

УДК 004.9, 711.4, 352.075

А. Ф. Агеева

## Имитационное моделирование динамики городских систем с помощью агентного подхода<sup>1</sup>

Представлен обзор зарубежного опыта проектирования агент-ориентированных и мультиагентных моделей динамики городской среды и городских систем в соответствии с реализацией концепции *умного города*. Проведён анализ архитектуры моделей социальных, природных и технических систем города, в том числе созданных в качестве базовых компонентов систем поддержки принятия решений. Рассмотрены некоторые примеры комплексного городского моделирования и программных сред для агентного моделирования городов и городских систем. Обоснована перспективность использования агент-ориентированного моделирования в практике городского планирования, муниципального управления и обеспечения надёжности работы критически важных объектов городской инфраструктуры.

*Ключевые слова:* агент-ориентированное моделирование, мультиагентные модели, системы поддержки принятия решений, городское планирование и управление, имитационное моделирование, агентный подход.

A. F. Ageeva

## Simulation of the dynamics of urban systems using an agent-based approach

The article presents the foreign experience in constructing agent-based and multi-agent models of the dynamics of the urban environment and urban systems in accordance with the idea of creating a “smart city” ecosystem. Architecture of models of social, natural and technical systems of the city, including those created as the basic components of decision support systems, is analysed. Some examples of integrated urban simulation and software for agent-based simulation of cities and urban systems are studied. The prospect of using agent-based simulation in the practice of urban planning, municipal management and ensuring the reliability of critical city infrastructure are substantiated.

*Key words:* agent-based simulation, multi-agent models, decision support systems, urban planning and city management, simulation study, agent-based approach.

**В**лияние информационно-коммуникационных технологий на все сферы жизни общества с течением времени всё больше усиливается. Сегодня они активно внедряются в повседневную практику территориально-пространственного планирования и муниципального управления. В условиях перехода к цифровому обществу и цифровой экономике (при планировании, организации и управлении городским хозяйством) большую

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 18-29-03139.

популярность получили идеи адаптивной городской среды, устойчивого города, умного города и города для людей, оказавшие влияние на формирование государственной градостроительной политики, предопределяющей качественно иной подход к развитию города как производителю комплекса услуг для потребителей (горожан), предполагающей их участие в процессе совершенствования сервисов, т. е. обеспечения условий для максимального вовлечения горожан к управлению развитием городских систем, а также быстрого реагирования городского пространства на их текущие нужды в целях поддержания комфортной среды.

Крупные города — это центры экономической, научной и культурной жизни общества, высокотехнологичные конгломераты, концентрирующие знания и инновации, обеспечивающие горожанам высокое качество среды обитания. Концепция современного *умного города* предполагает превращение его в сложную интеллектуальную систему, использующую весь потенциал информационных технологий для повышения качества жизни горожан посредством анализа больших потоков информационных данных, поступающих из множества различных источников, и внедрения smart-решений. Переход к развитию городского пространства в соответствии с концепцией *умного города* невозможно представить за рамками новейших информационно-управляющих систем — эффективных инструментов мониторинга и контроля критически важных объектов инфраструктуры города.

Города, будучи сложным организмом, аккумулируют целый ряд проблем — социально-экономических, экологических, транспортных и градостроительных. Среди них можно выделить наиболее актуальные для российских городов: перегрузка дорожно-транспортной инфраструктуры, связанная с резким увеличением количества личных и коммерческих автотранспортных средств; существенная доля аварийного и ветхого жилого фонда; износ инженерных сетей, обусловленный недостаточностью финансирования программ по их реконструкции; неудовлетворительная экологическая ситуация в городах — промышленных центрах страны, вызванная низким уровнем внедрения зелёных технологий на пути перехода к эколого-ориентированному производству. Решение обозначенных проблем в условиях ограниченности ресурсов (в том числе финансовых и временных), многозадачности, необходимости анализа большого количества разноплановых, но взаимосвязанных данных, учёта вариативности развития ситуации и принятия оптимального решения предопределяет целесообразность использования современных методов комплексного анализа и многовариантного ситуационного прогнозирования, среди которых выделяется компьютерное имитационное моделирование, позволяющее создавать виртуальные аналоги сложных систем. Данный метод, как эффективный инструмент информационного обеспечения территориально-пространственного планирования и муниципального управления, признан обязательным для внедрения в градостроительную практику в соответствии

с положениями Градостроительной доктрины РФ [1], утверждённой Учёным советом Российской академии архитектуры и строительных наук в 2010 г., которая была разработана в целях определения оптимальных подходов к формированию среды жизнедеятельности граждан, удовлетворяющей требованиям, закреплённым в Конституции РФ.

Экскурс в историю имитационного моделирования городских систем, а также обзор современных отечественных разработок и результативность использования имитационного моделирования в управлении городскими системами представлены в статье [2]. Имитационное моделирование динамики городской среды в эпоху цифровой экономики выходит на качественно иной уровень. Создаются информационно-аналитические, информационно-поисковые и информационно-управляющие платформы на базе современных средств вычислительной техники и математических методов, ядром которых являются имитационные модели. Такие платформы, используемые в качестве систем поддержки принятия решений, — новейший инструмент комплексного анализа и контроля объектов высокой степени сложности (к ним относится городской организм) с возможностью осуществлять непрерывный мониторинг и оперативно реагировать в режиме реального времени. В качестве примера отечественных разработок подобного уровня можно привести интеллектуальную систему поддержки принятия решений — аппаратно-программный комплекс «Безопасный город» (АПК БГ) [3], проекты которого утверждены к реализации в ряде городов России.

