

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

DOI: 10.15838/esc.2016.5.47.8

УДК 330.4, ББК 65.050.03

© Гулин К.А., Россошанский А.И.

Российский и зарубежный опыт интеграции агент-ориентированных моделей и геоинформационных систем*



**Константин Анатольевич
ГУЛИН**

Институт социально-экономического развития территорий РАН
160014, Россия, г. Вологда, ул. Горького 56а
gil@vscc.ac.ru



**Александр Игоревич
РОССОШАНСКИЙ**

Институт социально-экономического развития территорий РАН
160014, Россия, г. Вологда, ул. Горького 56а
alexanderrossy@mail.ru

Аннотация. В статье представлен обзор разработанных российскими и зарубежными исследователями механизмов интеграции агент-ориентированных моделей и геоинформационных технологий. Основные положения статьи базируются на критическом анализе отечественных и зарубежных литературных источников (монографии, научные статьи). Исследование основано на применении общенаучных методов познания: системного подхода; анализа и синтеза; класси-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-18-10296 «Разработка комплекса агент-ориентированных моделей, имитирующих социально-экономическую систему Евразийского континента и детализированных до уровня отдельных индивидуумов».

Для цитирования: Гулин, К.А. Российский и зарубежный опыт интеграции агент-ориентированных моделей и геоинформационных систем / К.А. Гулин, А.И. Россошанский // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2016. – № 5. – С. 141-157. DOI: 10.15838/esc/2016.5.47.8

For citation: Gulin K.A., Rossoshanskii A.I. Russian and foreign experience of integration of agent-based models and geographic information systems. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2016, no. 5, pp. 141-157. DOI: 10.15838/esc/2016.5.47.8

фикации, систематизации и группировки; методов обобщения, сравнения и типологизации. В статье изложены теоретико-методологические основы интеграции агент-ориентированных моделей и геоинформационных систем. Раскрыты понятие и сущность агент-ориентированных моделей, выделены их основные преимущества по сравнению с другими методами моделирования. Дана характеристика среды функционирования агентов как ключевого понятия в теории агент-ориентированного моделирования. Показано, что геоинформационные системы обладают разнообразными информационными ресурсами для расчетов, поиска, моделирования реального мира в различных аспектах, выступая эффективным инструментом отображения среды функционирования агентов, и позволяют максимально приблизить модель к реальным условиям. Авторами акцентируется внимание на широком спектре возможностей по проведению самого разнообразного круга исследований в различных пространственных и временных рамках. Приводится сравнительный анализ платформ, поддерживающих интеграцию агент-ориентированных моделей и геоинформационных систем. Рассмотрены примеры сложных социально-экономических моделей: модель креативного города, модель оказания гуманитарной помощи. В условиях отсутствия сложившихся стандартов описания результатов исследования авторы сосредоточили внимание на таких элементах моделей, как характеристика агентов и среды их функционирования, поведение и правила взаимодействия агентов между собой и внешней средой. Отражены возможности и перспективы использования данных моделей на практике.

Ключевые слова: геоинформационные системы, пространственное развитие, агент, агент-ориентированные модели.

В настоящее время агент-ориентированное моделирование становится достаточно популярным инструментом, применяемым как в научной сфере, так и при разработке сложных управленческих решений. Во многом это обусловлено возможностью учитывать активность элементов модели, наделяя их помимо набора индивидуальных характеристик целевыми установками, посредством чего имитируется их реакция на изменения среды, в которой они функционируют. Как отмечает доктор экономических наук *А.Р. Бахтизин*, основная идея, лежащая в основе агент-ориентированных моделей, заключается в построении «вычислительного инструмента» (представляющего собой совокупность агентов с определенным набором свойств), позволяющего проводить симуляции реальных явлений [1]. То есть агент-ориентированное моделирование используется для изучения сложных систем на макроуровне

посредством динамического взаимодействия его элементов на микроуровне (метод «снизу-вверх»).

Как отмечают *C. Castle* и *A. Crooks* [14, 23], среди преимуществ агент-ориентированных моделей по сравнению с традиционными методами моделирования (например, нисходящие нелинейные динамические системы, дискретно-событийное моделирование, клеточные автоматы и т.д.) можно выделить три основных аспекта: 1) фиксация возникающего явления; 2) обеспечение естественной среды для изучения некоторых систем; 3) гибкость, что особенно важно при взаимодействии с геоинформационными системами (ГИС).

Одним из основных направлений развития агент-ориентированных моделей (АОМ) выступает разработка АОМ на базе геоинформационных систем. Многими исследователями доказывается позиция

о том, что реальные пространственные данные должны не только рассматриваться внутри модели, но и стать элементами самой модели, а это предполагает как статичность и экзогенность пространственных элементов, так и их активное и взаимное участие. На первый взгляд интеграция АОМ и ГИС может показаться тривиальной задачей, однако она позволяет максимально приблизить функционирование агентов к реальным процессам и явлениям.

В статье ставилась цель систематизировать современный отечественный и зарубежный опыт интеграции агент-ориентированных моделей и геоинформационных систем. Для достижения поставленной цели отражены потенциальные и реальные области применения, дан обзор наиболее востребованных платформ по их интеграции, рассмотрены наиболее успешные агент-ориентированные модели на базе ГИС.

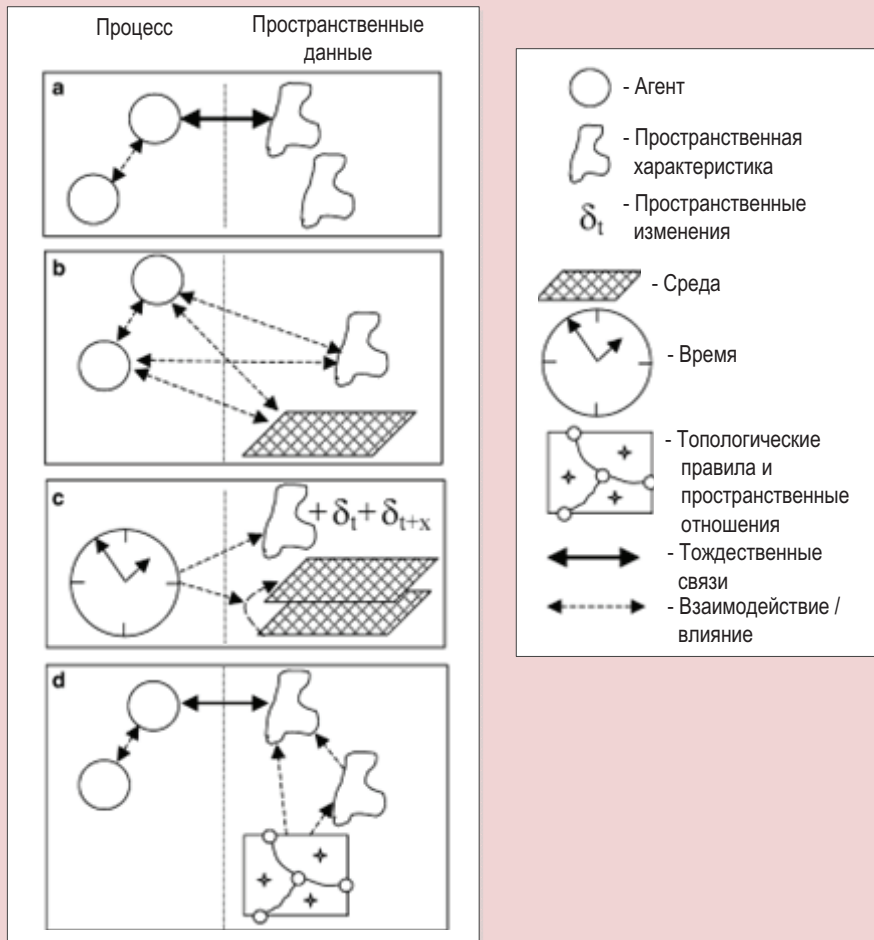
Наряду с «агентом» как центральным термином и основной действующей единицей в теории и практике агент-ориентированного моделирования, важнейшим элементом АОМ выступает среда их функционирования. То есть взаимодействие агентов не осуществляется как бы в «вакууме» (где присутствуют только связи типа «агент-агент»), а происходит в заданном пространстве, которое также оказывает прямое или косвенное воздействие на принятие решений агента («агент-агент» и «агент-среда»). На *рисунке 1* представлена концептуальная иллюстрация ключевых видов отношений между агентами и средой. Такое взаимодействие агентов в пространстве называется «пространственно явным», даже если при этом сам агент является статичным. В то же время агент-

