

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «УМНЫЙ ГОРОД»:
КОНЦЕПЦИЯ, МЕТОДЫ И ПРИМЕРЫ*****Валерий Леонидович МАКАРОВ^а, Альберт Рауфович БАХТИЗИН^б,
Гаянэ Левоновна БЕКЛАРЯН^с, Андраник Сумбатович АКОПОВ^д***

^а академик Российской Академии наук, научный руководитель ЦЭМИ РАН,
Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Российская Федерация
makarov@cemi.rssi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2802-2100>
SPIN-код: 1660-1980

^б член-корреспондент Российской Академии наук, доктор экономических наук,
профессор, директор ЦЭМИ РАН,
Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Российская Федерация
albert.bakhtizin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9649-0168>
SPIN-код: 1575-9128

^с кандидат экономических наук, старший научный сотрудник,
Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Российская Федерация
glbeklaryan@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1286-0345>
SPIN-код: 9740-9306

^д доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник,
Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Российская Федерация
akopovas@umail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0627-3037>
SPIN-код: 6833-1045

* Ответственный автор

История статьи:

Рег. № 904/2018
Получена 06.12.2018
Получена в доработанном
виде 24.12.2018
Одобрена 18.01.2019
Доступна онлайн
28.02.2020

УДК 303.09

JEL: C60, C63, C65, C88

Ключевые слова:

имитационное
моделирование города,
умный город, агентное
моделирование города,
системная динамика

Аннотация

Предмет. Ключевые процессы обеспечения жизнедеятельности города, в том числе вопросы продовольственной, инфраструктурной, противопожарной безопасности, задачи по повышению качества и доступности медицинских услуг и др., а также создание системы поддержки принятия решений в категории «умный город».

Цели. Развитие методов и инструментов управления системой класса «умный город» с использованием системной динамики и агентного моделирования.

Методология. С использованием методов имитационного моделирования, в частности методов системной динамики и агентного моделирования (поддерживаемых в системах Powersim и AnyLogic), оценивается влияние множественных управляющих параметров на динамику важнейших характеристик системы «умный город».

Результаты. Разработан подход к проектированию системы «умный город» с использованием методов системной динамики и агентного моделирования и представлены примеры разработанных имитационных моделей (реализованных в системах Powersim и AnyLogic), предназначенных для поддержки принятия решений рационального городского планирования.

Область применения. Созданные модели позволят существенно улучшить качество городской среды, в том числе удовлетворить потребности населения города в продуктах питания, обеспечить доступность медицинских услуг в лечебно-профилактических учреждениях (ЛПУ), возможность эффективной эвакуации людей при возникновении чрезвычайных ситуаций (ЧС) и др.

Выводы. Предложена укрупненная архитектура системы поддержки принятия решений класса «умный город», основанная на интеграции созданных имитационных моделей с единым информационным хранилищем и подсистемой мониторинга оперативной ситуации в городе. Представлены примеры разработанных имитационных моделей (реализованных в системах Powersim и AnyLogic), предназначенных для поддержки принятия решений рационального городского планирования.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2018

Для цитирования: Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Имитационное моделирование системы «умный город»: концепция, методы и примеры // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2020. – Т. 19, № 2. – С. 226 – 250.
<https://doi.org/10.24891/ea.19.2.226>

Введение

В настоящее время развивается новое направление, связанное с моделированием и оптимизацией характеристик городской среды как важнейшей компоненты государственного развития, определяющей качество жизни населения и влияющей на социально-экономическую систему в целом.

В РФ и других странах мира наблюдаются процессы урбанизации населения. Так, например, в России, по данным Росстата¹, доля городского населения в 1959 г. составляла 52,4%, а к 2017 г. – 74,3%. При этом темпы роста доли городского населения постоянно растут (0,1–0,3% в год). На этом фоне следует выделить Московский столичный регион (Москву и Московскую область) как важнейшую агломерацию. Отметим, что доля населения Москвы и Московской области в общем городском населении РФ также растет, в частности с 9,62% в 1991 г.² до 16,89 % – в 2018 г.³. Подобная динамика актуализирует задачу рационального управления городской агломерацией и обуславливает необходимость разработки систем поддержки принятия решений класса «умный город» [1, 2].

Итак, Москва представляет собой сложную многоуровневую систему, состоящую из множества связанных подсистем со своими внутренними характеристиками. Например, можно выделить транспортную подсистему,

сферу жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), подсистему продовольственного обеспечения и др. Подобные подсистемы характеризуются наличием множественных обратных связей. Например, при принятии решений о выборе мест для так называемой точечной застройки необходимо учитывать транспортную доступность, а также наличие объектов социальной инфраструктуры (детских садов, школ, поликлиник, «магазинов у дома» и др.). В противном случае спрос на данное жилье не будет соответствовать ожиданиям строительных компаний, потребностям населения и городских властей. Таким образом, сложность решаемых задач по рациональному управлению городской агломерацией обуславливает необходимость применения методов имитационного моделирования, в частности методов системной динамики⁴ [3, 4] и агентного моделирования⁵ [5–7].

Впервые методы системной динамики были разработаны Дж. Форрестром в 1960-х гг. и применены для задач моделирования динамики города [8, 9]. Эти работы позволили определить основные закономерности в развитии города как сложной системы со своими обратными связями на уровне различных взаимодействующих подсистем. В дальнейшем применение методов системной динамики для реализации концепции «умный город – умный регион» было развито в работе [1], в которой была предложена модель рационального управления регионом с выделением ключевых управляющих параметров в области жилищного строительства, здравоохранения, образования и др., и их влияния на макроэкономические показатели региона.

Вместе с тем модели системной динамики не учитывают некоторых особенностей города

* Статья публикуется по материалам журнала «Национальные интересы: приоритеты и безопасность». 2019. Т. 15. Вып. 2. С. 200–224.
 URL: <https://doi.org/10.24891/ni.15.2.200>

¹ Проект выполнен при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ № 18-29-03139-мк.

² Демографический ежегодник России, 2017. Росстат.
 URL: http://gks.ru/free_doc/doc_2017/demo17.pdf

³ Регионы России. Социально-экономические показатели: стат. сборник. М.: Росстат, 2002.

⁴ Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2018 г.: стат. сборник. М.: Росстат, 2018.

⁴ Акопов А.С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2015. 389 с.

⁵ Там же.

как сложной децентрализованной системы с множественными субъектами управления (например, объектами социальной инфраструктуры) и связанными с ними людскими потоками (например, потоками пациентов в ЛПУ, потоками покупателей в магазинах и др.). В результате было трудно прогнозировать потребности в развитии соответствующих инфраструктурных объектов, определить оптимальное количество школ, поликлиник, магазинов, парковок и др., требуемых для удовлетворения потребностей города. Соответственно, важно количественно оценить характеристики подобных объектов, то есть требуемую численность врачей (по специализациям) в поликлиниках, количество койко-мест в больницах, число учителей в школах и т.д. Именно поэтому для задач рационального управления подсистемами города также требуется применение методов агентного моделирования, особенностью которых является ориентация на построение децентрализованных и деагрегированных систем с индивидуальными правилами поведения для всех экономических агентов.

Примерами агентных моделей, относящихся к проблематике «умного города», являются модели сложных эколого-экономических систем⁶ [10, 11], агентные модели поведения толпы и агентов-спасателей в условиях чрезвычайных ситуаций [5, 12–14], агентные генетические алгоритмы [15] и др.

Цель данной статьи – развитие методов и инструментов управления системой класса «умный город» с использованием системной динамики и агентного моделирования, позволяющих определять наилучшие стратегии развития городской агломерации на индивидуальном уровне соответствующих субъектов.

Объектом исследования является город (в данном конкретном случае Москва) как сложная многоуровневая система со своими характеристиками.

Предметом исследования являются ключевые процессы обеспечения жизнедеятельности города, в том числе вопросы продовольственной, инфраструктурной, противопожарной безопасности, задачи по повышению качества и доступности медицинских услуг и др. и создание системы поддержки принятия решений класса «умный город».

Методология исследования основана на применении методов имитационного моделирования, в частности методов системной динамики и агентного моделирования (поддерживаемых в системах Powersim и AnyLogic), позволяющих оценивать влияние множественных управляющих параметров на динамику важнейших характеристик системы «умный город». Кроме того, используются методы кластерного, корреляционного анализа и другие, позволяющие выявить зависимости между характеристиками отдельных агентов и сформировать соответствующие рекомендации.