Наиболее перспективным инструментом для реалистичного воссоздания в виртуальной среде устройства и поведения систем, объектов, процессов и явлений высокой степени сложности признаётся *агентный метод* имитационного моделирования. Данный метод позволяет посредством имитирования поведения агентов воссоздавать их комплексные взаимосвязи и взаимозависимости и изучать их взаимовлияние друг на друга и поведение системы в целом. В рамках реализации концепции *умный город* агентами в модели могут быть элементы городского организма (это горожане, инфраструктурные объекты, транспортные средства, а также подсистемы города — инженерно-транспортная, ЖКХ, рекреационная и т. д.). В контексте функционирования систем класса *умный город* мультиагентные технологии реализуют способность масштабных информационно-управляющих комплексов к самоорганизации. Так, в АПК БГ совокупность множества интеллектуальных агентов, способных обрабатывать большие потоки информации, обмениваться знаниями друг с другом, объединяться для решения сложных задач и т. д., образует децентрализованное ядро системы, обеспечивающей интеллектуальную обработку и компактное хранение гигантских объёмов информации в целях предотвращения опасных ситуаций в городах (муниципальных образованиях), при этом достигается высочайший уровень межсистемной, межведомственной и межуровневой координации [3].

В работе [4] представлена начальная версия разработанной в ЦЭМИ РАН концептуальной модели системы *умный город*. В нашей концепции системы класса *умный город* важнейшим интегральным показателем является удовлетворённость населения условиями городской среды и качеством городских сервисов с учётом влияния множественных характеристик, например, обеспеченности населения качественным продовольствием, доступности медицинских и образовательных услуг и др. Определённый интерес в этом вопросе представляет опыт зарубежных исследователей в проектировании агент-ориентированных и мультиагентных моделей динамики городской среды и городских систем.

Поскольку город — это сложный организм, в котором протекают процессы синтеза социальных, природных и технических систем через многообразие интеграционных взаимодействий подсистем города (таких как социальная, экономическая, экологическая, инженерно-транспортная инфраструктуры, территориальное планирование и градостроительное регулирование, землепользование, планы реагирования на чрезвычайные ситуации и т. д.), данный обзор включает в себя анализ моделей динамики городских подсистем, а также примеры комплексного городского моделирования и программных сред для агент-ориентированного моделирования городов и городских систем. Большинство из рассмотренных в обзоре агент-ориентированных и мультиагентных моделей созданы как базовые компоненты систем поддержки принятия решений для обеспечения эффективной работы диспетчеров, спасателей, проектировщиков, девелоперов и должностных лиц муниципальных образований.

Задача обеспечения высокого качества жизни жителям *умного города* может быть выполнена лишь в рамках соблюдения принципа устойчивого развития — триединого подхода к поддержанию баланса между социальной, экономической и природной компонентами городской экосистемы. Вопросы поиска эффективных стратегий устойчивого развития общества, обеспечения экологической, экономической, энергетической и продовольственной безопасности (с 1980-х гг. занимающие лидирующие позиции в стратегическом планировании) в аспекте реализации концепции *умного города XXI в.*, в соответствии с идеей сохранения долгосрочного ресурсного потенциала природы и здоровья граждан, определены как задачи создания условий для удовлетворения базовых потребностей и ценностей не только нынешних, но и будущих поколений.

Для поддержания среды жизнедеятельности, удовлетворяющей условиям устойчивого развития городских территорий, создаются системы мониторинга и контроля экологической ситуации в городе, осуществляющие (под управлением программных агентов) сбор информации, поступающей от функционирующих в границах города дистанционных устройств автоматического слежения за параметрами внешней среды, последующую обработку полученных данных, а также анализ текущей экологической обстановки, выявление пограничных показателей и прогнозирование экологических

сценариев. Такие системы, построенные на основе мультиагентного моделирования, действуют, к примеру, в г. Афины (Греция) [5] и г. Бари (Италия) [6]. В первом случае они служат для мониторинга загрязнения воздушной среды центральной части города, во втором — температурного загрязнения атмосферы города.

Непрерывный рост объёмов ресурсопотребления городов обусловил необходимость создания инструментов координирования принятия муниципальными властями обоснованных административных решений по регулированию ресурсопотребления, что способствует уменьшению конфликтов между представителями различных групп интересов. Мультиагентные технологии применяются для создания инструментов имитирования динамики поведения потребителей различного типа с учётом воздействия экологических и экономических факторов, прогнозирования спроса на ресурсы, тестирования различных сценариев потребления ресурсов, а также поиска решений рационального потребления в городах, испытывающих сезонный дефицит ресурсов.

В статье [7] представлена мультиагентная модель устойчивого развития городских территорий, состоящая из нескольких блоков, где имитируются различные процессы:

- взаимоотношения (в аспекте распределения ресурсов) между различными агентами — домохозяйствами, предприятиями и муниципалитетом;
- потребление ресурсов через потоки, имеющие характеристики городского пространства с расположенными в нём зданиями, учреждениями, предприятиями и потребителями ресурсов, каждый тип которых имеет своё поведение потребления;
- социально-экономические, реализующиеся посредством рыночных механизмов и концепций потребления ресурсов водных, энергетических и продовольственных. Модель позволяет имитировать сценарии городского развития в целях прогнозирования спроса на ресурсы.

