. Москвы к 2015 г. снизится до уровня 9%, после чего значение данного показателя будут варьировать в коридоре от 8 до 10%.

В период 2000–2009 гг. (за 10 лет) прирост валового регионального продукта составил 618% (18–45% ежегодно, за исключением 2009 г. – 13,2%). Поступательное развитие экономики города обеспечит дальнейшую положительную динамику макроэкономических показателей. Так, к 2025 г. по сравнению с 2010 г. (за 15 лет) прирост ВРП может составить до 400–450% при среднегодовом темпе роста показателя в 8–10%. В период до 2025 г. высокие темпы роста на уровне 9% также сохранит и показатель “валовой региональный продукт на душу населения”. К концу расчетного периода значение этого показателя составит 3381 тыс. руб. на человека (табл. 2).

Прирост числа предприятий и организаций на период до 2025 г., осуществляющих на территории г. Москвы экономическую деятельность, снизится по сравнению с уровнем прошлых лет и составит в среднем 12 тыс. новых предприятий ежегодно. Постоянный рост трудоспособного населения (в том числе и за счет мигрантов), увеличивающаяся маятниковая (трудова) мигра-

ция в мегаполис и постоянный рост числа предприятий города приведет в 2025 г. к увеличению среднегодовой численности работников организаций до уровня 7000–7200 тыс. человек.

После существенного снижения уровня безработицы с 7 до 3% в период 1995–2000 гг. данный показатель редко превышал 2%-ный порог. Так, только в 2009 г. вследствие экономического кризиса значение данного показателя составило 2,7%. Согласно разработанному прогнозу на период до 2025 г., уровень безработицы в Москве не превысит 2%, его ежегодное значение будет колебаться в коридоре 1,25–1,75%.

В ходе исследования был также проведен анализ дифференциации административных округов г. Москвы по доходам населения с использованием САВМУД г. Москвы (за 2009, 2015 и 2025 г. по отношению к 2002 г.)¹.

Так, наибольшее значение данного показателя наблюдается в Юго-Западном и Центральном административных округах (АО), при этом их отрыв от других АО будет с течением времени сглаживаться. В Восточном и Юго-Восточном АО наблюдается постепенная “деградация” показателя среднедушевого денежного дохода жителей и как следствие – снижение темпов роста уровня жизни населения в данных округах. Вместе с тем наблюдается выравнивание уровня жизни жителей Западного и Северо-Западного АО.

Проведенные расчеты основных социально-экономических показателей развития г. Москвы на период до 2025 г. позволяют судить о высоком потенциале мегаполиса и его дальнейшем устойчивом развитии. Однако эти результаты не отражают всех проблем, ограничивающих развитие города, снижающих качество и комфортность жизни москвичей.

С использованием разработанной САВМУД предложены сценарии решения, пожалуй, наиболее актуальной проблемы современной Москвы, затрагивающей большинство жителей столицы и области, – проблемы пробок (Макаров, Житков, Бахтизин, 2009).

Наряду с расширением дорожной сети и развитием общественного транспорта в качестве оперативных мер снижения уровня загруженности дорог общего пользования ряд чиновников регионального уровня и экспертов НИИ Транспорта и дорожного хозяйства г. Москвы (далее – НИИ ТДХ) высказывали предложения повысить стоимость бензина на заправках столицы. Так, по расчетам НИИ ТДХ, для решения проблем пробок в столице цену литра бензина необходимо повысить на 6 руб.

С использованием САВМУД г. Москвы были проведены сценарные расчеты и дана оценка эффективности предлагаемых демотивационных мер.

Первый сценарий предусматривает однократное повышение цен на бензин. В качестве целевого значения снижения загруженности дорожной сети города нами был выбран уровень в 5 баллов. Как показали расчеты, повышение стоимости литра бензина марки АИ-92 на 8 руб., или в среднем – на 35% против базового уровня начала 2011 г., позволяет существенно снизить загруженность дорог и среднее время, затрачиваемое жителями Москвы на дорогу от дома до работы и обратно.

Однако единовременный рост цены литра бензина вызовет серьезный скачок недовольства среди жителей города. Особенно остро эти изменения коснутся слоев населения с низким уровнем дохода. Так, число недовольных москвичей может вырасти с 14 до 50%, что свидетельствует о назревающем в обществе социальном взрыве. Только по истечении 1,5 лет ситуация в обществе нормализуется и придет в первоначальное состояние. Расчеты модели показали, что около 3% жителей г. Москвы почти полностью нечувствительны к увеличению стоимости бензина – даже при росте цены более чем на 50%.

Стоит также отметить, что при росте цен на топливо и последующем массовом отказе от пользования личными транспортными средствами москвичи и гости столицы будут вынуждены использовать альтернативные виды транспорта – общественный транспорт, и в первую очередь метро. При этом сценарии нагрузка на метрополитен возрастает на 14–16%. Данный рост является критичным для московской подземки, и так работающей на пределе своей пропускной способности.

¹ Подробнее иллюстрации результатов исследования см.: <http://www.artsoc.ru/upload/CABMUD.pdf>.