Концепция системы «умный город»

Итак, «умный город» – это город, в котором прежде всего обеспечивается необходимый уровень удовлетворенности населения условиями городской среды и защищенности от различного вида рисков. К подобным факторам относятся продовольственные, экологические, инфраструктурные риски, риски возникновения чрезвычайных ситуаций, риски дефицита объектов социальной инфраструктуры, снижения доступности медицинских услуг и др. В связи с этим требуется разработка комплекса имитационных моделей города, реализуемых в виде интегрированной системы поддержки принятия решений. Подобные модели позволяют исследовать влияние различных управляющих параметров на важнейшие характеристики города с учетом действующей системы обратных связей. Например, увеличение сети городских дорог может благоприятно повлиять на скорость транспортных потоков и сократить выбросы вредных веществ, однако в случае множественной точечной застройки (вдоль новых дорог) положительный эффект будет

⁶ Акопов А.С., Бекларян Г.Л., Бекларян Л.А. Агентное моделирование эколого-экономической системы города (на примере г. Ереван, Республика Армения) // Искусственные общества. 2017. Т. 12. № 3–4. С. 1–10.

нивелирован. На *рис. 1* представлена укрупненная схема важнейших характеристик системы «умный город».

Как видно из *рис. 1*, важнейшим интегральным показателем системы является «удовлетворенность населения условиями городской среды». На данный показатель влияют такие характеристики, как концентрация выбросов вредных веществ в атмосфере, объем жилищного строительства и состояние ЖКХ, уровень инфраструктурной и транспортной безопасности, уровень продовольственной безопасности и др. С другой стороны, характеристика удовлетворенности населения влияет на привлекательность городской среды, что, в свою очередь, влияет на численность населения в городе и динамику *валового городского продукта* (ВГП).

Рост ВГП невозможен без улучшения качества жизни населения, наличия благоприятной окружающей среды, высокого уровня инфраструктурной, продовольственной и транспортной безопасности, доступности медицинских услуг, наличия объектов социальной инфраструктуры (детских садов, школ, больниц и др.).

Далее нами будут рассмотрены конкретные примеры имитационных моделей, являющихся ядром системы «умный город», разработанных с использованием методов системной динамики и агентного моделирования и используемых в Москве для подготовки принятия стратегических решений.

Примеры имитационных моделей класса «умный город»

Первая из рассматриваемых имитационных моделей предназначена для определения оптимальных сценариев развития розничной торговли в городе посредством улучшения доступности продуктов питания для населения.

Для этого была разработана имитационная модель (реализованная в Powersim), позволяющая, в частности, оценивать влияние темпов открытия (закрытия) новых магазинов различных форматов (например, «магазинов у дома», супермаркетов, гипермаркетов и др.) в

различных районах Москвы (*рис. 2*). С помощью подобной модели можно оценить среднюю шаговую доступность магазинов розничной торговли, а также уровень обеспеченности населения продуктами (степень удовлетворения спроса) в районах Москвы в зависимости от их физического местоположения и других важных характеристик (объема товарооборота, ассортимента, ценовой политики и др.).

Применение подобной модели показало, что в таком крупном мегаполисе, как Москва, имеется дефицит «магазинов у дома» и «минимаркетов» в отдельных районах (в частности, в ЦАО), что во многом обусловлено высокой стоимостью аренды и дефицитом свободных мест. С другой стороны, жители спальных районов, как правило, имеют в условной шаговой доступности супермаркеты, однако их ценовая и продуктовая политика не всегда является сбалансированной, что зачастую приводит к дефициту отдельных товарных позиций либо необоснованному завышению цен.

Вторая разработанная имитационная модель предназначена для прогнозирования динамики и структуры продуктовой корзины при поставках продуктов питания в социально значимые объекты, например в школы Москвы (*рис. 3*).

Подобная модель позволяет, в частности, спрогнозировать требуемый объем поставок в зависимости от численности школьников и нормативов потребления продуктов питания, а также оценить затраты на устойчивое продовольственное обеспечение всех школ Москвы с учетом динамики цен на российские и импортные продукты питания.

Данный подход особенно актуален с учетом стратегии на продовольственное импортозамещение и вместе с тем учитывает требования по организации качественного и сбалансированного питания в школах, влияющего на здоровье детей.

Следующая имитационная модель предназначена для оценки влияния инвестиций в жилищное строительство Москвы на обеспеченность населения жильем

и состояние объектов жилого фонда, дифференцируемое в зависимости от года постройки, типа домов, степени изношенности и др. (рис. 4).

Как известно, в Москве наблюдается дефицит нового жилого фонда. Более 350 тыс. семей должны переехать по программе реновации, в которую включены более 5 тыс. домов. При этом практически все районы ЦАО не вошли в данную программу.

Таким образом, состояние жилого фонда в городе достаточно неоднородно, и требуется оценка потребностей в инвестиционных ресурсах для формирования стратегии развития жилищного строительства. Важными характеристиками подобной модели является динамика спроса на жилье, наличие свободных территорий под застройку, состояние жилого фонда по районам и др.

Следующая имитационная модель предназначена для исследования поведения большого скопления людей (толпы) в условиях чрезвычайных ситуаций (рис. 5). Подобная модель основана на использовании методов агентного моделирования (АОМ), которые используются для определения индивидуальных правил поведения эвакуируемых людей (обычных агентов) и агентов-спасателей в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС).

Как известно, основными причинами гибели людей во время ЧС (например, взрывов, пожаров) является невозможность быстрой эвакуации из-за возникновения давки и эффекта «турбулентности толпы»⁷ [16]. Давка приводит к чрезмерному скоплению людей у выходов, что существенно затрудняет эффективную эвакуацию. Эффект «турбулентности толпы» заключается в спонтанном возникновении и распространении ударной волны из-за паники, порождаемой желанием отдельных агентов, как правило, находящихся в центре толпы, резко увеличить свое личное пространство. При нарастающем увеличении плотности

людей в толпе подобный агент первоначально соглашается с уменьшением своего личного пространства, однако при возникновении ЧС вследствие паники и давки агент стремится резко увеличить свое личное пространство, отталкивая ближайших агентов. Это порождает ударную волну, которая может привести к гибели агентов, расположенных на периферии (по краям), например, в результате их выталкивания на стены и другие опасные препятствия.

Для изучения подобных эффектов, была создана и реализована в AnyLogic агентная модель поведения толпы в условиях ЧС (рис. 5).

В результате ряда исследований [5, 13], было установлено, что применение специальных (мягких) столбов-препятствий, расставленных определенным способом в помещении, существенно (примерно в четыре раза) уменьшает количество агентов, погибших вследствие давки или «турбулентности», что обусловлено эффектом «разряжения» толпы (рис. 6). Наличие столбов-препятствий побуждает агентов менять свой маршрут эвакуации, что приводит к равномерному распределению людских потоков в соответствующем помещении. В результате устраняются предпосылки возникновения эффектов «турбулентности» толпы и давки.

Помимо использования столбов-препятствий, важную роль в обеспечении быстрой эвакуации играют специально обученные агенты-спасатели, которые итерационно выводят людей из помещения. При этом основная проблема большинства ЧС – это быстрое задымление аварийного помещения и возможная гибель людей из-за отравления продуктами сгорания. Именно поэтому действия агентов-спасателей должны быть максимально рациональными, в частности, они должны направляться к возникающим кластерам толпы, представляющим собой множественные скопления людей, сформированные в результате эффекта «притяжения толпы», который проявляется в стремлении близко расположенных людей друг к другу в условиях ЧС.

⁷ Helbing D., Johansson A., Al-Abideen H.Z. Crowd Turbulence: The Physics of Crowd Disasters. In: The Fifth International Conference on Nonlinear Mechanics (ICNM-V). Shanghai, 2007, pp. 967–969.

Для решения подобной задачи была создана имитационная модель поведения агентов-спасателей на основе алгоритма нечеткой кластеризации с реализацией в системе AnyLogic [12, 16]. С использованием реальных данных, полученных на основе анализа ЧС, произошедшего в аэропорту Домодедово в 2011 г., были проведены исследования, подтвердившие высокую эффективность предложенного алгоритма поведения агентов-спасателей (рис. 7).

Последний пример относится к моделированию сложных эколого-экономических систем [11–13], в котором, в частности, решается задача рационального городского озеленения с целью минимизации суточной концентрации вредных веществ в атмосфере (на примере Еревана, Республика Армения).

На рис. 8 представлена агентно-ориентированная модель распространения вредных выбросов в городе, учитывающая сложный абсорбционно-диффузионный механизм взаимодействия агентов-выбросов с агентами-деревьями. В результате подобного взаимодействия при контакте выбросов с зелеными насаждениями постепенно уменьшается радиус личного пространства агентов-выбросов, величина которых пропорциональна концентрации соответствующих вредных веществ (например, органической и неорганической пыли, CO_2 , NO_x , SO_2 , тяжелых металлов и др.).