ориентированные модели не исключают возможности взаимодействия агентов без учёта пространственного расположения, то есть агенты «пространственно неявные» [11]. Сама среда, в которой находятся агенты, может быть представлена в виде физического или социального пространства заданной формы и размера, характеризуется возможными состояниями, сферами влияния, определенными правилами динамического измерения и многим другим [8, с. 32].

Существенным подспорьем в стремлении агент-ориентированных моделей к максимальному отражению реальности выступает представление среды функционирования агентов в виде геоинформационных систем. Как отмечают академики *В.Л. Макаров* и *В.В. Окрепилов*, данная интеграция «абсолютно естественна» и существенно приближает агент-ориентированные модели к близкой к действительности окружающей среде [3, с. 713].

Термин «геоинформационные системы» введен в научный оборот в 60-е годы XX века *Р.Ф. Томлинсоном* при создании электронной пространственной информационной системы в Канаде [6]. Это понятие соответствовало новой технологии применения ЭВМ для хранения и обработки данных, связанных в первую очередь с управлением природными ресурсами (например, картографирование старовозрастных лесов, система охраняемых природных технологий в США и т.п.). В связи с этим первоначально использовавшиеся для анализа и визуализации пространственных данных ГИС сложно было бы представить в роли инструмента динамического имитационного моделирования и тем более как самостоятельную платформу для агент-ориентированного моделирования [5].

Рисунок 1. Варианты взаимодействия среды и агентов:
 а) тождественные отношения, б) причинно-следственные связи,
 с) временные отношения, д) топологические отношения.



Источник: Spatial process and data models: Toward integration of agent-based models and GIS / D.G. Brown, R. Riolo, D.T. Robinson, M. North, W. Rand // Journal of Geographical Systems. – 2005. – Vol. 7. – Pp. 25-47 (перевод авторов).

Следует отметить, что термин «геоинформационные системы» может рассматриваться с двух позиций [2, 6]. Во-первых, ГИС – это программно-аппаратный комплекс, способный хранить и использовать данные, описывающие объекты в пространстве. Во-вторых, ГИС представляет собой информационно-справочную систему.

В настоящее время геоинформационные системы обладают разнородными ин-

формационными ресурсами, логически объединёнными картографической основой и используемыми для расчетов, поиска, моделирования реального мира в различных аспектах. Наиболее распространенными программными продуктами для разработки и управления ГИС выступают: семейство программных продуктов американской компании ESRI (например, ArcGIS Online, ArcGIS for Desktop, ArcGIS for Server, ArcGIS Apps и другие); семейство

программных продуктов Mapinfo GIS; ГеоГраф ГИС, разработанная Центром геоинформационных исследований Института географии РАН; Geomedia, разработанная Intergraph Corporation и т.д.

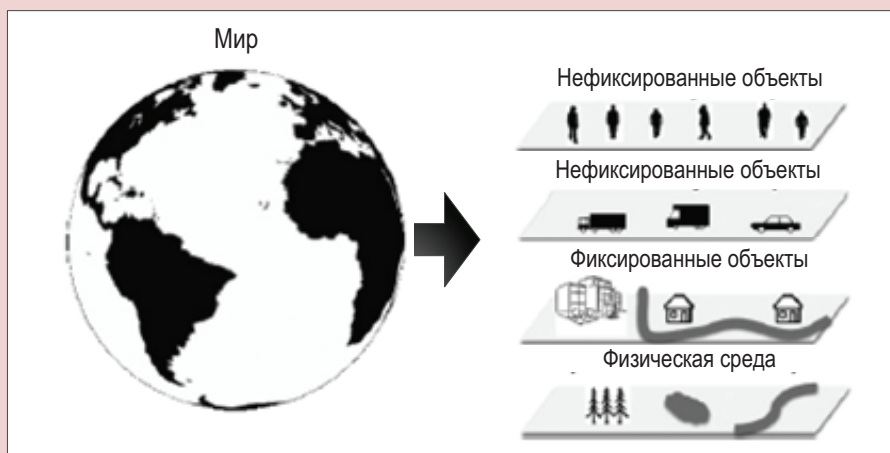
Современные ГИС способны решать широкий спектр разнообразных задач, таких как отслеживание передвижения транспортных средств, поиск оптимального пути с учётом транспортных особенностей, прогнозирование экологической ситуации и т.д. Учитывая возрастание функциональных возможностей программного обеспечения, к стандартным функциям любой геоинформационной системы можно отнести: импорт и экспорт данных; хранение данных и управление ими; визуализация данных; обработка и анализ; моделирование.

С точки зрения исследователя интеграция АОМ и ГИС обеспечивает возможность рассматривать деятельность агентов в реальных географических координатах (в пределах отдельно взятого района, муниципалитета, региона, страны и т.п.).

Это в свою очередь позволяет отслеживать возникновение явлений или процессов в ходе индивидуальных взаимодействий агентов в ГИС во времени и в пространстве, что даёт возможность разрабатывать различные механизмы принятия решений, будь то обоснование размещения нового торгового центра или регулирования миграционных процессов [3, 13].

В качестве примера наиболее информативного отображения интеграции АОМ и ГИС-технологий А. Crooks предлагает модель мира [13] (рис. 2), которая представлена в виде набора слоёв и объектов различных типов (например, транспорт или люди – в качестве движимых объектов и здания или сооружения – недвижимых). Сами слои образуют искусственный мир для используемых агентов и могут представлять собой строго очерченное пространство, например дороги, при помощи которых агенты могут добираться из пункта А в пункт Б, спальные районы или место работы.