Альтернативный сценарий повышения цен предусматривал плавное – трехкратное – повышение стоимости литра бензина по 2,67 руб. в течение двух лет. Расчеты показали, что эффективность поэтапного изменения цены ниже по сравнению с первым экспериментом. Так, данные меры позволяют снизить загруженность дорожной сети города в среднем до 6–7 баллов.

Повышение цен в несколько этапов позволит избежать социальной напряженности. Еще одним положительным фактором плавного повышения стоимости бензина является отсутствие резко возросшей нагрузки на линии общественного транспорта (метрополитена).

В качестве другой оперативной меры снижения уровня загруженности дорог г. Москвы, традиционно вызывающей большие споры, выступает введение платы за парковку в центре города.

Оценка мер, связанных с повторным введением платы за парковку в г. Москве в пределах Садового кольца с использованием САВМUD, позволила установить, что уже при введении тарифа в 100 руб. за час стоянки автомобиля можно существенно уменьшить загруженность дорог города и в особенности его центра (рис. 5).

Оценка экономической эффективности предложенных мер позволяет судить о высокой степени прибыльности введения платы за парковку в центре Москвы для бюджета города. Так, стоимость одного автоматического кассового аппарата, установленного на 100 м дороги (30 машино-мест), в среднем составляет 500 тыс. руб. Расчеты модели показали, что при 90% загруженности парковочных мест в рабочие дни в среднем по 9 часов и тарифе в 100 руб. в час затраты на оборудование парковочной системы окупятся уже за первый месяц эксплуатации объекта.

Решение проблем высокой загруженности дорожной сети мегаполиса демотивационными мерами – не лучший способ, так как они ограничивают права и свободы жителей Москвы и Московской области, пользующихся личными транспортными средствами. Правительству Москвы необходимо развивать общественный транспорт как в количественном, так и в качественном отношении, для того чтобы жители мегаполиса сами сделали выбор в пользу скоростного, высококомфортного общественного транспорта.

4. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе исследования были получены следующие основные результаты.

1. Анализ существующих методов проектирования и моделирования городов показал, что агенто-ориентированный подход является универсальным средством моделирования социально-экономического развития городов, позволяющим учитывать индивидуальное поведение жителей города, предсказывать поведение городской системы в результате взаимодействия агентов модели на микроуровне, а также поддерживать визуализационные и интерактивные аспекты работы и включать элементы других моделей, например гравитационной, что делает АОМ более комплексным универсальным и гибким инструментарием.

2. Предложен теоретико-методический подход и разработана агенто-ориентированная модель развития городов, которая – в отличие от существующих моделей, описывающих отдельные аспекты городского развития, – является комплексным инструментарием формирования устойчивого развития городов, позволяющим исследовать проблемы мегаполисов, разрабатывать долгосрочные прогнозы и сценарии их социально-экономического развития с учетом уровня комфорта проживания людей, а также получать количественные оценки результатов управленческих решений. За основу реализации модели была взята программа AnyLogic, в которую встроена разработанная в ходе исследования геоинформационная система мегаполиса.

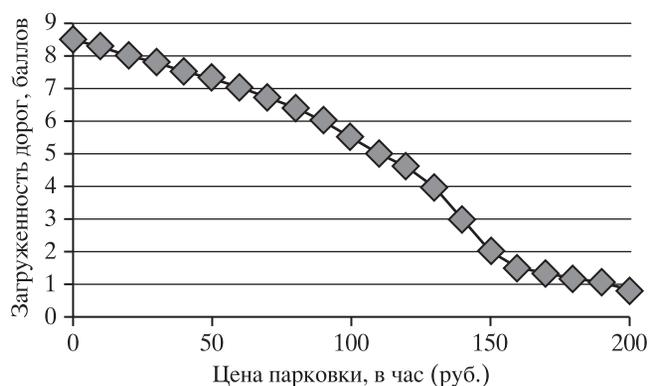


Рис. 5. Зависимость загруженности дорог г. Москвы от стоимости часа парковки

3. В рамках Комплексной агенто-ориентированной модели развития г. Москвы реализован принцип ограниченной рациональности агентов, учтены характеристики жизненных циклов агентов – физических лиц, отражены особенности их памяти. Помимо экономических факторов при выборе места жительства учитывается экологический фактор, а также развитость инфраструктуры и престижность района. Кроме того, реализован принцип иерархического построения среды модели. Были предложены механизмы динамического изменения цены на недвижимость в различных районах города.

4. Комплексный подход к оценке качества нового инструментария – агенто-ориентированной модели развития городов на основе анализа чувствительности, оценки влияния стохастической составляющей на результаты моделирования и оценки прогностических характеристик модели, позволяет судить о высоком качестве, точности и надежности построенной модели. Подбор вероятностных распределений используемых в модели параметров позволяет сохранить баланс между “свободой действия” модели и точностью прогнозируемых показателей.

