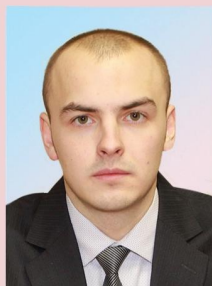


DOI: 10.15838/esc/2016.5.47.15

УДК 330.4, ББК 65.050.03

© Маковеев В.Н.

## Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий\*

**Виталий Николаевич****МАКОВЕЕВ**Институт социально-экономического развития территорий РАН  
160014, Россия, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а  
makoveevvn@mail.ru

**Аннотация.** Цель данной статьи состоит в изучении сущности агент-ориентированного моделирования, определении его специфики и перспектив использования при моделировании социально-экономического развития территорий, а также систематизации отечественных и зарубежных подходов к разработке прототипов агентных моделей территорий. Информационной базой исследования выступили труды отечественных и зарубежных ученых по агент-ориентированному моделированию, и прежде всего статьи и монографии учёных ЦЭМИ РАН, материалы международного журнала «Journal of Artificial Societies and Social Simulation» и другие источники, доступные в сети Интернет. В статье изложены теоретико-методологические основы построения агентных моделей территорий. Рассмотрены понятия «агент-ориентированное моделирование» и «агент». Определены особенности агент-ориентированных моделей в сравнении с другими видами имитационного моделирования. Описаны главные этапы построения агентных моделей территорий, а также квалификационные требования субъекта моделирования. Проведен обзор

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ 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:** Маковеев, В.Н. Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий / В.Н. Маковеев // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2016. – № 5. – С. 272-289. DOI: 10.15838/esc/2016.5.47.15

**For citation:** Makoveev V.N. Using agent-based models in the analysis and forecast of socio-economic development of territories. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2016, no. 5, pp. 272-289. DOI: 10.15838/esc/2016.5.47.15

отечественных и зарубежных подходов к разработке прототипов агент-ориентированных моделей территорий. Установлено, что большая их часть посвящена моделированию пространственного, территориального и социально-экономического развития регионов, городов и муниципальных образований. Агентами в такого рода моделях являются домашние хозяйства, жители регионов и городов, предприятия и организации, работающие на их территории, и органы государственной власти и управления (их включение в модель позволяет осуществлять апробацию различных вариантов управленческих воздействий на территории посредством изменения параметров модели, например введения определенных запретов и квот, выдачи разрешений, распределения финансовых ресурсов и т.п.). В заключение сформулированы основные выводы. Показаны сложности, с которыми сталкиваются разработчики агент-ориентированных моделей социально-экономического развития территорий и перспективы дальнейших исследований в этой области. Установлено, что агент-ориентированный подход к моделированию социально-экономического развития территорий очень перспективен, он позволяет повысить эффективность прогнозирования регионального развития и принимаемых управленческих решений за счет очень подробного и реалистичного воссоздания внутренней структуры региона в виде отдельных самостоятельных экономических субъектов, которые взаимодействуют друг с другом и внешней средой, а также возможности быстрой обработки и анализа больших массивов информации.

**Ключевые слова:** экономика, математическое моделирование, агент, агент-ориентированные модели, социально-экономическое развитие.

В постсоветский период рост отечественной экономики преимущественно достигался за счет наращивания экспорта сырьевых ресурсов, особенно углеводородов, и благоприятной ценовой конъюнктуры на энергоносители. По такой экспортно-сырьевой модели отечественная экономика развивалась на протяжении последних 25 лет. Однако финансовый кризис 2008–2009 гг. и события 2014 г. наглядно продемонстрировали уязвимость и нестабильность этого типа развития. Резкое снижение цен на нефть в 2014 г. привело к существенному сокращению средств бюджетов всех уровней и инвестиционной активности, что крайне негативно повлияло на динамику темпов экономического роста и благосостояние населения. Сложившуюся ситуацию усугубили введенные в отношении РФ ограничения на импорт новых технологий и высокотехнологичного оборудования со стороны некоторых зарубежных стран.

Подобная ситуация обуславливает необходимость более эффективного использования имеющихся ресурсов, прежде всего в регионах. В свою очередь, достижение этого невозможно без разработки систем моделирования и прогнозирования социально-экономического развития на региональном уровне.

В 2014 г. принят закон «О стратегическом планировании в Российской Федерации», который «устанавливает правовые основы стратегического планирования в Российской Федерации, координации государственного и муниципального стратегического управления и бюджетной политики, полномочия федеральных органов государственной власти, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления и порядок их взаимодействия с общественными, научными и иными организациями в сфере стратегического планирования» [18].