Рост энергопотребления и требований потребителей к надёжности и качеству электроснабжения (при одновременном увеличении экологических, инфраструктурных и экономических ограничений) вызывает необходимость поиска инновационных путей развития электроэнергетики. В течение последнего десятилетия активно развивается новое решение в области автоматизированных систем управления технологическими процессами и диспетчерского управления в электроэнергетике, которое именуется «умные сети» (интеллектуальные сети), или smart grid. *Умные сети* — это электрические сети, удовлетворяющие принципам наиболее энергоэффективного и экономичного функционирования энергосистемы за счёт её скоординированного управления, осуществляемого при помощи двусторонних коммуникаций между элементами электрических сетей, электрическими станциями, источниками электроэнергии и потребителями.

Примером многоцелевого инструмента, созданного на базе мультиагентной модели, может служить система поддержки принятия решений для операторов электросетей, участников энергорынка, поставщиков и потребителей электроэнергии, описанная в работе [8]. В системе реализуется концепция интеллектуальных электросетей как центра управления распределёнными источниками электроэнергии и их межоперационным взаимодействием, посредством которого осуществляются обеспечение бесперебойного электроснабжения, предотвращение перегрузок электросетей, прогнозирование объёмов энергопотребления для выбора оптимального варианта экономического потребления энергии для каждого потребителя. В системе (в режиме реального времени) воспроизводятся условия энергорынков, тестируются сценарии энергопотребления, контролируется функционирование и взаимодействие объектов распределённых сетей, происходит управление энергоресурсами.

Примером одной из новейших работ в области моделирования распределённых энергосистем с использованием парадигмы агентов может служить разработанная в 2017 г. по заказу Министерства энергетики США гибкая среда моделирования GridLAB-D, поддерживающая высокопроизводительные вычисления с возможностью интеграции со сторонними инструментами управления и анализа данных [9].

Концепция интеллектуальных водопроводных сетей реализуется в контексте управления городским водным хозяйством через слияние в единую устойчивую систему сетей, процессов, инфраструктуры, а также водопользователей, поставщиков воды и их партнёров с интеграцией алгоритмов контроля водных ресурсов. Так, ещё в 2000 г. был запущен Европейский проект управления водными ресурсами, в рамках которого была создана мультиагентная платформа FIRMA (Freshwater Integrated Resource Management with Agent). С её помощью можно моделировать комплексные природные, гидрологические, социальные и экономические взаимосвязи через представление решений заинтересованных сторон [10]. В дальнейшем на основе платформы FIRMA было построено множество моделей для европейских городов, например, агент-ориентированная модель для поиска оптимального режима управления водными ресурсами г. Барселона (Испания) [11]. В модели имитируется спрос на воду со стороны агентов *домохозяйств*, имеющих индивидуальные алгоритмы и параметры потребления и объединённых в городские микрорайоны. Административное управление водными ресурсами осуществляется агентом *муниципалитетом* через регулирование тарифных ставок, внедрение сберегающих технологий, направление средств для ремонта инфраструктуры. С помощью модели можно тестировать различные сценарии развития города с учётом экологических и климатических условий и прогнозировать спрос на водные ресурсы.

В мультиагентной модели, описанной в работе [12], агентами служат участки водопроводных сетей, имеющие индивидуальные параметры срока службы, давления, утечки, поломки, протяжённости, типа материалов

труб, а также расходов на текущее техническое обслуживание; потребители с индивидуальными характеристиками потребления воды; коммунальные предприятия, принимающие решения о методах ценообразования и тарифах, а также замене или ремонте водопроводных труб с учётом объёмов доступных финансовых средств. Совокупность внешних и внутренних факторов, связанных с увеличением количества потребителей, нехваткой объёмов финансирования, эрозией труб и т. п., может спровоцировать критические состояния, влияющие на изменение производительности водной инфраструктуры, нарушая стабильность системы водоснабжения города. Модель позволяет имитировать большое количество сценариев функционирования системы водоснабжения путём комбинации различных параметров для предотвращения её критических состояний и выявления оптимальных стратегий устойчивого управления городской инфраструктурой водоснабжения.

Агентный подход активно используется для имитирования процессов урбанизации, экспансии городов и разрастания агломераций, а также динамики землепользования, сопровождающих физический рост городов, в целях поиска стратегий градостроительного регулирования для обеспечения устойчивого развития городских и прилегающих к ним территорий. Захват пригородных территорий под влиянием движущих сил городской экспансии происходит через воздействие внешних факторов — экономических, демографических, законодательных, а процессы перераспределения земельных ресурсов имитируются как результат комплексного взаимодействия агентов. Так, в мультиагентной модели экспансии г. Чанша (КНР) [13] распределение агентов *горожан* и агентов *селян* на территориях пригородов происходит смешанным образом. И чем дольше эти территории используются агентами *горожанами* в качестве места постоянного проживания, тем вероятнее, что данные земли войдут в городскую черту.

Рост крупных городов и агломераций ставит перед проектировщиками и муниципалитетами ряд задач относительно поиска оптимальных стратегий градостроительного регулирования. Всё более популярной становится стратегия *умного роста*, впервые изложенная Американской ассоциацией планирования в 2002 г., принципы которой предполагают устойчивое развитие городских территорий через механизмы интенсивного роста, такие как высокая плотность застройки, компактное зонирование, смешанное землепользование, приоритетность общественного транспорта, а также реконструкции городских районов взамен экстенсивной застройки пригородов.