Рисунок 2. Отображение мира в качестве набора слоёв динамических и статических объектов

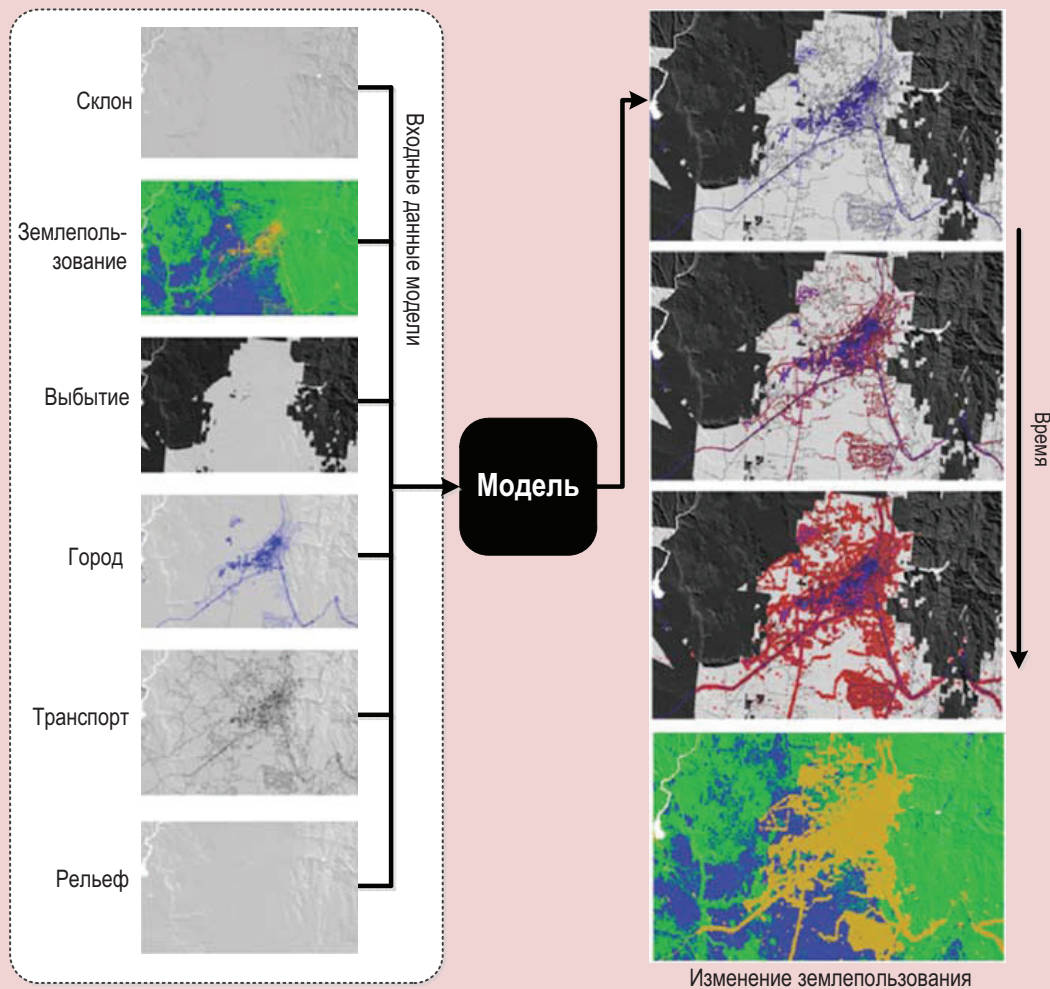


Источник: Brunsdon C., Singleton A.D. Geocomputation: A practical Primer. – London: SAGE Publications Inc., 2015. – Рр. 63-77 (перевод авторов).

Следующий пример (рис. 3) иллюстрирует модифицированную модель SLEUTH¹, которая прогнозирует изменение масштаба роста уровня урбанизации городов. В данном случае модель запускается с определенными сценариями роста уровня урбанизации городов, рассчитанными согласно заданным коэффициентам роста. Пространственные данные позволяют производить корректировку модели,

а именно ответить на вопрос: соответствуют ли действительности разработанные сценарии роста? То есть применяемые в модели коэффициенты роста могут быть откалиброваны таким образом, чтобы данные, рассчитанные на множестве агентов, совпадали с реальными данными [7]. Впоследствии соответствие модели реальной действительности позволит говорить о достоверности прогнозов.

Рисунок 3. Динамика землепользования в Санта-Фе, Нью-Мексико



Источник: Brunsdon C., Singleton A.D. Geocomputation: A practical Primer. – London: SAGE Publications Inc., 2015. – Pp. 63-77 (перевод авторов).

¹ Самомодифицирующаяся модель (клеточный автомат) исторической урбанизации в районе залива Сан-Франциско.

Подробнее см.: Clarke K.C., Hoppen S., Gaydos L.J. A Self-Modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area // Environment and Planning B. – 1997. – 24(2). – Pp. 247-261.

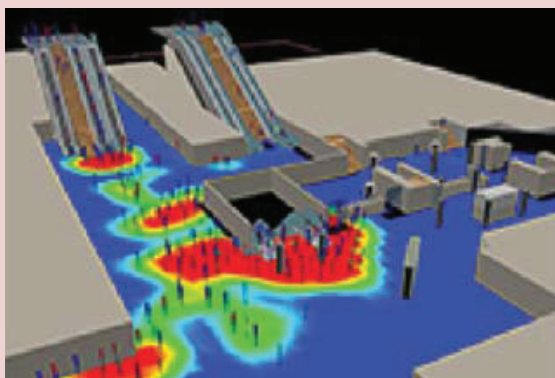
Потенциальные и реальные области применения АОМ на базе ГИС

Агент-ориентированные модели предоставляют широкий спектр возможностей по осуществлению самого разнообразного круга исследований в различных пространственных и временных рамках. Рассматриваемый перечень вопросов охватывает временные диапазоны от сиюминутных решений в процессе передвижения пешеходов [16] до миграционных процессов [22], длящихся годы или даже десятилетия. Агент-ориентированные модели совместно с ГИС-технологиями успешно применяются в различных областях науки, начиная от естественных и технических и заканчивая общественными и гуманитарными. АОМ представляют собой искусственные лаборатории, своего рода искусственные общества, позволяющие осуществлять проверку идей и гипотез о явлениях, которые зачастую весьма непросто воссоздать в реальном мире². Наглядным примером может случить моделирование эвакуации людей

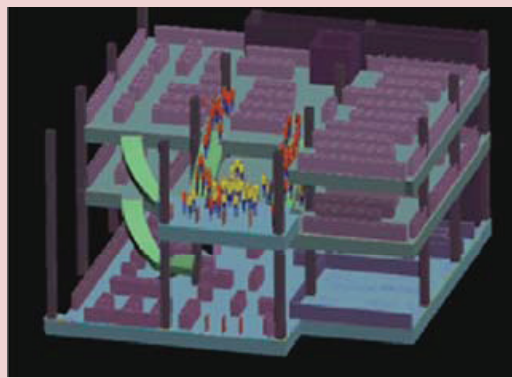
из здания при возникновении пожара. Воссоздание непредвиденной ситуации в искусственно заданном мире (в данном случае это здание, охваченное пожаром), населенном искусственными людьми (ими могут выступать люди, проживающие или работающие в здании), позволяет выявить потенциальные проблемы, например влияние плотности потока людей на лестницах и в коридорах на динамику выхода с этажа здания. Точность полученных моделей обеспечивается за счёт использования подтвержденных статистикой натуральных наблюдений и ранее проведенных экспериментов.