В случае значительного (в 10 и более раз) снижения радиуса личного пространства агентов-выбросов относительно радиусов крон агентов-деревьев вредные вещества проникают сквозь соответствующие зеленые насаждения (но уже в относительно малой концентрации) и могут достичь мест жилой застройки. При этом в модели учитываются множественные влияющие факторы – такие как оптимальные координаты размещения агентов-деревьев, различные конфигурации посадки зеленых насаждений для каждого древесного кластера (например, в виде окружности, двойной окружности,

арифметической спирали и др.), виды деревьев (например, тополь, дуб, клен и др.), расстояния между деревьями и др., а также характеристики внешней среды, в частности, доминантное направление и скорость ветра, зависящие от времени года.

Отметим, что разработанная имитационная модель характеризуется наличием большого числа взаимодействующих агентов (более 12 000 агентов), включающих деревья, источники вредных выбросов (автотранспорт, предприятия) и др. Важной особенностью подобной модели является возможность защиты от вредных выбросов социально значимых объектов.

Далее более подробно рассмотрим пример имитационного моделирования и анализа характеристик лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ) на примере поликлиники и стационаров Москвы как важнейшего элемента социально ориентированной системы «умный город».

Моделирование и анализ характеристик ЛПУ Москвы

Имитационное моделирование и анализ характеристики ЛПУ Москвы нацелено на создание системы поддержки принятия решений в сфере медицинского обслуживания, улучшения характеристик доступности и обеспеченности населения медицинскими услугами.

На первом этапе с использованием суточных данных, выгруженных из единой медицинской информационно-аналитической системы (ЕМИАС) за 2012 г., был выполнен первичный анализ динамики потока пациентов в поликлиниках Москвы. При этом использовались методы корреляционного, регрессионного и кластерного анализа [17]. Отметим, что исходные данные были деперсонализированы в целях соблюдения требований конфиденциальности.

Далее для каждого ЛПУ Москвы и специализации врача были выделены следующие важнейшие характеристики:

- *доступность* – количество дней ожидания пациента приема у врача, выбранной специализации (например, у врача-терапевта);
- *обеспеченность* – соотношение между числом пациентов на одного врача данной специализации в соответствии с законодательством и числом пациентов на одного врача в соответствии с нормами прикрепления. Если обеспеченность равна 1, то ЛПУ соответствует законодательным нормам, устанавливаемым Министерством здравоохранения РФ в части обеспеченности медицинским персоналом. В противном случае имеется дефицит или профицит соответствующих врачей-специалистов.

На *рис. 9* представлено распределение всех ЛПУ Москвы по усредненным характеристикам обеспеченности и доступности врачей без учета их специализации.

Множество всех рассмотренных ЛПУ имеет три основных таксона (области концентрации). При этом в третьем кластере обнаружена высокая корреляция между характеристиками обеспеченности и доступности.

Аналогичный подход был применен для анализа доступности и обеспеченности в разрезе врачей конкретных специальностей, например, для врачей-терапевтов (*рис. 10*).

Далее была обнаружена группа «высокочастотных» пациентов, которые регулярно заполняют очередь к врачам, то есть число повторных визитов пациентов данной группы существенно превышает статистическую норму (более пяти визитов в месяц к одному и тому же врачу).

Также практически в каждом ЛПУ Москвы наблюдается устойчивая группа пациентов, регулярно записывающихся к нескольким специалистам в месяц, например, к терапевту и хирургу. При этом количество таких записей к отдельным специалистам (преимущественно терапевтам) может быть аномально высоким.

На *рис. 11* показана частотная диаграмма, визуализирующая число посещений одних и тех же врачей одними и теми же пациентами на примере городской поликлиники № 108 в 2012 г. Отметим, что высокое значение числа пациентов с повторными диагнозами является косвенным признаком неудовлетворительного качества оказания медицинских услуг населению со стороны данного конкретного врача.

Далее была разработана имитационная модель типового ЛПУ Москвы, учитывающая половозрастную и прочую дифференциацию потока пациентов, а также классификацию врачей по их специализации. Данная модель была реализована в Powersim (*рис. 12*).

Отметим, что предложенная имитационная модель позволяет исследовать влияние следующих управляющих параметров:

- количество имеющихся врачей (по специализациям);
- количество свободных койко-мест в стационарах;
- соотношение числа пациентов на одного врача;
- количество операций в день в стационарах;
- число кабинетов в параклинических отделениях;
- структура врачей-специалистов в ЛПУ;
- средняя заработная плата врачей;
- ежедневное расписание врача (структура квот для приема пациентов);
- количество прикрепленных к поликлинике пациентов;
- доля врачей высшей категории и младшего медицинского персонала;
- обеспеченность современным медицинским оборудованием;
- нормативы пребывания пациентов в больницах в послеоперационный период (по типам операций);

– другие параметры.

При этом в качестве ключевых показателей деятельности поликлиник и стационаров Москвы используются следующие: качество медицинской помощи (например, количество успешных операций в стационарах, количество обращений с рецидивами и т.д.), доступность медицинских услуг (время ожидания приема к врачу, время ожидания операции и т.д.), объем услуг, оказанных по обязательному (ОМС) и добровольному (ДМС) медицинскому страхованию и др.

В результате проведенных численных исследований, проведенных с использованием разработанной имитационной модели и данных, полученных из системы ЕМИАС, были сделаны следующие важные выводы.

1. Большая часть поликлиник Москвы ниже рекомендуемых норм обеспечена врачами, в особенности имеющими узкую специализацию (например, нефрологами).

2. В большинстве поликлиник Москвы нет прямой корреляции между характеристиками обеспеченности и доступности при оценке усредненных показателей (то есть по всем врачам), однако подобная зависимость наблюдается при кластеризации поликлиник по мощности (количеству регулярно обслуживаемых пациентов) и специализации врачей.

3. Множество исследованных поликлиник Москвы имеет три основных таксона (области концентрации), различающихся уровнем зависимости между характеристиками обеспеченности и доступности. В третьем кластере обнаружена высокая корреляция между данными характеристиками.

4. В большинстве поликлиник Москвы имеется устойчивая группа «высокочастотных» пациентов (преимущественно предпенсионного и пенсионного возрастов), которая регулярно заполняет очередь к врачам.

5. Во многих поликлиниках Москвы наблюдаются пациенты, которые регулярно посещают одних и тех же специалистов, вероятно, с одними и теми же жалобами на здоровье. Подобная зависимость является

признаком недостаточно удовлетворительного качества медицинской помощи.

6. Чувствительность доступности врачей к динамике «высокочастотных» пациентов выше у врачей, являющихся узкими специалистами (преимущественно у невролога, отоларинголога, офтальмолога, хирурга и эндокринолога), что является дополнительным признаком дефицита подобных специалистов.

7. В большинстве стационаров Москвы наблюдается профицит свободных койко-мест, однако во многом он обусловлен сезонным характером спроса на соответствующие медицинские услуги, а также действующими нормативами пребывания пациентов в стационарах.

8. Во многих стационарах Москвы наблюдается дефицит врачей высшей категории и младшего медицинского персонала, во многом обусловленный недостаточным уровнем заработной платы.

Интеграция имитационных моделей системы «умный город»

На *рис. 13* представлена укрупненная архитектура системы поддержки принятия решений класса «умный город», основанная на интеграции созданных имитационных моделей с единым информационным хранилищем и подсистемой мониторинга оперативной ситуации в городе.

Особенностью предлагаемого подхода является интегрируемость разработанных имитационных моделей (созданных с использованием методов системной динамики и агентного моделирования) в единую систему поддержки принятия решений класса «умный город». При этом совместное использование отдельных имитационных моделей должно быть обусловлено спецификой решаемой задачи. Например, результаты имитационного моделирования поведения толпы в условиях ЧС могут быть использованы в имитационной модели поведения агентов-спасателей для формирования оптимальной стратегии эвакуации. Результаты имитационного моделирования характеристик розничной торговли могут быть использованы в

имитационной модели продовольственного обеспечения города. Имитационная модель распространения вредных выбросов позволяет спрогнозировать концентрации вредных выбросов в различных районах города, значения которых могут быть учтены в имитационной модели жилищного строительства для выбора наилучших мест для жилой застройки.

При этом важно наличие подсистемы мониторинга оперативной ситуации в городе, данные из которой должны поступать в единое информационное хранилище в режиме реального времени. В результате имитационные модели будут использовать актуальные данные, обеспечивая возможность поиска наилучших решений по рациональному управлению городом.

Заключение

Итак, нами представлен подход к проектированию системы «умный город» (Smarter City) с использованием методов системной динамики, агентного моделирования и кластерного анализа. Разработана концептуальная модель системы «умный город», основанная на оценке удовлетворенности условиями городской среды с учетом влияния множественных характеристик.