В агент-ориентированной модели, представленной в работе [14], тестировались варианты градостроительного развития территорий агломерации Гуанчжоу (КНР) в соответствии со сценариями умеренной, интенсивной, лимитированной и экологически ориентированной застроек с органичным включением в ландшафт. Интересы различных групп представлены в модели через взаимодействия агентов — *горожан, муниципалитета, фермеров и девелоперов*. Модель создана для поиска оптимального сценария устойчивого развития города.

Для имитирования процессов разрастания городов, динамики землепользования и прогнозирования векторов развития города довольно часто прибегают к использованию клеточных автоматов. Пространство города делится на ячейки (земельные участки с индивидуальными характеристиками), и для каждого типа ячейки устанавливаются правила перехода, т. е. условия, определяющие изменения состояний ячейки от одного типа к другому. В агент-ориентированной модели градостроительного регулирования территорий агломерации Сеул (Южная Корея) с использованием клеточных автоматов процесс разрастания городских территорий моделировался на основе функции полезности агентов *домохозяйств*, осуществляющих выбор места жительства [15]. Модель прогнозирует последствия градостроительного развития агломерации в соответствии со сценариями частичного и полного дерегулирования зелёного пояса вокруг Сеула, сдерживающего экстенсивный рост города в течение нескольких десятилетий, и строительства высокоскоростной железной дороги, соединяющей Сеул с другими городами страны. Модель также позволяет исследовать, как стратегическое планирование влияет на функцию полезности агентов и перенаправляет вектор городского развития.

Принципы организации городского пространства и городских систем, в соответствии с идеологией *умного города*, предполагают обеспечение максимального комфорта для его жителей с учётом их потребностей, поэтому вовлечённость горожан в городские процессы неизбежна. Инструменты, посредством которых горожане могут реализовать социальную активность в процессе коллективного принятия решений о развитии города, могут способствовать устойчивому функционированию *умного общества*. Агент-ориентированная модель, представленная в статье [16], может быть использована как концептуальная основа для построения виртуальной платформы городской социальной коммуникации, портала проведения публичных слушаний по вопросам градорегулирования, а также как инструмент получения социо-пространственных знаний о городе.

В модели происходит взаимодействие агентов трёх типов: жителей города, учреждений (государственные учреждения, предприятия, учреждения образования и здравоохранения и т. д.) и пространственных объектов (городские микрорайоны, коммунально-промышленные территории, общественные зоны и пр.). Агенты *жители* наделены индивидуальными характеристиками — возраст, уровень дохода и образования, состояние здоровья, семейное положение и количество детей, район проживания. Последняя влияет на параметр восприимчивости агентов *жителей*, отображающий вероятность их участия в общественных собраниях, встречах и демонстрациях в зависимости от территориальной близости к объекту обсуждения. Между агентами существует уровень доверия. Он растёт в случае сходства характеристик агентов *жителей*, а также если они находятся дома (на 50 %) или в развлекательном заведении (на 10 %) и, напротив, снижается при значительном отличии агентов *жителей* друг от друга или если они находятся на рабочем месте

(на 20 %), в государственном учреждении или учреждении здравоохранения (на 50 %). В ходе экспериментов с моделью на примере г. Варшава (Польша) отслеживалось, как динамика доверия людей друг к другу или социальным институтам влияет на уровень общественного участия и вовлечённости различных категорий горожан (пенсионеров, малоимущих, студентов и т. д.) в процессы обсуждения проектов реконструкции центральной площади города и реновации промышленного района.

Проблемы дорожно-транспортной инфраструктуры крупных городов обусловлены резким увеличением количества транспортных средств, перегруженностью улично-дорожной сети, а также ухудшением экологической ситуации вследствие значительного увеличения выбросов углекислого газа. В связи с этим цифровизация городской транспортной системы видится как средство поиска умных решений для устойчивого развития дорожно-транспортного комплекса.

Агентный подход позволяет моделировать схемы передвижения городского населения на базе использования индивидуальных алгоритмов перемещения агентов *горожан*, пользующихся общественным или личным автотранспортом, и агентов *транспортных средств*, перемещающихся в границах пространственных ячеек GIS-карт городов в течение суточных интервалов. Примерами могут служить модели, представленные в работах [17; 18], где имитируются внутрисуточные автотранспортные потоки в границах Амстердама и Швейцарии по маршрутам, состоящим из набора цепочек перемещений по типу дом—работа—дом или предприятие—пункт назначения—предприятие. Автор модели [19] создал алгоритмы, которые воспроизводят персонализированные графики передвижений 1 % жителей г. Сингапур, с помощью ментальной карты, состоящей из последовательности разных типов передвижений агентов по точкам постоянных, гибких (эпизодических) и случайных мест посещения.

Транспортные агент-ориентированные и мультиагентные модели создаются, как правило, с помощью специализированного программного обеспечения. Наиболее распространённые из них — MATSim. В статье [20] представлена программная среда для полномасштабного моделирования транспортной системы *многого города*, которую авторы назвали InterSCSimulator. Для создания индивидуальных профилей передвижения агентов используются статистические данные, а также данные, полученные в ходе социологических опросов с помощью GPS-навигаторов и мобильных телефонов. Транспортные модели позволяют оценивать загруженность дорожно-транспортных сетей, прогнозировать транспортные пробки по суточным интервалам, тестировать сценарии чрезвычайных ситуаций в транспортных системах, а также выявлять оптимальную стратегию развития города с учётом сложившейся дорожно-транспортной ситуации.