На *рисунке 4* схематически изображена имитационно-стохастическая модель «Эва-тек», которая демонстрирует движение потоков, состоящих из людей различной степени мобильности. Среда функционирования заданных агентов представлена в виде двух слоёв, которые отчётливо демонстрируют скопления агентов вблизи лестниц и узких коридоров.

Рисунок 4. Поэтажные планы здания:
а – места начального размещения людей; б – движение людей к выходам



а



б

Источник: Эвакуация и поведение людей при пожарах : учеб. пособие / В.В. Холщевников, Д.А. Самошин, А.П. Парфененко, И.С. Кудрин, Р.Н. Истратов, И.Р. Белосохов. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. – 262 с.

² Во многих случаях проведение экспериментов с реальными объектами может быть неоправданно дорогим, опасным или просто невозможным.

Следует отметить, что данный пример весьма показателен в плане важности визуализации пространства, в котором задействованы агенты, и ни в коем случае не ограничивает область применения лишь вопросами безопасности. Агент-ориентированное моделирование в сочетании с геоинформационными системами позволяет решать широкий спектр задач, таких как: анализ и предотвращение заторов на дорогах в часы пик в центре города, планирование потенциального распространения болезней, оптимизация лесозаготовки, анализ уровня преступности для предотвращения будущих правонарушений.

Техническое обеспечение интеграции АОМ и ГИС

В настоящее время выделяется два способа интеграции АОМ и ГИС [5]. Первый способ заключается в создании слабых (неполных) или сильных связей между АОМ и ГИС, причем сами программные продукты работают по отдельности. Второй способ предполагает создание единой системы на базе АОМ или ГИС.

Учитывая тот факт, что «агент-ориентированное моделирование не требует использования специализируемых программ, что в принципе позволяет применять средства разработки широкого профиля» [1],

Таблица 1. Современные платформы, поддерживающие интеграцию АОМ и ГИС

Название (разработчик)	Год запуска продукта	Язык программирования	Открытый код	Требуемый уровень программирования	Механизм интеграции	Соответствие FIPA	Производительность
AGLOBE (Czech Technical University)	2003 г.	Java	Да	Базовый	АОМ-центричная	Частичное	Высокая
AnyLogic (The AnyLogic Company)	2003 г.	Java, UML-RT (UML for real time)	Нет	Базовый	АОМ-центричная	Отсутствует	Высокая
GAMA (IRD/UPMC International Research Unit UMMISCO)	2007 г.	GAML	Да	Базовый	АОМ-центричная	Частичное	Выше среднего
Repast (University of Chicago)	2003 г.	Java, C#, C++, Lisp, Prolog, Python	Да	Базовый	АОМ-центричная	Отсутствует	Высокая
MASON (George Mason University)	2003 г.	Java	Да	Базовый	АОМ-центричная	Отсутствует	Выше среднего
NetLogo (The Center for Connected Learning (CCL) and Computer-Based Modeling, Northwestern University)	1999 г.	NetLogo	Нет	Базовый	АОМ-центричная	Отсутствует	Выше среднего
Swarm (Santa Fe Institute / SWARM Development Group, USA)	1994 г.	Objective-C / Java	Да	Базовый	АОМ-центричная	Отсутствует	Средняя
ENVISION (Oregon State Univeristy)	1998 г.	C++, Delphi, Visual Basic и др. поддерживающие COM технологии	Да	Продвинутый	ГИС-центричная	Отсутствует	Средняя
ArcGIS (ESRI)	1999 г.	C++, Python	Да	Продвинутый	ГИС-центричная	Отсутствует	Средняя

Источники: составлено авторами по Kravari K., Bassiliades N. A Survey of Agent Platforms // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2015. – No. 18 (1) 11. – URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/1/11.html>.

подробнее рассмотрим современные платформы, поддерживающие создание единой системы: АОМ-центричные и ГИС-центричные системы.

В статье «*A Survey of Agent Platforms*» [25] К. Kravari и N. Bassiliades провели сравнительный анализ двадцати четырех наиболее перспективных платформ для агент-ориентированного моделирования. Отметим, что 7 из них (*AGLOBE, AnyLogic, GAMA, Repast, MASON, NetLogo и Swarm*) поддерживают использование ГИС-технологий, то есть представляют собой АОМ-центричные модели. Для сопоставимости рассмотрим ещё два варианта уже геоинформационных систем (*ENVISION и ArcGIS*), позволяющих строить агентные модели. Основные характеристики вышеуказанных платформ приведены в *таблице 1*.

Классификация платформ с точки зрения языка программирования выступает крайне удобной с позиции исследователя, решившего моделировать те или иные процессы. Как можно видеть из таблицы, большая часть рассматриваемых платформ написана на языках программирования C, C++ и Java, что справедливо и в целом для АОМ.

FIPA (The Foundation for Intelligent Physical Agents) представляет собой международную организацию по стандартизации интероперабельности гетерогенных агентов в АОМ. Соответствие требованиям FIPA обеспечивает некоторое преимущество при продвижении программных продуктов за счет гарантии соблюдения архитектуры агентов и работы системы. Однако данное условие не обязательно: например, *AGLOBE* поддерживает только технические стандарты, связанные с коммуникационными принципами.

Применение агент-ориентированных моделей на базе ГИС в исследованиях социально-экономических процессов

Модель креативного города. В работе группы исследователей Университета Джорджа Мейсона (*A. Malic, A. Crooks, H. Root, M. Swartz*) [19] используется агент-ориентированный подход при изучении влияния творческого потенциала на развитие городов. В основе разрабатываемой модели лежит предположение о том, что ведущие города мира привлекают наиболее талантливых людей, предлагая им не только лучшие профессиональные возможности, но и высокий уровень развития культурно-досуговой сферы (например, театры, художественные галереи, выставки, концерты и т.п.) и государственных услуг (например, здравоохранение, образование и т.п.) [20]. Посредством реализации модели авторы пытаются ответить на ряд вопросов: каковы основные факторы, препятствующие появлению творческих кластеров в городах развивающихся стран мира? Какие пространственные и социально-экономические условия способствуют их появлению? Авторы делают акцент на следующих факторах, способствующих формированию креативного города: плотность населения, городская и региональная мобильность, социальная терпимость.

Модель предназначена в качестве инструмента для понимания взаимосвязи между творчеством человека и развитием города. Агенты в модели представляют людей, являются «пространственно явными» и обладают следующим набором характеристик:

1. Креативность: низкая, средняя, высокая.
2. Уровень образования: образованный и необразованный.
3. Уровень дохода: 1000 – 35000 ед.
4. Терпимость: 1 – 99%.

Ввиду повышенного внимания к мегаполисам развивающихся стран мира, в качестве среды функционирования агентов выбран город Карачи. Районирование среды производилось в соответствии с действующим местным законодательством: жилая зона (60%), коммерческая зона (10%), зелёная зона (10%), водное пространство (10%), инфраструктура (10%).