Представлены примеры разработанных имитационных моделей (реализованных в системах Powersim и AnyLogic), предназначенные для поддержки принятия решений рационального городского планирования, а именно:

- 1) имитационная модель развития розничной торговли;
- 2) имитационная модель продовольственного обеспечения города;
- 3) имитационная модель жилищного строительства;
- 4) агентная модель поведения толпы в условиях чрезвычайных ситуаций;

5) имитационная модель поведения агентов-спасателей в условиях ЧС на основе нечеткой кластеризации;

6) агентная модель распространения вредных выбросов в городе.

Рассмотрен пример использования методов системной динамики и кластерного анализа для оценки эффективности ЛПУ Москвы на основе данных, полученных из единой медицинской информационно-аналитической системы (ЕМИАС). Продемонстрированы возможности повышения качества и доступности медицинских услуг населению за счет рационального управления характеристиками ЛПУ Москвы с учетом фактических потоков пациентов.

Визуализированы распределения ЛПУ Москвы по характеристикам обеспеченности и доступности для врачей всех специализаций. Выявлена группа «высокочастотных» пациентов, которая регулярно заполняет очередь к врачам, то есть число повторных визитов пациентов данной группы существенно превышает статистическую норму. Во многих поликлиниках Москвы имеются пациенты, которые регулярно посещают одних и тех же специалистов с одним и тем же диагнозом. Подобная зависимость является признаком недостаточно удовлетворительного качества медицинской помощи.

С использованием методов системной динамики разработана имитационная модель типового ЛПУ и получены конкретные рекомендации по рациональному управлению поликлиниками и стационарами Москвы.

Предложена укрупненная архитектура системы поддержки принятия решений класса «умный город», основанная на интеграции созданных имитационных моделей с единым информационным хранилищем и подсистемой мониторинга оперативной ситуации в городе.

Дальнейшие исследования будут нацелены на создание программной платформы для реализации крупномасштабных агентно-ориентированных имитационных моделей с использованием C++ и MPI (*Message Passing*

Interface), которые могут использовать моделирования поведения большого числа суперкомпьютерные технологии. Подобный инструментарий особенно актуален для агентов, например, транспортных средств, систем класса «умный город» в целях людей, предприятий и др.

Рисунок 1

Укрупненная схема системы «умный город»