Системы поддержки принятия решений, построенные на базе транспортных моделей, создаются как платформы управления транспортными потоками для повышения безопасности на дорогах и качественного изменения

городского транспортного сервиса. Примерами таких разработок служат две системы поддержки принятия решений по управлению транспортной ситуацией в г. Бильбао (Испания) [21]. Система регулирования автотранспортного движения по самой загруженной магистрали города позволяет оператору отслеживать текущую ситуацию посредством анализа информации, поступающей с установленных вдоль магистрали датчиков, и при необходимости отправлять сообщения по регулированию движения на мониторы, установленные над магистралью, либо вызывать регулировщика на место. С помощью системы управления движением городских маршрутных автобусов оператор сверяет поступающие с их GPS-навигаторов данные с расписанием, направляя водителям сообщения о регулировании скорости движения, а также принимает оперативное решение в случае поломки автобусов.

В статье [22] даётся описание комплексного решения для управления городским общественным транспортом, его координации и регулирования. Система управления, построенная с помощью агентной технологии, реализована в соответствии с концепцией *интеллектуализации среды* (окружающего интеллекта). Она обеспечивает интеграцию транспортных услуг в виртуальной среде и облегчает взаимодействие между пассажирами и провайдерами общественного транспорта. Агент *пассажир* помогает пользователям ориентироваться внутри системы, отправлять запросы и создавать профили; агент *транспортное средство* отслеживает маршрут и время пробега, а также управляет билетными автоматами, внутренними дисплеями; агент *остановка* помогает пассажирам спланировать маршрут и управляет информацией на внешних (уличных) дисплеях. Вся информация оперативно поступает в центр управления системой и контролируется диспетчером для выявления сбоев и принятия регулирующих действий. Доступ к системе осуществляется через мобильный телефон или *умные остановки*.

Улучшить ситуацию с дорожными заторами в крупных городах можно внедрением системы *умный светофор*. Принцип их работы заключается в повышении пропускной способности перекрёстков путём динамического управления сигналами светофоров, что позволяет менять цвет и продолжительность сигнала в зависимости от плотности транспортного потока. В работе [23] представлена концептуальная мультиагентная модель, в которой программные агенты, собирая информацию с GPS-спутников и датчиков обнаружения, отслеживают плотность дорожно-транспортных потоков посредством измерения длины очереди автомобилей на дорогах и увеличения количества автомобилей за период сигнала светофора и, фиксируя время возникновения заторов, отправляют информацию агенту *контролёру*. Последний фиксирует все поступившие сообщения и регулирует цвет и продолжительность сигналов светофоров с учётом индикатора приоритета дорог, а также запускает алгоритм синхронизации светофоров. Система *умных светофоров*, по оценкам специалистов [24], позволяет водителям сократить время нахождения в пробках более чем на 40 %, а также уменьшить выбросы вредных веществ от автотранспорта в атмосферу на 20 %.

Неудачи *умных* инициатив в сфере транспортного сервиса, отмеченные в ряде городов мира, обусловили необходимость использования инновационных подходов, обеспечивающих количественные прогнозы в отношении различных аспектов внедрения *умных* транспортных услуг в соответствии с реализацией концепции интеллектуальной мобильности — персонифицированного онлайн-доступа к различным транспортным средствам и опыту перемещений. В работе [25] описана система поддержки принятия решений по оценке эффективности *умных* транспортных проектов и их влияния на производительность транспортной системы города, а также прогнозирования успешности проекта в аспекте принятия новой транспортной услуги населением. Агенты модели — жители пригородов г. Асколи-Пичено (Италия), имеющие индивидуальные характеристики и профили передвижения, выбирают наиболее оптимальное транспортное решение из альтернативных вариантов, учитывая личные предпочтения. Модель позволяет имитировать интермодальные и мультимодальные передвижения в географическом и временном пространстве. При неудовлетворительных выходных данных пользователь может скорректировать параметры проекта и запустить новый цикл экспериментов, что даст возможность определить необходимые для успешности проекта условия предлагаемого сервиса.

*Умные города* должны соответствовать современным требованиям безопасности горожан: система должна эффективно работать и в нештатной ситуации, обеспечивая информационную поддержку организованного вывода людей из опасных зон и устранения последствий чрезвычайных происшествий. При моделировании сценариев городской эвакуации необходимо учитывать направления движения людских потоков в городском пространстве с возможностью проведения анализа профилей движения пешеходов, которые могут быть получены с помощью видеокамер или GPS мобильных телефонов.

В работах [26; 27] представлены конструкции для агент-ориентированного моделирования масштабных интерактивных эвакуационных планов с функцией обновления системы и контроля текущей ситуации в режиме реального времени. Образцами зоны эвакуации послужили одни из районов г. Лондон [26] и г. Линц [27], представленные растровыми картами с привязкой к GIS-координатам, поделёнными на ячейки и секторы, внутри которых перемещались агенты *пешеходы*.