Визуальное представление среды осуществлялось при помощи Google Earth. Информационной базой для модели послужили данные социологического опроса молодежи г. Карачи [27], отражающие следующие характеристики: уровень образования, утечка умов, уровень творчества, распределение доходов, уровень терпимости. Количество агентов в модели – 2100, что составляет 0,01% населения города. Модель разработана на базе платформы NetLogo.

Поведение агентов в модели:

1. Мобильность агентов. Движение агентов в модели продиктовано их желанием повысить уровень общей удовлетворенности, которое зависит от стоимости арендной платы и контроля за социальной сегрегацией.

2. Распространение креативности. Развитие многофункционального проектирования (т.е. комбинирования жилого, коммерческого и других видов землепользования), транспортной доступности, пешеходной инфраструктуры, территорий общего пользования создаёт условия для привлечения талантливых, творческих людей.

3. Доход и рынок аренды жилья. Повышение уровня креативности агентов (например, за счёт взаимодействия с агентами более высокого уровня креативности) приводит к увеличению уровня доходов. Агенты в модели могут также терять уровень креативности при отсутствии взаимодействия с другими агентами. Повышение

творческого потенциала агентов приводит и к более высоким требованиям к жилищным условиям и качеству городской среды, что, в свою очередь, увеличивает стоимость арендных платежей. Как следствие, менее обеспеченные агенты теряют доступность к высокопродуктивным творческим кластерам, что приводит к увеличению неравенства в доходах.

4. Прирост населения и утечка умов. Определяемые пользователем темпы прироста агентов в модели оказывают воздействие на всех агентов независимо от уровня творческого потенциала. Однако утечка умов влияет лишь на низкокреативных агентов.

В конечном итоге взаимодействие агентов приводит к появлению творческих кластеров, что оказывает положительное воздействие на экономическое развитие мегаполисов (рис. 5). Однако кластеризация порождает проблему социально-экономического неравенства.

Модель оказания гуманитарной помощи.

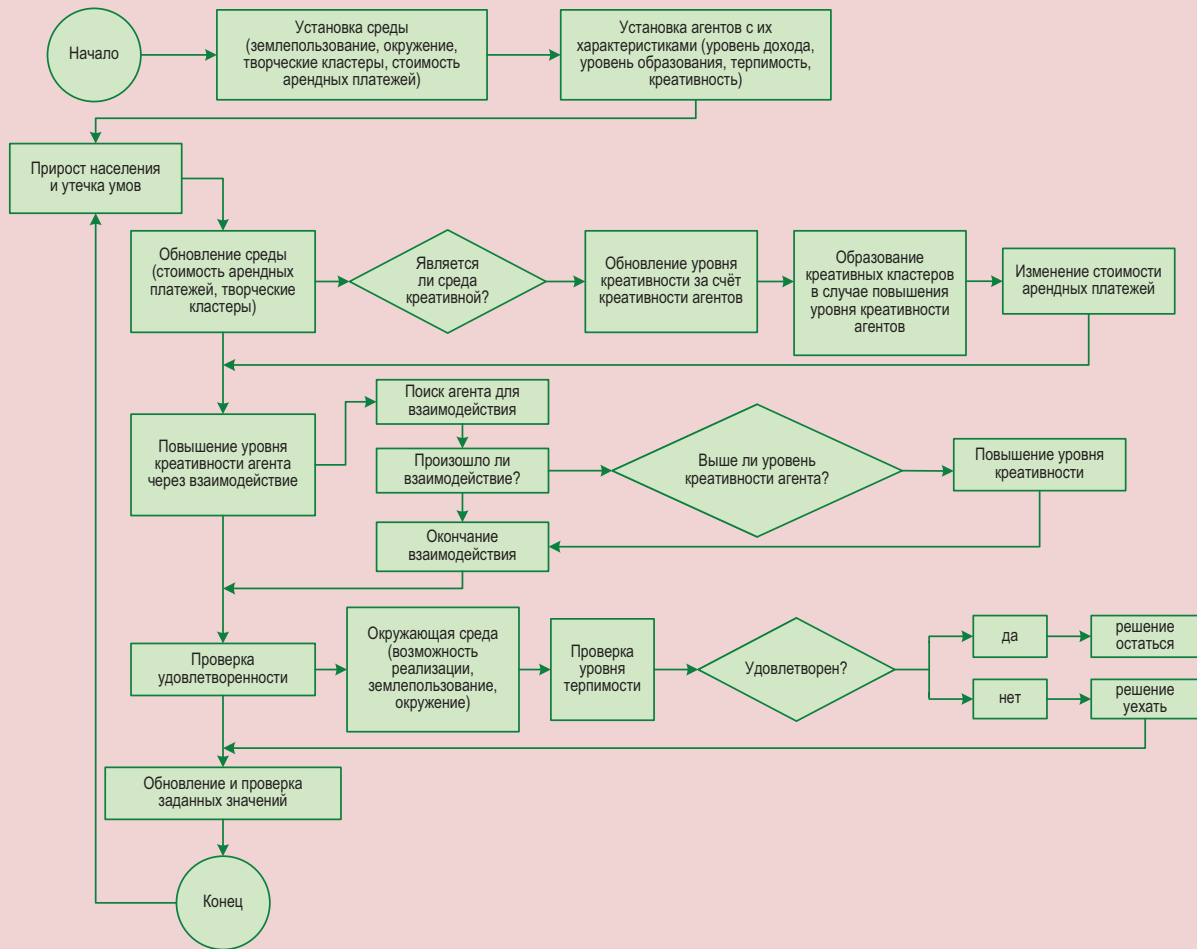
Агент-ориентированному моделированию с использованием геоинформационных систем, изучения последствий катастрофических событий посвящена работа *A. Crooks и S. Wise* [18]. Авторами представлена пилотная модель, имитирующая поведение агентов в городе Порт-о-Пренс после землетрясения в январе 2010 года. Модель состоит из нескольких модулей, которые охватывают физические и социальные процессы, происходящие в процессе оказания гуманитарной помощи.

В модели присутствуют два типа агентов:

- 1) центры оказания гуманитарной помощи (центры);
- 2) пострадавшие.

Центры одновременно выступают и как недвижимые объекты, расположенные в среде, и как агенты, наделенные определенным количеством ресурсов, которые

Рисунок 5. Концептуальная модель креативного города



Источник: Exploring Creativity and Urban Development with Agent-Based Modeling / A. Malic, A. Crooks, H. Root, M. Swartz // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2015. – 18 (2). – URL : <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/2/12.html> (перевод авторов).

они распределяют между пострадавшими. За каждым центром закреплена сеть охвата пострадавших, а также количество единиц гуманитарной помощи, оказываемой на одного пострадавшего. Цель центров заключается в предоставлении материальных ресурсов пострадавшим, то есть в удовлетворении их основной потребности — в выживании.

Пострадавшие обладают определенным энергетическим уровнем и знаниями об

окружающей среде, такими как расположение собственного дома и возможное размещение центра оказания гуманитарной помощи. Ключевым атрибутом пострадавших является энергетический уровень, который характеризует их здоровье. Достижение нулевого значения означает смерть агента и удаление из модели. Первоначальный энергетический уровень агентов задётся с учётом близости их проживания от районов бедствия.