Figure 1

A consolidated scheme for the Smart City system



Источник: авторская разработка

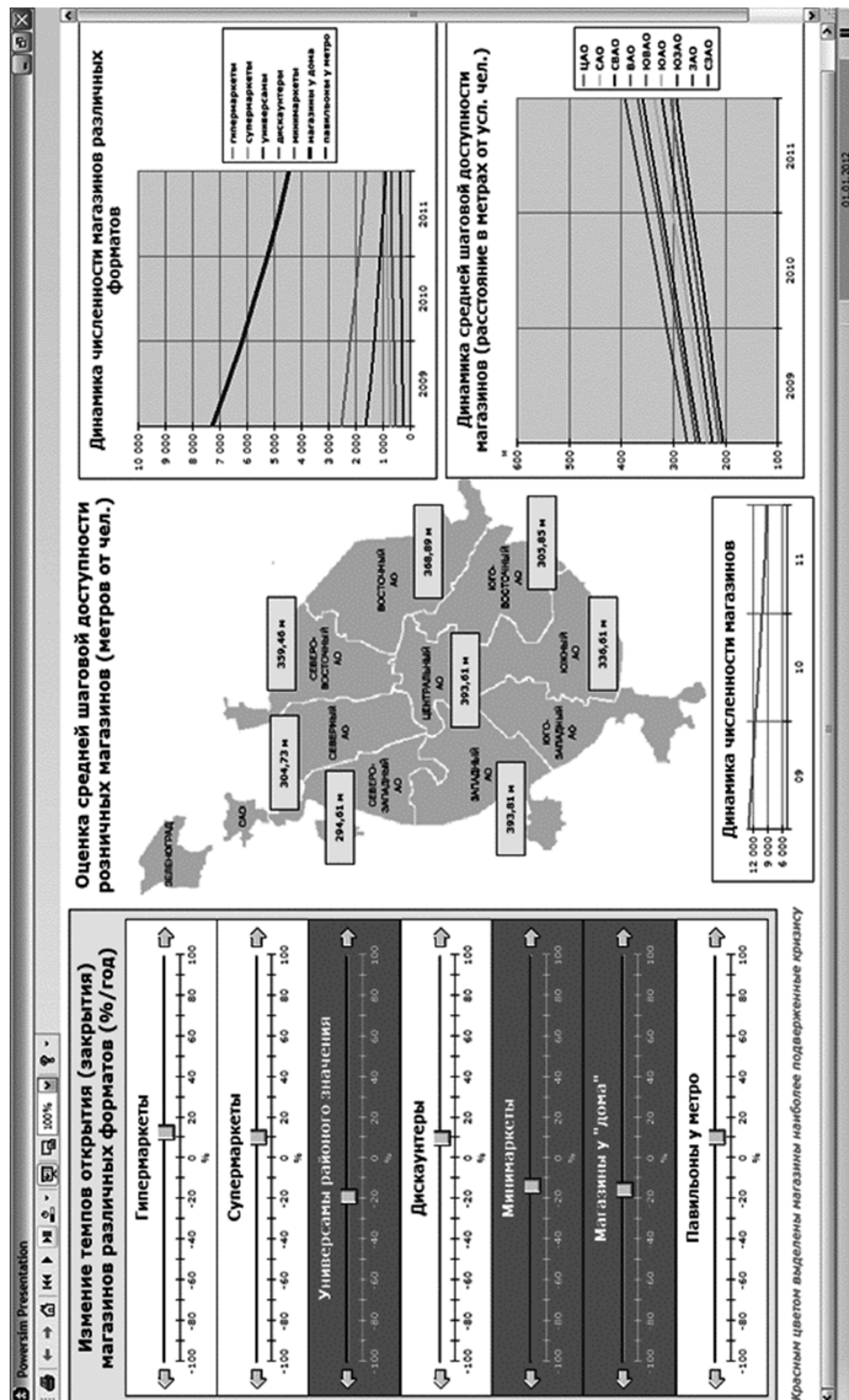
Source: Authoring

Рисунок 2

Имитационная модель развития розничной торговли

Figure 2

A simulation model for retail development



Источник: авторская разработка

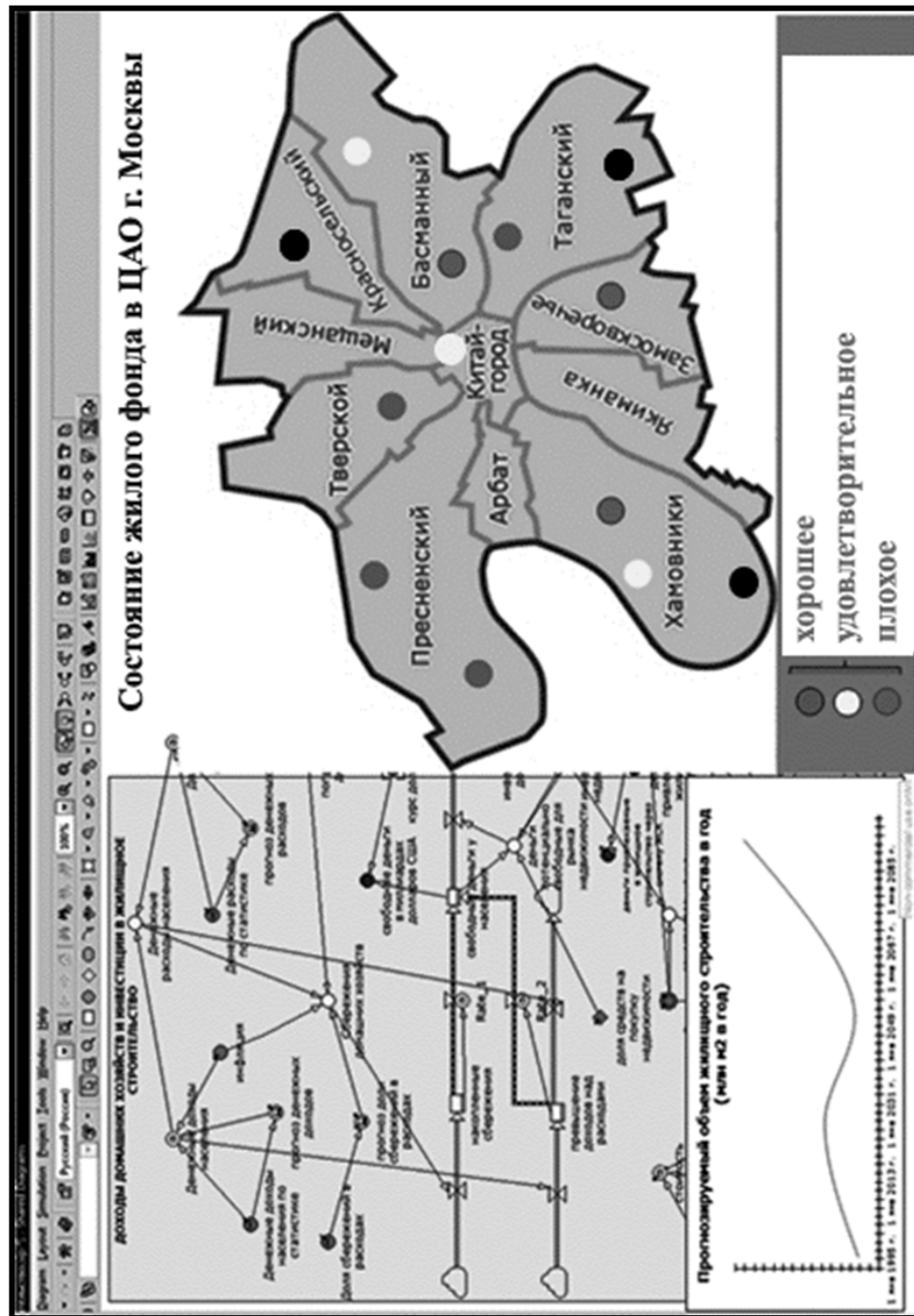
Source: Authoring

Рисунок 4

Имитационная модель жилищного строительства

Figure 4

A simulation model for residential housing construction



Источник: авторская разработка

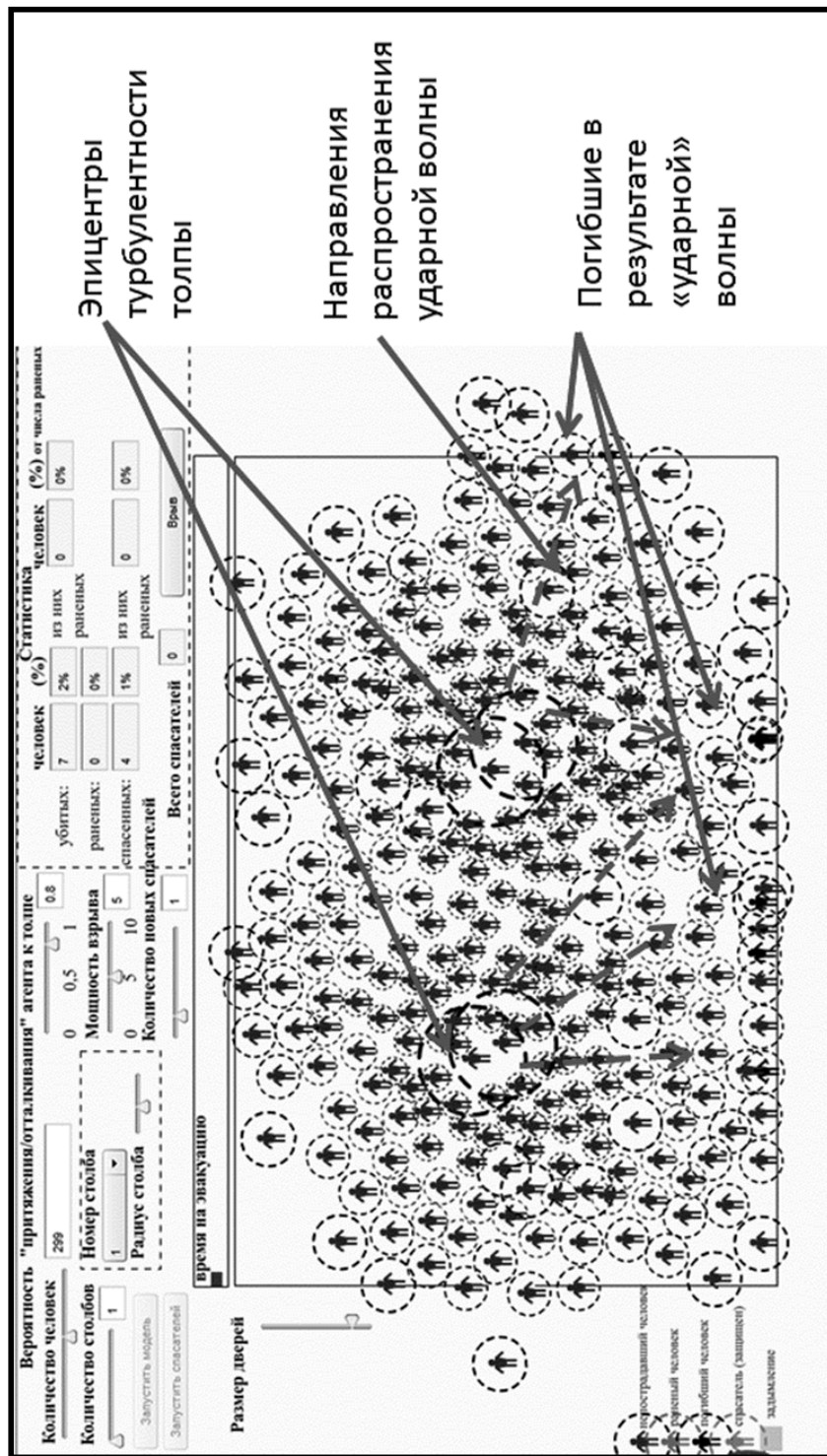
Source: Authoring

Рисунок 5

Имитационная модель поведения толпы в условиях чрезвычайных ситуаций, реализованная в AnyLogic

Figure 5

A simulation model of crowd behavior in emergency as implemented via AnyLogic



Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Рисунок 7

Моделирование поведения агентов-спасателей при возникновении ЧС (на примере аэропорта Домодедово)

Figure 7

Behavioral modeling of rescuing agents in case of emergency: The case of Domodedovo Airport



Источник: авторская разработка

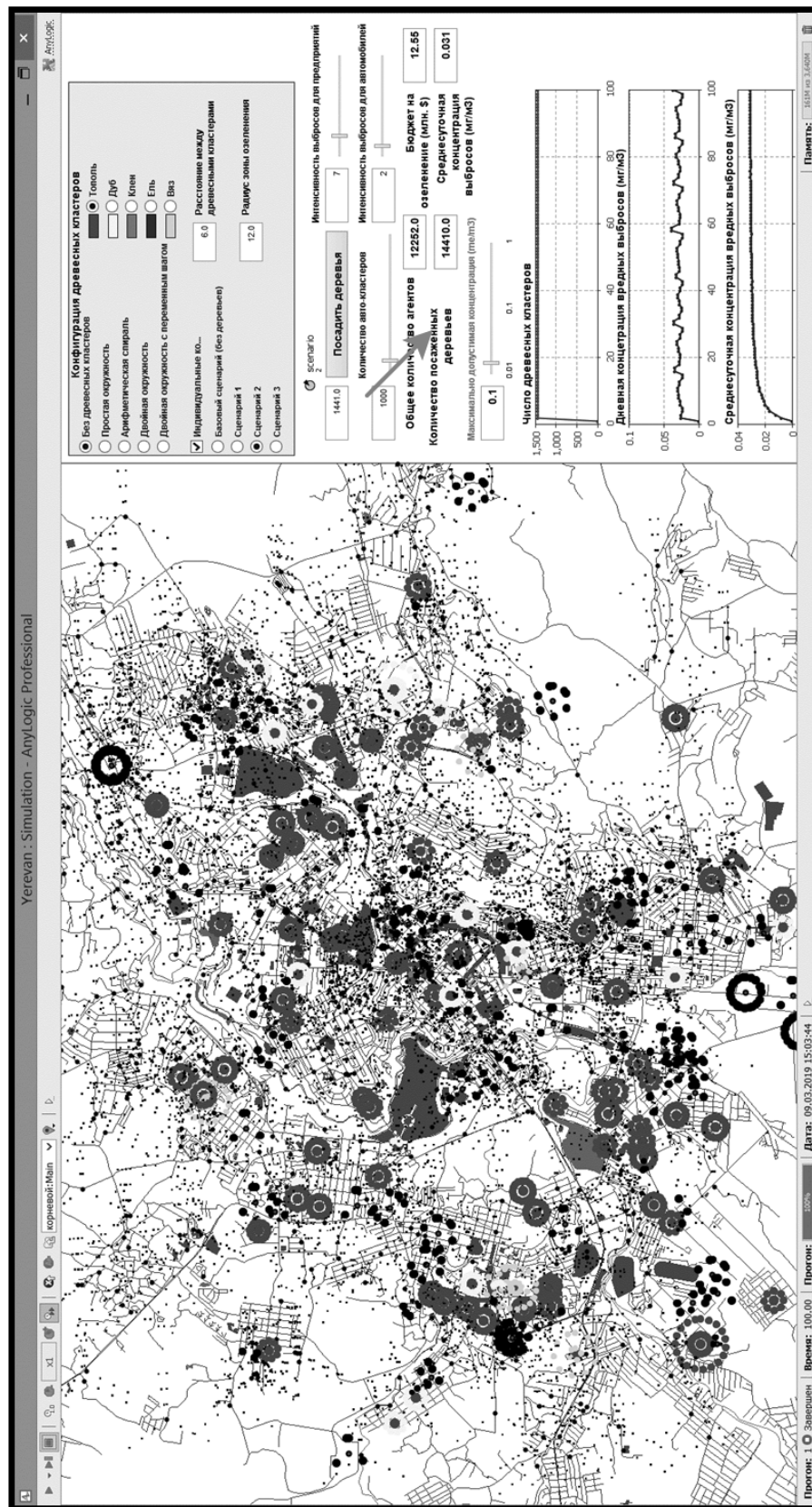
Source: Authoring

Рисунок 8

Моделирование распространения вредных выбросов (на примере г. Ереван, Республика Армения)