Агенты модели [27] были информированы о параметрах и характеристиках пространства, а скорость их передвижения зависела от загруженности (плотности) ячеек городского пространства. В модели [26] передвижение агентов в границах зоны эвакуации по направлению к цели происходило с помощью навигационных векторов, учитывающих скорость пешеходов, их положение в ячейках, расстояние между пешеходами и препятствиями, а также область обзора в соответствии с применением принципа предупреждения столкновения. Агенты наделялись матрицами индивидуального пространства, и в потоках параллельных вычислений

вершинный шейдер (специальная программа создания теней в вершинах, аппроксимирующая поверхность многоугольников) визуализировал положение каждого агента в индивидуальном пространстве ячейки с помощью метода опорных кадров.

Агентный подход моделирования используется для пространственного анализа в целях принятия оптимальных планировочных решений (наилучших мест расположения зданий, сооружений и т. д.). Так, в работе [28] представлен анализ генерального плана проектируемого района Лондона, где агенты *жители* передвигались в границах района в поисках лучшего расположения основных транспортных объектов. В работе [29] представлена агент-ориентированная модель движения пешеходов, созданная как инструмент анализа пешеходных потоков для оптимизации планировочных задач по расположению объектов в границах городских общественных зон — парков, площадей и кварталов. Моделирование динамики пешеходных потоков учитывает три уровня поведения агентов: стратегический, когда люди планируют повестку дня и места для посещения; тактический, когда пешеходы выбирают оптимальный маршрут, и операционный, описывающий реальные процессы движения пешеходов. Точки входа и выхода агентов модели из зон городского пространства определялись в соответствии с применением концепции *шлюзов*, представленных остановками общественного транспорта, стоянками, входами в здания и т. п. Для моделирования движения агентов использовался сетевой подход, когда пешеходы движутся по направлению к цели по узловым точкам, лежащим на пути следования в зоне их обзора, а рёбра между узлами работают для реализации кратчайшего пути между ними. Модель способна генерировать агентов, движущихся в соответствии с индивидуальными планами движения, избегая препятствия. Архитектура модели состоит из трёх модулей, посредством которых происходят предварительная обработка среды моделирования (здания, улицы и т. п.), вычисления, а также процессы моделирования и визуализация пешеходных движений.

Планирование спасательных операций и мероприятий по ликвидации чрезвычайных ситуаций в городе требует координации работы большого количества специалистов различных ведомств и управления имеющимися ресурсами в условиях ограниченности и неопределённости. Специалисты Агентства по обеспечению готовности на национальном уровне Питтсбургского университета разработали D4S2 — интегрированную платформу моделирования нештатных ситуаций и планов реагирования на них [30]. Динамическая дискретная система поддержки принятия решений по устранению последствий городских инцидентов построена на базе гибридной архитектуры, интегрирующей агентное и дискретно-событийное моделирование, ГИС-технологии, модули оптимизации и информационные базы данных. Вычислительный поток в D4S2 основан на осуществлении эволюционного процесса принятия решений как способа реагирования на развитие нештатной ситуации и реализован в итеративном и интерактивном обновлении во время моделирования баз данных, подключённых к платформе.

Моделирование строится с учётом системы правил, которые кодифицируют стандарты и практические алгоритмы лиц, принимающих первые ответные меры, служб реагирования, диспетчеров и других участников устранения последствий инцидента. Для установления начальных условий, а также выполнения задачи оптимизации решений в условиях дефицита времени используется модель смешанной целочисленной программы. Платформа служит лабораторией для изучения чрезвычайных происшествий различных видов, прогнозирования сценариев городских инцидентов, оценки возможных рисков и последствий, тестирования управляющих решений и определения их эффективности, а также центром для обучения персонала служб спасения и реагирования на ЧС г. Питтсбург (США) [31].

Оказание медицинской помощи жертвам чрезвычайных происшествий сопряжено с трудностями, обусловленными ограниченностью ресурсов, которые необходимо эффективно распределить в условиях дефицита времени. Мультиагентная модель [32] может быть использована как базовая компонента системы поддержки принятия решений сотрудниками центра спасения. В модели станции скорой помощи машины скорой помощи и больницы представлены в качестве агентов, координация между которыми обеспечивается с помощью метода оптимизации ролей частиц (с учётом степени тяжести состояния пострадавших, загруженности улиц, расстояния и времени в пути).

На сегодня актуальной научной и проектной задачей в процессе проектирования интерактивных систем класса *умный город*, созданных с помощью агентного подхода для прогнозирования и управления городскими системами в режиме реального времени, является разработка специальных алгоритмов обработки огромных потоков городских информационных данных (Big Data), поступающих от распределённых объектов мониторинга — информационно-коммуникационных устройств. В начале 2018 г. в Университете Лидса (Великобритания) стартовал проект Dynamic Urban Simulation Technique (DUST), финансирование которого осуществляется Европейским исследовательским советом [33]. Агент-ориентированную модель *умного города* DUST (на сегодня она находится в стадии проектирования) можно динамически оптимизировать с помощью обработки и преобразования городских больших данных для мониторинга текущей ситуации, определения стратегии реагирования на чрезвычайные происшествия, оценки последствий стихийных бедствий для горожан, инфраструктуры и экономики. Для этого используются специально разработанные алгоритмы динамического усвоения (ассимиляции) потоков больших данных для агент-ориентированных моделей в целях получения более точных результатов прогнозирования. Модель *умного города* DUST планируется применять и как инструмент стратегического планирования городского развития.