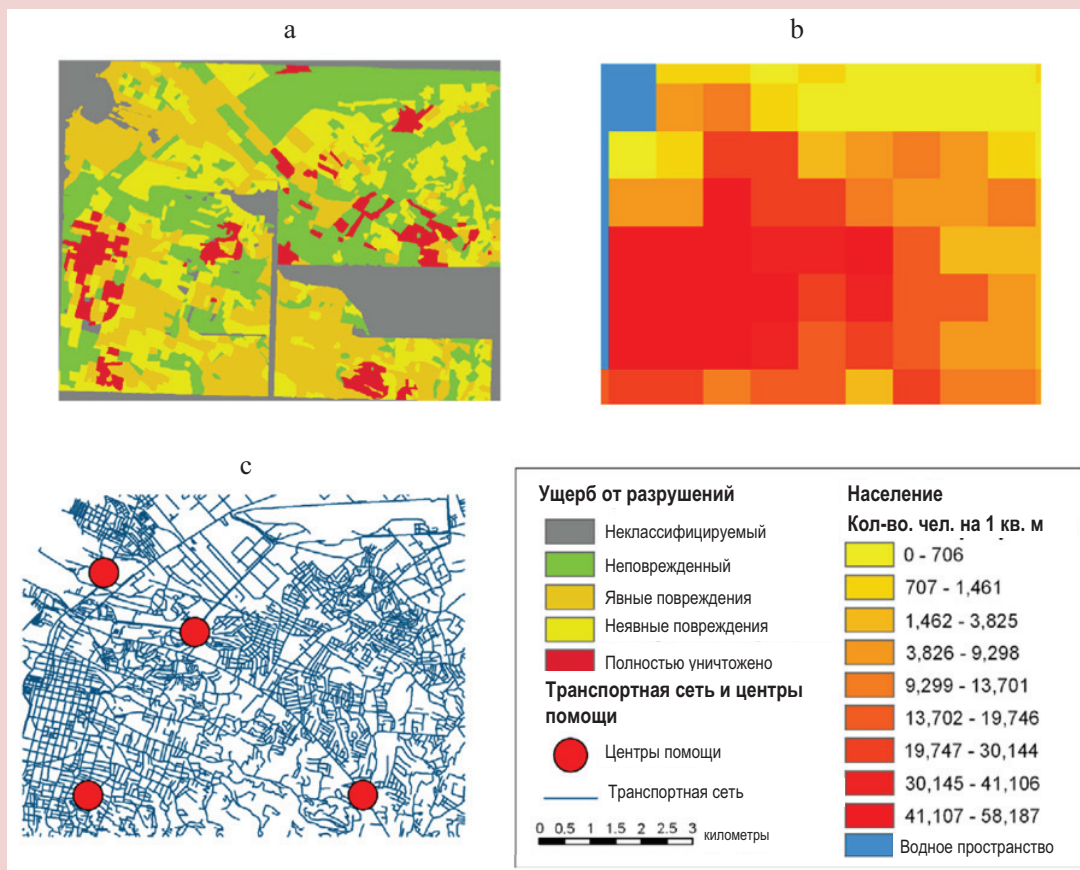
Пострадавшие принимают решения в соответствии со своей целью — максимизировать энергетический уровень. Они выбирают одно из нескольких действий: например, добраться до центра помощи или остаться дома. Взаимодействие агентов между собой предполагает отсутствие случаев сообщения заведомо ложных сведений о расположении центров помощи, а также случаев умышленного умалчивания информации.

На рисунке 6 в детализированном виде представлена среда функционирования агентов. В качестве входных данных ис-

пользуется информация об уровне разрушений (рис. 6a), о плотности населения (рис. 6b), существующих транспортных сетях и расположении центров оказания гуманитарной помощи (рис. 6c), а также о ряде вспомогательных параметров.

Авторами особо подчеркивается, что регионы, пострадавшие от стихийных бедствий, испытывают недостаток информационных ресурсов, необходимых для адекватного и своевременного реагирования. Информационная база модели сформирована посредством краудсорсинга и VGI данных (так называемая добровольная

Рисунок 6. Фрагмент ГИС г. Порт-о-Пренс



а) ущерб от разрушений; б) население; в) транспортная сеть и расположение центров гуманитарной помощи.

Источник: Crooks A., Wise S. GIS and agent-based models for humanitarian assistance // Computers, Environment and Urban Systems. – 2013. – № 41. – С. 100-111 (перевод авторов).

географическая информация [21]). В частности, информация о плотности населения получена из моделей распределения населения LandScan; данные об уровне повреждения взяты из G-Mosaic; для отображения транспортных сетей использовался OpenStreetMap.

Итогом модели выступает ряд статистических данных: число смертей агентов, количество единиц гуманитарной помощи, не дошедшей до пострадавших, суммарное количество затраченной энергии агентов, оставшихся в живых. Модель демонстрирует потенциал использования краудсорсинга и данных VGI в качестве источников формирования реалистичной среды функционирования агентов для имитации поведения индивидов в случае возникновения критических ситуаций. По замыслу авторов разработанная модель может быть использована в качестве инструмента поддержки при принятии решений об оказании гуманитарной помощи.

Обобщая возможности агент-ориентированного моделирования на базе геоинформационных систем, отметим, что дан-

ный инструмент позволяет создавать не только максимально приближенных к действительности агентов, но и встраивать их в существующие физические и социальные пространства в реальном времени. Это, в свою очередь, говорит о перспективности использования агентного моделирования, в том числе и в выработке эффективных и своевременных управленческих решений. Однако, как отмечают ведущие российские (В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин) и зарубежные (A. Herpenstall, A. Crooks, M. Batty, etc.) учёные, ключевой проблемой на данный момент выступает скорость работы агент-ориентированных моделей на базе ГИС, то есть возможность запускать сложные модели с тысячами пространственно осведомленных агентов. В настоящий момент решение видится, во-первых, в ограничении информативности ГИС до необходимого количества характеристик пространства, к которым обращаются агенты в процессе функционирования; во-вторых, в увеличении производительности современных процессоров.

Литература

1. Бахтизин, А.Р. Агент-ориентированные модели экономики [Текст] / А.Р. Бахтизин. – М. : Экономика, 2008. – 279 с.
2. Введение в геоинформационные системы [Электронный ресурс] // Географические информационные системы и дистанционное зондирование. – Режим доступа : <http://gis-lab.info>
3. Макаров, В.Л. Принципы мониторинга качества жизни на основе агент-ориентированных моделей [Текст] / В.Л. Макаров, В.В. Окрепилов // Вестник Российской академии наук. – 2016. – № 8. – С. 711-718.
4. Макаров, В.Л. Современные методы прогнозирования последствий управленческих решений [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин // Управленческое консультирование. – 2015. – № 7. – С. 12-24.
5. Макаров, В.Л. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели) [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин. – М. : Экономика, 2013. – 295 с.
6. Середович, В.А. Геоинформационные системы (назначение, функции, классификация) [Текст] : монография / В.А. Середович, В.Н. Ключниченко, Н.В. Тимофеева. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 192 с.
7. Сушко, Е.Д. Мультиагентная модель региона: концепция, конструкция и реализация [Текст] / Е.Д. Сушко : препринт # WP/2012/292. – М.: ЦЭМИ РАН, 2012. – 54 с.
8. Фаттахов, М.Р. Агент-ориентированная модель социально-экономического развития Москвы [Текст] / М.Р. Фаттахов // Экономика и математические методы. – 2013. – № 2. – С. 30-43.