Figure 8

Modeling of hazardous emissions spread: Evidence from Yerevan, Republic of Armenia



Источник: авторская разработка

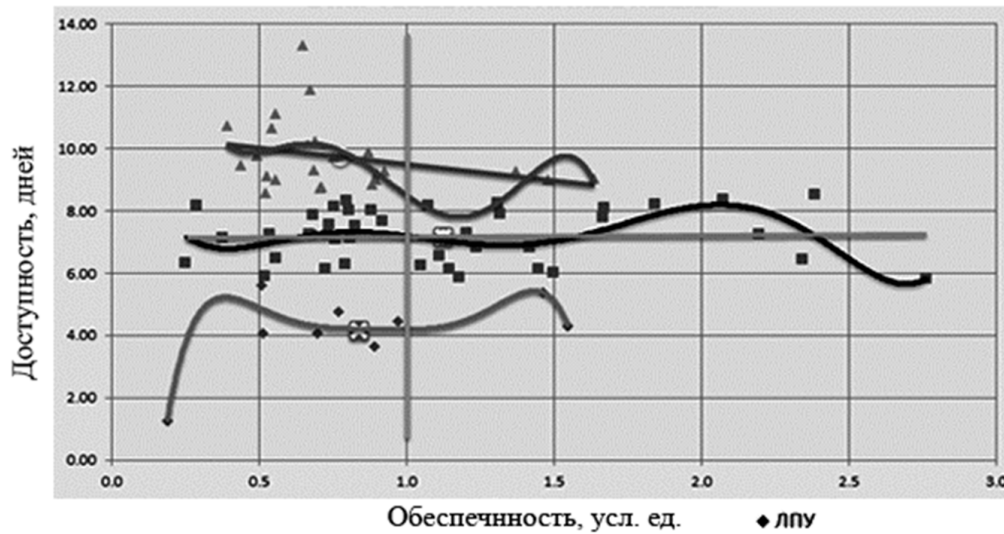
Source: Authoring

Рисунок 9

Распределение ЛПУ г. Москвы по характеристикам обеспеченности и доступности для врачей всех специализаций

Figure 9

Moscow-based healthcare institutions broken down by availability and accessibility of all medical specialists



Источник: авторская разработка

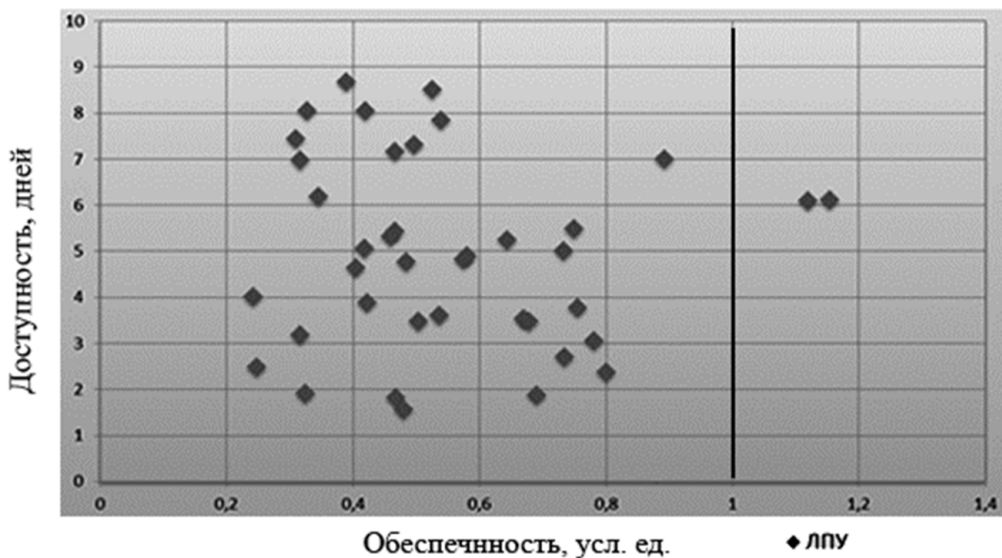
Source: Authoring

Рисунок 10

Распределение ЛПУ г. Москвы по характеристикам обеспеченности и доступности для врачей-терапевтов

Figure 10

Moscow-based healthcare institutions broken down by availability and accessibility of primary care physicians



Источник: авторская разработка

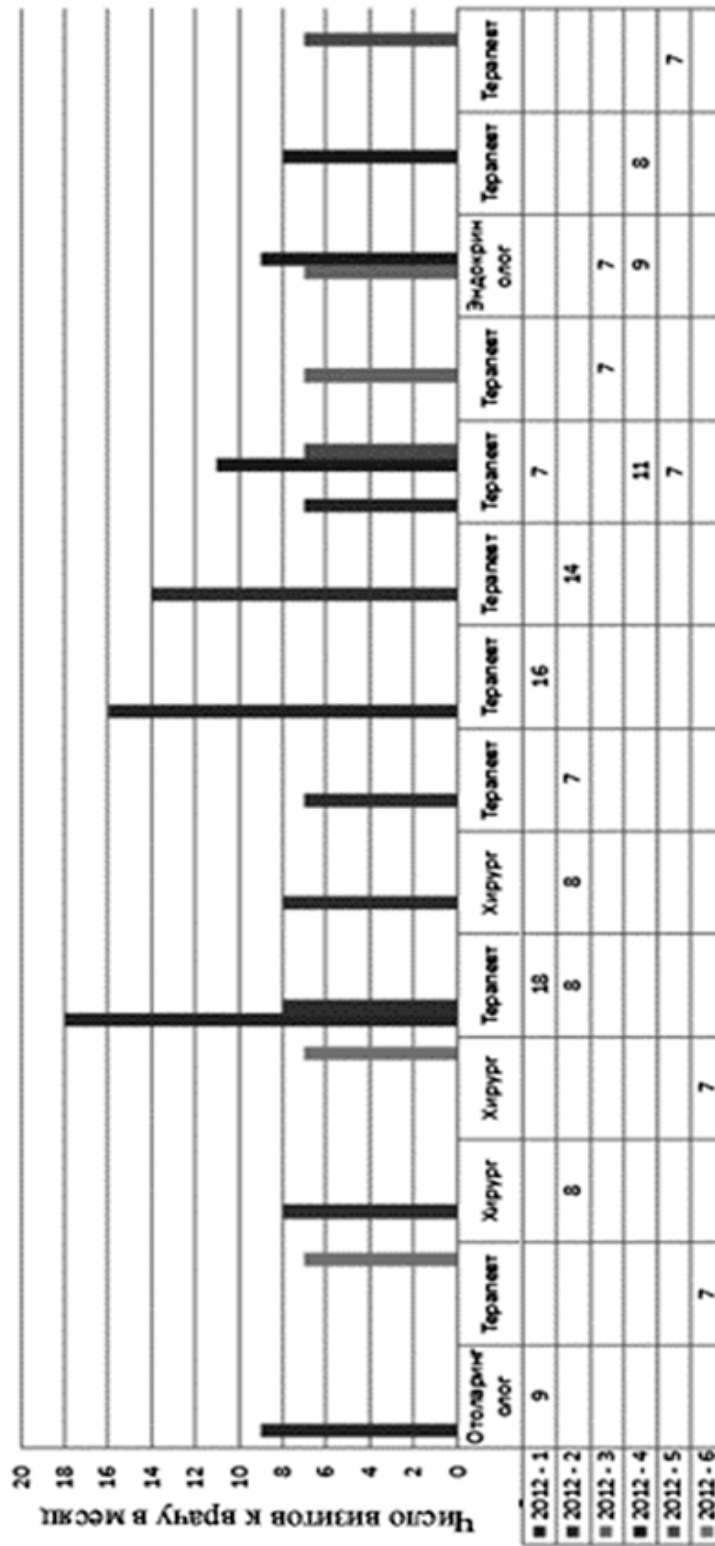
Source: Authoring

Рисунок 11

Частота посещений одних и тех же врачей-специалистов одними и теми же пациентами в 2012 г. (на примере городской поликлиники № 108)