Активное применение имитационного моделирования для изучения динамики и осуществления контроля городских систем способствует его постепенному внедрению в практику городского планирования и муниципального

управления как эффективного инструмента междисциплинарного исследования и современного метода комплексного анализа и многовариантного ситуационного прогнозирования. Модели городских систем, построенные с помощью агентного подхода, успешно используются для поддержки принятия решений проектировщиками, диспетчерами и должностными лицами муниципальных образований, поэтому можно говорить о большом вкладе имитационного моделирования в процессы формирования экосистемы *умного города*. Прикладное значение имитационного моделирования инструмента информационно-аналитической поддержки лиц, принимающих решения, благодаря стремительному развитию информационно-коммуникационных и суперкомпьютерных технологий, в последнее десятилетие значительно возросло. Таким образом, возможность сбора, обработки и анализа больших данных, поступающих от городских систем, элементов и объектов критически важной инфраструктуры, позволяет осуществлять мониторинг городской среды, предотвращать чрезвычайные ситуации, находить наиболее оптимальные управленческие решения и совершенствовать городские сервисы в соответствии с потребностями горожан. Однако имитационное моделирование городов и городских систем, будучи перспективной областью прикладного знания, пока не выделилось в самостоятельное научное направление. Этому препятствует отсутствие системы стандартов к моделированию городов и городских систем, методологии построения типовых моделей, приложений на базе типовых моделей, алгоритмов коммуникации между разработчиками моделей и пользователями, а также специализированной научной коммуникативной среды для эффективного обмена знаниями на международном уровне. Преодоление этих препятствий ускорит реализацию проектов *умных городов* и переход на новый этап развития в сфере городского планирования и муниципального управления.

## Литература

1. Есаулов Г. В. Градостроительная доктрина Российской Федерации: в поисках оснований // Градостроительство. 2012. № 2 (18). С. 8—13.
2. Гафарова Е. А., Газизова К. А. Имитационные модели развития города: социально-экономический и управленческий аспекты // Вопросы управления. 2015. № 3 (34). С. 172—179.
3. Концепция АПК БГ // АПК «Безопасный город»: [электронный ресурс]. Последнее измен.: 15.05.2019. URL: [http://www.apkbg.ru/article/index.php/Концепция\\_АПК\\_БГ](http://www.apkbg.ru/article/index.php/Концепция_АПК_БГ) (дата обращения: 30.05.2020).
4. Имитационное моделирование системы «умный город»: концепция, методы и примеры / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян, А. С. Акопов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2019. № 2 (371). Т. 15. С. 200—224.
5. Papaleonidas A., Iliadis L. Hybrid and reinforcement multi-agent technology for real time air pollution monitoring // Advances in Information and Communication Technology. 2012. Vol. 381. P. 274—284.

6. *Borri D., Camarda D.* Planning for the environmental quality of urban microclimate: a multi-agent-based approach // *Lecture Notes in Computer Science*. 2011. Vol. 6874. P. 129—136.
7. *Li G. et al.* Water-energy-food nexus in urban sustainable development: an agent-based model // *International Journal of Crowd Sciences*. 2017. Vol. 2. P. 121—132.
8. *Teixeira B., Pinto T., Silva F. et al.* Multi-Agent decision support tool to enable interoperability among heterogeneous energy systems // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8 (3). P. 328—349.
9. GridLAB-D™: A unique tool to design the smart grid: [Web] / U.S. Department of Energy. August 2019. URL: <https://www.gridlabd.org/> (accessed: 01.06.2020).
10. FIRMA: Freshwater Integrated Resource Management with Agents / Submit. and upd.: Prof. P. Bardos // EUGRIS: portal for soil and water management in Europe: [Web]. 03.10.2006. URL: <http://www.eugris.info/displayproject.asp?Projectid=4165> (accessed: 02.06.2020).
11. *Lopez-Paredes A. et al.* Urban water management with artificial societies of agents: the FIRMABAR simulator // *Simulation*. 2005. Vol. 81 (3). P. 189—199.
12. *Rasoulkhani K., Mostafavi A.* Resilience as an emergent property of human-infrastructure dynamics: A multi-agent simulation model for characterizing regime shifts and tipping point behaviors in infrastructure systems // *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13 (11): e0207674. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207674>
13. Modelling urban expansion using a multi agent-based model in the city of Changsha / H. Zhang, Y. Zeng, L. Bian, X. Yu // *Journal of Geographic Sciences*. 2010. 20 (4): 540-556. Doi: 10.1007/s11442-010-0540-z
14. *Tian G., Qiao Z.* Modeling urban expansion policy scenarios using an agent-based approach for Guangzhou Metropolitan Region of China // *Ecology and Society*. 2014. Vol. 19 (3): 52. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06909-190352>
15. *Kim D.* Modelling Urban Growth: Towards an Agent Based Microeconomic Approach to Urban Dynamics and Spatial Policy Simulation: PhD Thesis in Planning Studies. London: Centre for Advanced Spatial Analysis, 2012. XI, 230 p.
16. Spatiotemporal modeling of the smart city residents' activity with multi-agent systems / R. Olszewski, P. Pałka, A. Turek, B. Kietlińska, T. Płatkowski, M. Borkowski // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9 (10): 2059. <https://doi.org/10.3390/app9102059>
17. *Joubert J. W., Fourie P. J., Axhausen K. W.* Large-scale agent-based combined traffic simulation of private cars and commercial vehicles // *Transportation Research Record*. 2010. 2168:24-32. Is. 1. P. 24—32.
18. Large scale multi-agent transportation simulations / N. Cetin, K. Nagel, B. Raney, A. Voellmy // *Computer Physics Communications*. 2002. Vol. 147 (1—2). P. 559—564. [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(02\)00353-3](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(02)00353-3)