9. Чекмарева, Е.А. Обзор российского и зарубежного опыта агент-ориентированного моделирования сложных социально-экономических систем мезоуровня / Е.А. Чекмарева // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2016. – № 2. – С. 225-246.
10. Эвакуация и поведение людей при пожарах [Текст] : учеб. пособие / В. В. Холщевников, Д.А. Самошин, А.П. Парфененко, И.С. Кудрин, Р.Н. Истратов, И.Р. Белосохов. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. – 262 с.
11. Agent-based Models of Geographical Systems [Text] / A. Heppenstall, A. T. Crooks, L.M. See, M. Batty (eds.). – New York : Springer, 2012. – 746 p.
12. Benenson, I. Geosimulation. Automata-based modeling of urban phenomena [Text] / I. Benenson, P. Torrens. – Chichester : Wiley, 2004. – 312 p.
13. Brunsdon, C. Geocomputation: A practical Primer [Text] / C. Brunsdon, A.D. Singleton. – London. – SAGE Publications Inc, 2015. – Pp. 63-77.
14. Castle, C.J.E. Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations [Text] / C.J.E. Castle, A.T. Crooks. – Centre for Advanced Spatial Analysis (University College London) : Working Paper 110, 2006. – 62 p.
15. Clarke, K.C. A Self-Modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area [Text] / K.C. Clarke, S. Hoppen, L.J. Gaydos // Environment and Planning B. – 1997. – 24(2). – Pp. 247-261.
16. Crooks, A. Walk This Way: Improving Pedestrian Agent-Based Models through Scene Activity Analysis [Text] / A. Crooks, A. Croitoru, X. Lu, S. Wise, J.M. Irvine, A. Stefanidis // International Journal of Geo-Information. – 2015. – 4(3). – Pp. 1627-1656.
17. Crooks, A.T. Constructing and Implementing an Agent-Based Model of Residential Segregation through Vector GIS [Text] / A.T. Crooks. – Centre for Advanced Spatial Analysis (University College London) : Working Paper 133. – 2008. – 42 p.
18. Crooks, A.T. GIS and Agent-Based models for Humanitarian Assistance [Text] / A.T. Crooks., S. Wise // Computers, Environment and Urban Systems, № 41. – 2013. – Pp. 100-111.
19. Exploring Creativity and Urban Development with Agent-Based Modeling [Text] / A. Malic, A. Crooks. H. Root, M. Swartz // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2015. – 18 (2). – URL : <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/2/12.html>
20. Florida, R. Cities and the Creative Class [Text] / R. Florida // City & Community. – 2003. – Vol. 2. – Pp. 3-19.
21. Goodchild, M.F. Citizens as sensors: the world of volunteered geography [Text] / M.F. Goodchild // GeoJournal. – 2007. – № 69. – Pp. 211-221.
22. Gulden, T. Modeling Cities and Displacement through an Agent- based Spatial Interaction Model [Text] / T. Gulden, J.F. Harrison, A.T. Crooks // The Computational Social Science Society of America Conference. – 2011. – URL: https://www.researchgate.net/publication/267800670_Modeling_Cities_and_Displacement_through_an_Agent_based_Spatial_Interaction_Model
23. Heppenstall, A. Agent-based modeling in geographical systems [Text] / A. Heppenstall, A.T. Crooks // AccessScience, McGraw-Hill Education, Columbus. – URL: <https://dl.dropboxusercontent.com/u/2696623/Website/AccessScienceABM.pdf>
24. Johnston, K.M. Agent-based modeling in ArcGIS [Text] / K.M. Johnston. – California : Esri Press, 2013. – 559 p.
25. Kravari, K. A Survey of Agent Platforms [Text] / K. Kravari, N. Bassiliades // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2015. – No. 18 (1) 11. – URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/1/11.html>
26. Landscape Epidemiology Modeling Using an Agent-Based Model and a Geographic Information System [Text] / S.M. Niaz Arifin, R. Reaz Arifin, Dilkushi de Alwis Pitts, M. Sohel Rahman, S. Nowreen, G.R. Madey, F.H. Collins // Land. – 2015. – No. 4. – Pp. 378-412.
27. Malic, A. Karachi Youth Survey: Attitudes, Ambitions and Entrepreneurial Potential of Karachi's Youth [Text] / A. Malic, M. Karim // USIP Conference, Washington, DC. – 2012.
28. Spatial process and data models: Toward integration of agent-based models and GIS [Text] / D.G. Brown, R. Riolo, D.T. Robinson, M. North, W. Rand // Journal of Geographical Systems. – 2005. – Vol. 7. – Pp. 25-47.
29. Synthetic Modelling of Pedestrian Movement / Renee Puusepp, Damiano Cerrone, Martin Melioranski // SPATIAL ANALYSIS | Urban Context. – Vol. 2. – eCAADe 34. – Pp. 473-481.

Сведения об авторах

Константин Анатольевич Гулин — доктор экономических наук, доцент, заместитель директора, заведующий отделом, Институт социально-экономического развития территорий РАН (160014, Россия, г. Вологда, ул. Горького 56а, gil@vscc.ac.ru)

Александр Игоревич Россосханский — младший научный сотрудник, Институт социально-экономического развития территорий РАН (160014, Россия, г. Вологда, ул. Горького 56а, alexanderrossy@mail.ru)

Gulin K.A., Rossoshanskii A.I.

Russian and Foreign Experience of Integration of Agent-Based Models and Geographic Information Systems

Abstract. The article provides an overview of the mechanisms of integration of agent-based models and GIS technology developed by Russian and foreign researchers. The basic framework of the article is based on critical analysis of domestic and foreign literature (monographs, scientific articles). The study is based on the application of universal scientific research methods: system approach, analysis and synthesis, classification, systematization and grouping, generalization and comparison. The article presents theoretical and methodological bases of integration of agent-based models and geographic information systems. The concept and essence of agent-based models are explained; their main advantages (compared to other modeling methods) are identified. The paper characterizes the operating environment of agents as a key concept in the theory of agent-based modeling. It is shown that geographic information systems have a wide range of information resources for calculations, searching, modeling of the real world in various aspects, acting as an effective tool for displaying the agents' operating environment and allowing to bring the model as close as possible to the real conditions. The authors also focus on a wide range of possibilities for various researches in different spatial and temporal contexts. Comparative analysis of platforms supporting the integration of agent-based models and geographic information systems has been carried out. The authors give examples of complex socio-economic models: the model of a creative city, humanitarian assistance model. In the absence of standards for research results description, the authors focus on the models' elements such as the characteristics of the agents and their operation environment, agents' behavior, rules of interaction between the agents and the external environment. The paper describes the possibilities and prospects of implementing these models.