Figure 11

Frequency of patients' recurring visits to the same medical specialists in 2012: Evidence from City Outpatients' Clinic No. 108



Источник: авторская разработка

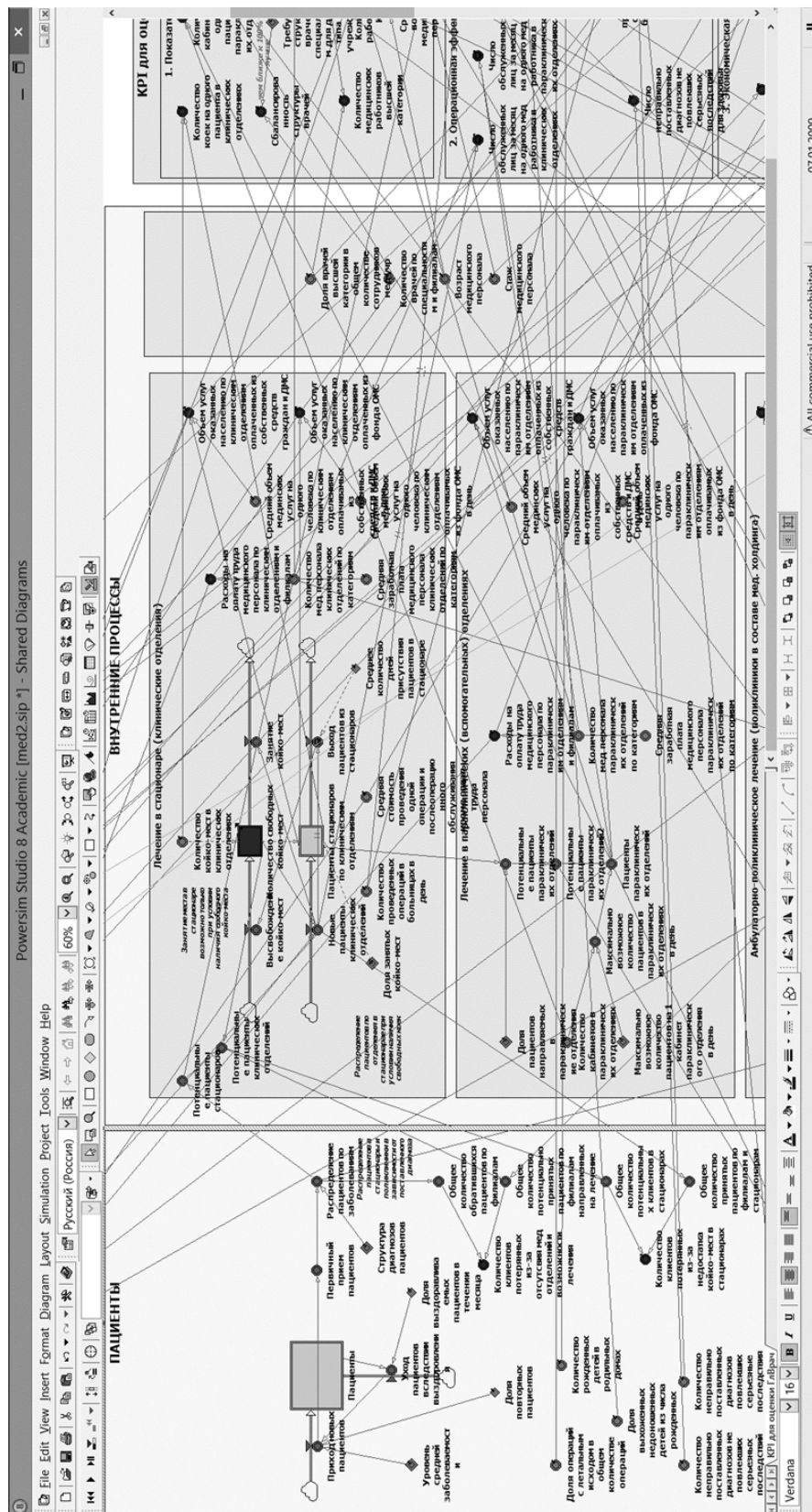
Source: Authoring

Рисунок 12

Фрагмент имитационной модели деятельности ЛПУ, реализованной в Powersim

Figure 12

A fragment of the simulation model reflecting the performance of a healthcare institution as implemented via Powersim



Источник: авторская разработка

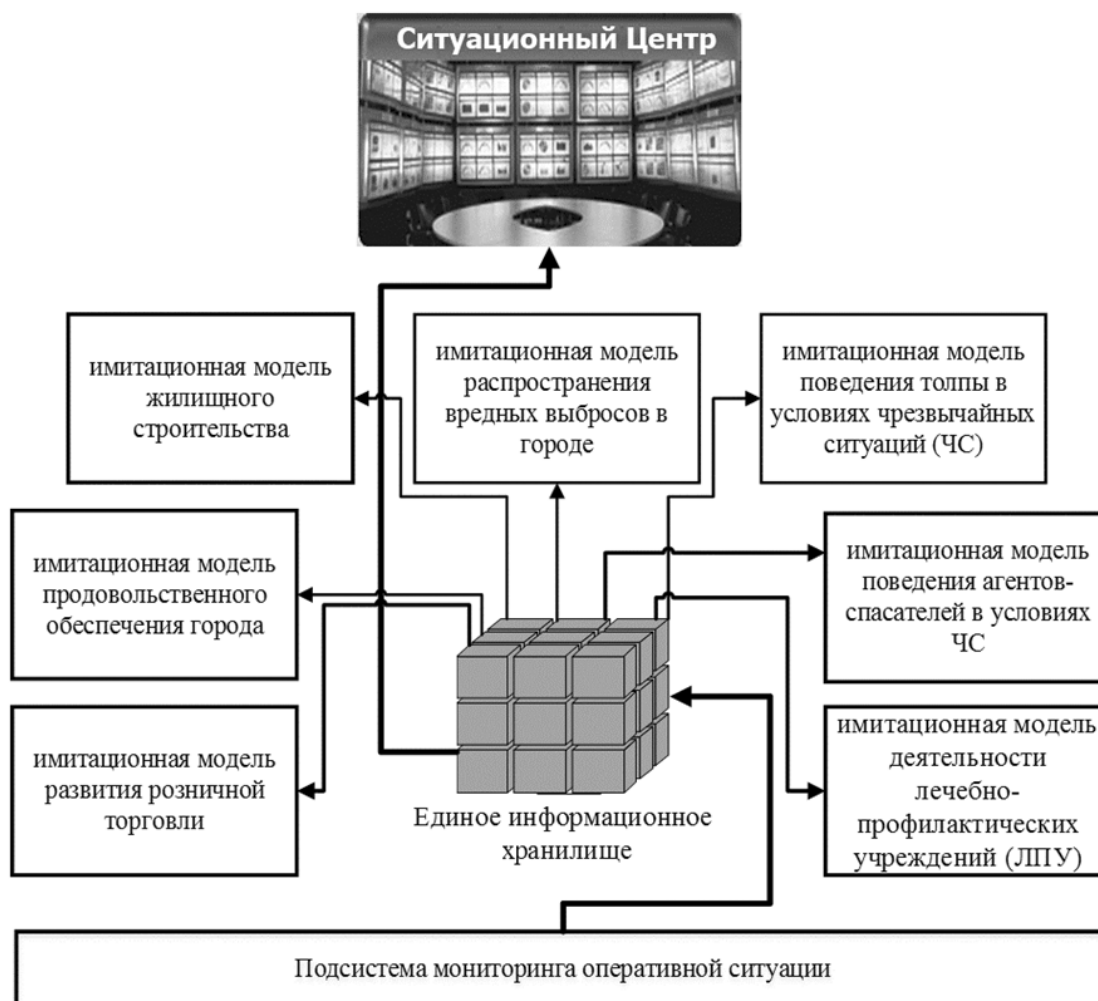
Source: Authoring

Рисунок 13

Укрупненная архитектура системы поддержки принятия решений класса «умный город»

Figure 13

A consolidated architecture of the Smart City decision-making support system



Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Список литературы

1. Akopov A.S., Beklaryan G.L. Modelling the Dynamics of the “Smarter Region”. In: Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computational Intelligence for Financial Engineering & Economics. IEEE, 2014, pp. 203–209. URL: <https://doi.org/10.1109/WSC.2014.7020185>
2. Komninos N. Intelligent Cities and Globalisation of Innovation Networks. Routledge, 2008, p. 308.
3. Akopov A.S. Designing of Integrated System-Dynamics Models for an Oil Company. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2012, vol. 45, no. 4, pp. 220–230. URL: <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2012.051122>
4. Meadows D.H. Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. New York, Universe Books, 1972.