19. *Ordóñez Medina S. A.* Personalized multi-activity scheduling of flexible activities // hEART 2015: 4th Symposium of the European Association for Research in Transportation (9—11 September, Lyngby, Denmark): [web] / European Association for Research in Transportation. URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11850/103801> (accessed: 27.07.2020).
20. InterSCSimulator: large-scale traffic simulation in smart cities using erlang / E. F. Z. Santana, N. Lago, F. Kon, D. S. Milojicic // Lecture Notes in Computer Science. 2018. Vol. 10798. P. 211—227.
21. *Ossowski S.* et al. Multi-agent systems for decision support: a case study in the transportation management domain // Applied Artificial Intelligence. 2004. Vol. 18. P. 779—795.
22. *Peñaranda C.* et al. An agent-based approach for a smart transport system // Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 67—87.
23. *Bader R. M. I., Hamad N. A.* A Multi-agent system model for controlling traffic congestions // ICIC Express Letters. 2019. Vol. 10. No. 9. P. 841—847.
24. *Иванов А.* Когда в России исчезнут пробки? Система «Умный светофор» // IoT.ru: Новости Интернета вещей: [Электронный ресурс] / Ассоциация интернета вещей. 30.05.2017. URL: <https://iot.ru/gorodskaya-sreda/kogda-v-rossii-ischeznut-probki-sistema-umnyu-svetofor> (дата обращения: 15.06.2020).
25. *Castagnari C.* et al. Tangramob: an agent-based simulation framework for validating urban smart mobility solutions // Journal of Intelligent Systems. 2019. Doi: 10.1515/jisys-2018-0321
26. *Karmakharm T., Richmond P., Romano D. M.* Agent-based large scale simulation of pedestrians with adaptive realistic navigation vector fields // Proceedings of Theory and Practice of Computer Graphics / Eds.: J. Colloso, I. Grimstead. Sheffield: The Eurographics Association, 2010. P. 67—74.
27. An agent-based parallel geosimulation of urban mobility during city-scale evacuation / K. Zia, K. Farrahi, A. Riener, A. Ferscha // Simulation. 2013. Doi: 10.1177/0037549713485468
28. Agent-based simulation as an urban design tool: Iterative evaluation of a smart city masterplan: Conference paper, Proceedings of the Fifth Annual Digital Economy All Hands Meeting (London, UK, Sept 02-04, 2014) / K. H. Van Dam, D. Koering, G. Bustos-Turu, H. Jones // ResearchGate: [web] / ResearchGate GmbH. Dec. 2014. URL: [https://www.researchgate.net/publication/274077771\\_Agent-based\\_simulation\\_as\\_an\\_urban\\_design\\_tool\\_Iterative\\_evaluation\\_of\\_a\\_smart\\_city\\_masterplan](https://www.researchgate.net/publication/274077771_Agent-based_simulation_as_an_urban_design_tool_Iterative_evaluation_of_a_smart_city_masterplan) (accessed: 27.07.2020).
29. *Knura M.* Agent based simulation of pedestrian movement in urban environments // Geospatial Technologies for Local and Regional Development: short papers, posters and poster abstracts of the 22<sup>nd</sup> AGILE Conference on Geographic Information Science. Cyprus University of Technology, 17—20 June 2019, Limassol, Cyprus / Eds.: P. Kyriakidis, D. Hadjimitsis, D. Skarlatos,

- A. Mansourian. ISBN 978-3-030-14745-7. Accessible through [https://agile-online.org/images/conference\\_2019/documents/short\\_papers/35\\_Upload\\_your\\_PDF\\_file.pdf](https://agile-online.org/images/conference_2019/documents/short_papers/35_Upload_your_PDF_file.pdf)
30. *Wu S., Shuman L., Bidanda B., Prokopyev O., Kelley M., Sochats K., Balaban C.* Simulation-based decision support system for real-time disaster response management // Proceedings of the 2008 Industrial Engineering Research Conference / Eds.: J. Fowler, S. Mason. Norcross, GA: Institute of Industrial Engineers, 2008. P. 58—63.
  31. *Wu S., Shuman L., Bidanda B., Kelley M., Sochats K., Balaban C.* Embedding GIS in Disaster Simulation // 2007 ESRI International User Conference Proceedings (San Diego, USA, June 18—22, 2007): [Web] / Environmental Systems Research Institute. URL: [https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc07/papers/papers/pap\\_1847.pdf](https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc07/papers/papers/pap_1847.pdf) (accessed: 18.06.2020).
  32. *Azimi S., Delavar M.R., Rajabifard A.* An optimized multi agent-based modeling of smart rescue operation // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. Vol. XLII-3/W4. P. 93—100.
  33. Data Assimilation for Agent-Based Modelling (DUST): Website for the DUST research project: [Web] / University of Leeds. Cop. 2020. URL: <https://dust.leeds.ac.uk/> (accessed: 18.06.2020).