Key words: geographic information system, spatial development, agent-based models.

References

1. Bakhtizin A.R. *Agent-orientirovannye modeli ekonomiki* [Agent-based economic models]. Moscow: Ekonomika, 2008. 279 p. (In Russian).
2. *Vvedenie v geoinformatsionnye sistemy. Geograficheskie informatsionnye sistemy i distantsionnoe zondirovanie* [Introduction to geographic information systems. Geographic information systems and remote sensing]. Available at: <http://gis-lab.info>. (In Russian).
3. Makarov V.L., Okrepilov V.V. Printsipy monitoringa kachestva zhizni na osnove agent-orientirovannykh modelei [Quality of life monitoring principles on the basis of agent-based models]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk* [Herald of the Russian Academy of Sciences], 2016, no. 8, pp. 711-718. (In Russian).
4. Makarov V.L., Bakhtizin A.R. Sovremennyye metody prognozirovaniya posledstviy upravlencheskikh reshenii [Modern methods for predicting the consequences of management decisions]. *Upravlencheskoe konsul'tirovanie* [Management consulting], 2015, no. 7, pp. 12-24. (In Russian).

5. Makarov V.L., Bakhtizin A.R. *Sotsial'noe modelirovanie – novyi komp'yuternyi proryv (agent-orientirovannyye modeli)* [Social modeling – a new computer breakthrough (agent-based models)]. Moscow: Ekonomika, 2013. 295 p. (In Russian).
6. Seredovich V.A., Klyushnichenko V.N., Timofeeva N.V. *Geoinformatsionnye sistemy (naznachenie, funktsii, klassifikatsiya): monografiya* [Geographic information systems (purpose, functions, classification): monograph]. Novosibirsk: SGGA, 2008. 192 p. (In Russian).
7. Sushko E.D. *Mul'tiagentnaya model' regiona: kontseptsiya, konstruktsiya i realizatsiya: preprint # WP/2012/292* [Multi-agent model of a region: concept, structure and implementation]. Moscow: TsEMI RAN, 2012. 54 p. (In Russian).
8. Fattakhov M.R. Agent-orientirovannaya model' sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Moskvy [Agent-based model of socio-economic development of Moscow]. *Ekonomika i matematicheskie metody* [Economics and the mathematical methods], 2013, no. 2, pp. 30-43. (In Russian).
9. Chekmareva E.A. Obzor rossiiskogo i zarubezhnogo opyta agent-orientirovannogo modelirovaniya slozhnykh sotsial'no-ekonomicheskikh sistem mezourovnya [Overview of the Russian and foreign experience of agent-based modeling of complex socio-economic systems of the meso-level]. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz* [Economic and social changes: facts, trends, forecast], 2016, no. 2, pp. 225-246. (In Russian).
10. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfenenko A.P., Kudrin I.S., Istratov R.N., Belosokhov I.R. *Evakuatsiya i povedenie lyudei pri pozharakh : ucheb. posobie* [Emergency evacuation and rules of conduct in case of fire: training manual]. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii, 2015. 262 p. (In Russian).
11. Heppenstall A., Crooks A.T., See L.M., Batty M. (Eds.). *Agent-based Models of Geographical Systems*. New York: Springer, 2012. 746 p.
12. Benenson I., Torrens P. *Geosimulation. Automata-based modeling of urban phenomena*. Chichester: Wiley, 2004. 312 p.
13. Brunsdon C., Singleton A.D. *Geocomputation: A practical Primer*. London: SAGE Publications Inc, 2015. Pp. 63-77.
14. Castle C.J.E., Crooks A.T. *Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations*. Centre for Advanced Spatial Analysis (University College London): Working Paper 110, 2006. 62 p.
15. Clarke K.C., Hoppen S., Gaydos L.J. A Self-Modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area. *Environment and Planning B*, 1997, no. 24(2), pp. 247-261.
16. Crooks A., Croitoru A., Lu X., Wise S., Irvine J.M., Stefanidis A. Walk This Way: Improving Pedestrian Agent-Based Models through Scene Activity Analysis. *International Journal of Geo-Information*, 2015, no. 4(3), pp. 1627–1656.
17. Crooks A.T. *Constructing and Implementing an Agent-Based Model of Residential Segregation through Vector GI*. Centre for Advanced Spatial Analysis (University College London): Working Paper 133, 2008. 42 p.
18. Crooks A.T., Wise S. GIS and Agent-Based models for Humanitarian Assistance. *Computers, Environment and Urban Systems*, no. 41, 2013, pp. 100-111.
19. Malic A., Crooks A., Root H., Swartz M. Exploring Creativity and Urban Development with Agent-Based Modeling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2015, no.18 (2). Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/2/12.html>
20. Florida R. Cities and the Creative Class. *City & Community*, 2003, volume 2, pp. 3-19.
21. Goodchild M.F. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 2007, no. 69, pp. 211-221.
22. Gulden T., Harrison J.F., Crooks A.T. Modeling Cities and Displacement through an Agent- based Spatial Interaction Model. *The Computational Social Science Society of America Conference*, 2011. Available at: https://www.researchgate.net/publication/267800670_Modeling_Cities_and_Displacement_through_an_Agent_based_Spatial_Interaction_Model
23. Heppenstall A., Crooks A.T. *Agent-based modeling in geographical systems*. Available at: <https://dl.dropboxusercontent.com/u/2696623/Website/AccessScienceABM.pdf>
24. Johnston K.M. *Agent-based modeling in ArcGIS*. California: Esri Press, 2013. 559 p.
25. Kravari K., Bassiliades N. A Survey of Agent Platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2015, no. 18 (1) 11. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/1/11.html>

26. Niaz Arifin S.M., Reaz Arifin R., Dilkushi de Alwis Pitts, Sohel Rahman M., Nowreen S., Madey G.R., Collins F.H. Landscape Epidemiology Modeling Using an Agent-Based Model and a Geographic Information System. *Land*, 2015, no. 4, pp. 378-412.
27. Malic A., M. Karim Karachi Youth Survey: Attitudes, Ambitions and Entrepreneurial Potential of Karachi's Youth. *USIP Conference, Washington, DC*, 2012.
28. Brown D.G., Riolo R., Robinson D.T., North M., Rand W. Spatial process and data models: Toward integration of agent-based models and GIS. *Journal of Geographical Systems*, 2005, volume 7, pp. 25-47.
29. Puusepp R., Cerrone D., Melioranski M. Synthetic Modelling of Pedestrian Movement. *SPATIAL ANALYSIS. Urban Context*, volume 2, pp. 473-481.

Information about the Authors

Konstantin Anatol'evich Gulin – Doctor of Economics, Associate Professor, Deputy Director, Department Head, Institute of Socio-Economic Development of Territories of Russian Academy of Science (56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation, gil@vscc.ac.ru)

Aleksandr Igorevich Rossoshanskii – Junior Researcher, Institute of Socio-Economic Development of Territories of Russian Academy of Science (56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation, alexanderrossy@mail.ru)

Статья поступила 09.09.2016