5. Акопов А.С., Бекларян Л.А. Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // Автоматика и телемеханика. 2015. № 10. С. 131–143.
6. Бахтизин А.Р. Агент-ориентированные модели экономики. М.: Экономика, 2008. 279 с.
7. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика, 2013. 295 с.
8. Forrester J. Industrial Dynamics – A Major Breakthrough for Decision Makers. *Harvard Business Review*, 1958, vol. 36, no. 4, pp. 37–66.
9. Forrester J. Urban Dynamics. Pegasus Communications. Waltham, MT, USA, 1969.
10. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelian A.K. Agent-Based Modelling for Ecological Economics: A case study of the Republic of Armenia. *Ecological Modelling*, 2017, vol. 346, pp. 99–118.
11. Beklaryan L.A., Akopov A.S., Beklaryan A.L., Saghatelian A.K. Agent-Based Simulation Modelling for Regional Ecological-Economic Systems: A case study of the Republic of Armenia. *Journal of Machine Learning and Data Analysis*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 104–115.
12. Бекларян А.Л., Акопов А.С. Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов // Бизнес-информатика. 2015. № 1. С. 69–77.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/modelirovanie-povedeniya-tolpy-na-osnove-intellektualnoy-dinamiki-vzaimodeystviyuschih-agentov>
13. Akopov A.S., Beklaryan A.L. Simulation of Human Crowd Behavior in Extreme Situations. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2012, vol. 79, no. 1, pp. 121–138.
14. Beklaryan A.L., Akopov A.S. Simulation of Agent-rescuer Behaviour in Emergency Based on Modified Fuzzy Clustering. In: AAMAS'16: Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems. Richland, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2016, pp. 1275–1276.
15. Akopov A.S., Hevencev M.A. A Multi-Agent Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Manchester, 13–16 October 2013, IEEE, pp. 1391–1395.
16. Johansson A., Helbing D., Al-Abideen H.Z., Al-Bosta S. From Crowd Dynamics to Crowd Safety: A Video-Based Analysis. *Advances in Complex Systems*, 2008, no. 4, pp. 497–527.
17. Загоруйко Н.Г., Ёлкина В.Н., Лбов Г.С. Алгоритмы обнаружения эмпирических закономерностей. Новосибирск: Наука, 1985. 999 с.

Информация о конфликте интересов

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

**SIMULATION MODELING OF THE SMART CITY SYSTEM:
THE CONCEPT, METHODS, AND CASES****Valerii L. MAKAROV^a, Al'bert R. BAKHTIZIN^b, Gayane L. BEKLARYAN^c, Andranik S. AKOPOV^{d,*}**^a Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences (CEMI RAS),
Moscow, Russian Federation
makarov@cemi.rssi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2802-2100>^b Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences (CEMI RAS),
Moscow, Russian Federation
albert.bakhtizin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9649-0168>^c Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences (CEMI RAS),
Moscow, Russian Federation
glbeklaryan@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1286-0345>^d Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences (CEMI RAS),
Moscow, Russian Federation
akopovas@umail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0627-3037>

* Corresponding author

Article history:Article No. 904/2018
Received 6 December 2018
Received in revised form
24 December 2018
Accepted 18 January 2019
Available online
28 February 2020**JEL classification:** C60, C63,
C65, C88**Keywords:** simulation
modeling, smart city, agent-
based modeling, system
dynamics**Abstract****Subject** The research investigates key processes of urban life and its maintenance, including food supply, infrastructure, fire security, quality and accessibility of medical services, etc. The article also discusses the creation of a system supporting the Smart City decision-making process.**Objectives** The research develops methods and tools to manage the Smart City system through system dynamics and agent-based modeling.**Methods** Using simulation modeling, namely system dynamics and agent-based modeling (supported via Powersim and AnyLogic), we evaluate how multiple guiding parameters influence crucial characteristics of the Smart City system.**Results** We devised an approach to designing the Smart City system through methods of system dynamics and agent-based modeling (supported via Powersim and AnyLogic) intended to streamline the decision making process for reasonable urban planning.**Conclusions and Relevance** We propose the consolidated architecture of the Smart City decision-making system integrating the simulation models, data storage and city monitoring subsystem. The article describes the cases of simulation models implemented via Powersim and AnyLogic to support rational urban planning. The simulation models will significantly improve the quality of urban environment, satisfy the demand for food products, provide access to healthcare services and ensure effective rescue actions in case of emergency.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2018

Please cite this article as: Makarov V.L., Bakhtizin R.A., Beklaryan G.L., Akopov A.S. Simulation Modeling of the Smart City System: The Concept, Methods, and Cases. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2020, vol. 19, iss. 2, pp. 226–250.
<https://doi.org/10.24891/ea.19.2.226>

Acknowledgments

The article was adapted from the *National Interests: Priorities and Security* journal, 2019, vol. 15, iss. 2. URL: <https://doi.org/10.24891/ni.15.2.200>

The project was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), grant № 18-29-03139-МК.

References

1. Akopov A.S., Beklaryan G.L. Modelling the Dynamics of the “Smarter Region”. In: Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computational Intelligence for Financial Engineering & Economics. IEEE, 2014, pp. 203–209. URL: <https://doi.org/10.1109/WSC.2014.7020185>
2. Komninos N. Intelligent Cities and Globalisation of Innovation Networks. Routledge, 2008, p. 308.
3. Akopov A.S. Designing of Integrated System-Dynamics Models for an Oil Company. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2012, vol. 45, no. 4, pp. 220–230. URL: <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2012.051122>
4. Meadows D.H. Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. New York, Universe Books, 1972.
5. Akopov A.S., Beklaryan L.A. [An Agent Model of Crowd Behavior in Emergencies]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 2015, no. 10, pp. 1817–1827. (In Russ.)
6. Bakhtizin A.R. *Agent-orientirovannye modeli ekonomiki* [Agent-based models of economics]. Moscow, Ekonomika Publ., 2008, 279 p.
7. Makarov V.L., Bakhtizin A.R. *Sotsial'noe modelirovanie – novyi komp'yuternyi proryv (agent-orientirovannye modeli)* [Social Modeling – New Computer Breakthrough (Agent-based models)]. Moscow, Ekonomika Publ., 2013, 295 p.
8. Forrester J. Industrial Dynamics – A Major Breakthrough for Decision Makers. *Harvard Business Review*, 1958, vol. 36, no. 4, pp. 37–66.
9. Forrester J. Urban Dynamics. Pegasus Communications. Waltham, MT, USA, 1969.
10. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelian A.K. Agent-Based Modelling for Ecological Economics: A case study of the Republic of Armenia. *Ecological Modelling*, 2017, vol. 346, pp. 99–118.
11. Beklaryan L.A., Akopov A.S., Beklaryan A.L., Saghatelian A.K. Agent-Based Simulation Modelling for Regional Ecological-Economic Systems. A case study of the Republic of Armenia. *Journal of Machine Learning and Data Analysis*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 104–115.
12. Beklaryan A.L., Akopov A.S. [Simulation of human crowd behavior based on intellectual dynamics of interacting agents]. *Biznes-informatika = Business Informatics*, 2015, no. 1, pp. 69–77. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/modelirovanie-povedeniya-tolpy-na-osnove-intellektualnoy-dinamiki-vzaimodeystviy-uschi-agentov> (In Russ.)
13. Akopov A.S., Beklaryan A.L. Simulation of Human Crowd Behavior in Extreme Situations. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2012, vol. 79, no. 1, pp. 121–138.
14. Beklaryan A.L., Akopov A.S. Simulation of Agent-Rescuer Behaviour in Emergency Based on Modified Fuzzy Clustering. Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous

Agents & Multiagent Systems (AAMAS'16). Richland, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2016, pp. 1275–1276.

15. Akopov A.S., Heventsev M.A. A Multi-Agent Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Manchester, 13–16 October 2013, IEEE, pp. 1391–1395.
16. Johansson A., Helbing D., Al-Abideen H.Z., Al-Bosta S. From Crowd Dynamics to Crowd Safety: A Video-Based Analysis. *Advances in Complex Systems*, 2008, no. 4, pp. 497–527.
17. Zagoruiko N.G., Elkina V.N., Lbov G.S. *Algoritmy obnaruzheniya empiricheskikh zakonomernostei* [Algorithms for detecting empirical patterns]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985, 999 p.

Conflict-of-interest notification

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.