5. Проведен анализ основных направлений и выполнен долгосрочный прогноз основных социально-экономических показателей развития г. Москвы на период до 2025 г., получены количественные оценки принимаемых управленческих решений в области совершенствования транспортной политики г. Москвы, обоснованные сценарными расчетами:

- на основе анализа выявлены условия, при которых обеспечивается достижение высоких стандартов уровня и качества жизни москвичей, устойчивое и сбалансированное функционирование социальных и экономических элементов мегаполиса;

- проведена оценка уровня сегрегации жителей мегаполиса по доходам с использованием разработанного инструментария. Сделан вывод о выравнивании уровня жизни москвичей вне зависимости от места их проживания. Если в 2002 г. значение самого высокого показателя среднедушевого денежного дохода по административным округам г. Москвы превышало значение самого низкого более чем в 2 раза, то в 2009 г. их соотношение снизилось до 1,56 раз. На основании прогноза на период до 2025 г. показано, что десегрегационные процессы в обществе сохранятся, а уровень дифференциации не превысит 25–30%;

- проведена оценка предлагаемых мер, направленных на снижение уровня загруженности дорог путем повышения стоимости бензина на автозаправочных станциях столицы. Расчеты показали, что единовременное увеличение стоимости бензина на 8 руб./литр, или на 30–35%, снижает загруженность дорог с 8 до 5 баллов и среднее время, затрачиваемое жителями мегаполиса на дорогу, но вызывает скачок недовольства жителей города. Особенно остро изменения коснутся слоев населения с низким уровнем дохода. Показано, что плавное (поэтапное) повышение цен на бензин позволит избежать нарастающей социальной напряженности, однако эффект от этих мер будет ниже;

- оценка мер, связанных с введением платы за парковку в центре г. Москвы с использованием САВМUD, позволила установить высокую экономическую эффективность предложенных мер для бюджета города. При этом введение тарифа за стоянку автомобиля на уровне 800–1000 руб. в сутки может существенно уменьшить загруженность дорог города.

Благодаря своей интерактивной составляющей и гибкой форме разработанный универсальный инструментарий – Комплексная агенто-ориентированная модель развития городов может быть легко адаптирована для решения широкого круга задач, стоящих перед учеными и чиновниками всех уровней власти.

Проведенные расчеты должны учитываться в качестве условия устойчивого функционирования социально-экономической системы г. Москвы, что позволит обеспечить решение как сложившихся, так и новых, только возникающих, проблем современного мегаполиса.

Дальнейшее развитие применения САВМUD г. Москвы возможно за счет рассмотрения г. Москвы и Московской области как единого социально-экономического, производственно-технологического и транспортно-логистического центра. Экономика и социальная сфера, трудовые ресурсы и занятость населения, транспортные сети, территориальное размещение жилых и промышленных объектов города и области настолько переплетены и взаимосвязаны, взаимозависимы, что без их совместного, интегрированного, согласованного функционирования невозможно

эффективное развитие региона и решение возникших проблем, преодоление пространственных, ресурсных, жилищных, дорожно-транспортных ограничений. Наряду с этим планируется также и горизонтальное развитие САВМUD, т.е. увеличение числа агентов модели и перевода ее на суперкомпьютер, что позволит моделировать состояние города и целых регионов в натуральном масштабе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахтизин А.Р.** (2008). Агент-ориентированные модели экономики. М.: ЗАО «Издательство “Экономика”».
- Макаров В.Л., Житков В.А., Бахтизин А.Р.** (2009). Регулирование транспортных потоков в городе – проблемы и решения // *Экономика мегаполисов и регионов*. № 3.
- Макаров В.Л.** (2010). Социальный кластеризм. Российский вызов. М.: Бизнес Атлас.
- Фаттахов М.Р.** (2011). «Города в пространственно организованной экономике и моделирование их устойчивого развития». В кн.: *Экономическое пространство: теория и реалии*. М.: ЗАО «Издательство “Экономика”».
- Фаттахов М.Р., Бахтизин А.Р.** (2010). Агент-ориентированная модель устойчивого развития городов. В кн.: *Искусственный интеллект: философия, методология, инновации*. Часть 1. М.: Радио и связь.
- Batty M., Longley P.** (1994). *Fractal Cities*. London: AP.
- Batty M.** (2007). *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. Cambridge: MIT Press.
- Benenson I.** (2004). *Agent-Based Modeling: from Individual Residential Choice to Urban Residential Dynamics* / Eds. M.F. Goodchild, D.G. Janelle. Oxford: Oxford University Press.
- Borrill P.L., Tesfatsion L.** (2010). *Agent-Based Modeling: The Right Mathematics for the Social Sciences?* Iowa : Iowa State University, Department of Economics Ames.
- Wissen L. Van Rima A.** (1988). *Modeling Urban Housing Market Dynamics. Evolutionary Pattern of Households and Housing in Amsterdam*. Elsevier Science Publishers.

Поступила в редакцию
05.04.2012 г.

Agent-Based Model of Socio-Economic Development of Moscow

M.R. Fattakhov

The paper considers the international experience of controlling and monitoring sustainable urban development. A description of a new approach to modeling a complex urban environment is an agent-based model. On the basis of the developed model the author analyzes the main trends and long-term forecast of basic socio-economic development indicators of Moscow until 2025.

Key words: city, urban, megalopolis, sustainable urban development, agent-based modeling, economic and mathematical model, socio-economic development of the region.