В настоящее время для прогнозирования социально-экономического развития территорий органы государственной власти и управления в основном применяют методы временного ряда (построение трендов), межотраслевого баланса, производственной функции и экспертных опросов. Разработано множество базирующихся на этих методах моделей социально-экономического развития территорий (Модель межотраслевых взаимодействий (ЦЭМИ РАН), Балансово-эконометрическая модель прогнозирования (ЦМАКП), Макроэкономическая межотраслевая модель RIM (ИНП РАН), Модель современной российской экономики (ВЦ РАН), Система анализа и прогнозирования социально-экономического развития региона (КГТУ), Модель «затраты-выпуск» В. Леонтьева (США), Межотраслевая модель американской экономики LIFT (США), Спросовая модель AIDADS (Китай), Модель стран зоны евро (ЕС) и др.) [9, 21, 22, 30, 37, 41]. Однако следует отметить, что многие из такого рода моделей не применимы на региональном уровне, поскольку технология их расчетов основана на данных экспертных опросов и ряде показателей, по которым крайне затруднительно получить информацию. Это создает необходимость разработки моделей социально-экономического развития, которые были бы применимы на региональном уровне и учитывали бы специфику конкретной территории и широкое разнообразие взаимосвязей между расположенными на ней экономическими агентами.

Особенно отметим то, что такие модели должны иметь возможность быстро и качественно анализировать очень большие объемы информации. Это обусловлено очень сильным ростом в последние годы общего объема информации в различных сферах

экономики. По оценкам аналитической компании IDC<sup>1</sup>, общий объем данных увеличится за 10 лет в 29 раз: с 1200 экзабайт в 2010 г. до 35000 экзабайт в 2020 г. По мнению аналитиков, наибольший рост информации будет наблюдаться в сети Интернет, финансовом секторе, здравоохранении, астрономии и биоинформатике. Потребность в обработке и анализе массивов данных такого объема обуславливает необходимость создания информационно-аналитических систем нового уровня, основанных на усовершенствованных вычислительных методах, методах распознавания образов, организации хранилищ, сбора статистической информации с целью извлечения смысла из данных и получения информационного контекста [1].

Поскольку человеческий мозг не может воспринимать более трех-четырёх взаимосвязанных параметров динамического процесса, создание подобных систем на региональном уровне позволит повысить эффективность принятия решений, в том числе и государственного управления на той или иной территории, а также более эффективно использовать имеющиеся в регионе ресурсы [16].

При построении подобных моделей и одним из ключевых звеньев новых информационно-аналитических систем может выступить агент-ориентированный подход к моделированию социально-экономического развития территорий, который является относительно новым в имитационном моделировании и в последнее время приобретает всё большую популярность. По мнению исследователей ЦЭМИ РАН, возникновение этого подхода можно рассматривать как результат длительной эволюции методологии моделирования: перехода от моно-моделей (одна модель описывается

<sup>1</sup> International Data Corporation.

одним алгоритмом) к мультимоделям (в одной модели содержится множество независимых алгоритмов) [13].

В соответствии с данным подходом экономическую систему можно представить как совокупность взаимодействующих подсистем-агентов. Моделируя поведение отдельных элементов системы, задавая параметры их взаимодействия, возможно исследовать закономерности поведения глобальной системы, анализировать её характеристики [7]. Другими словами, агент-ориентированный подход к моделированию представляет собой искусственное общество, которое состоит из взаимодействующих между собой самостоятельных агентов, что позволяет смоделировать систему, максимально приближенную к реальности [20].

При построении агентных моделей задача исследователя состоит не в описании поведения системы целиком (это применяется при разработке традиционных имитационных моделей с помощью линейных или дифференциальных уравнений, устанавливающих связи между элементами), а заключается в описании поведения только ее элементов, их самостоятельности. Поведение всей системы определяется ею самой в ходе эмуляционного эксперимента, а функциональные связи, возникающие в ходе взаимодействия элементов системы, остаются за скобками описательной части и, по сути, являются предметом исследования [8].

Таким образом, актуальность обращения к вопросам развития агент-ориентированного моделирования социально-экономических систем различных территорий прежде всего обусловлена существенным увеличением объемов информации, необходимостью ее обработки и анализа, повышением эффективности управленческих решений.

Цель представленной статьи состояла в изучении сущности агент-ориентированного моделирования, определения его специфики и перспектив использования при моделировании социально-экономического развития территорий, а также систематизации отечественных и зарубежных подходов к разработке прототипов агентных моделей территорий.

Информационной базой исследования выступили труды отечественных и зарубежных ученых по агент-ориентированному моделированию, и прежде всего статьи и монографии учёных ЦЭМИ РАН, материалы международного журнала «*Journal of Artificial Societies and Social Simulation*», а также другие источники, доступные в сети Интернет.

Сущность процесса моделирования по А.Г. Гранбергу сводится к циклическому и последовательному выполнению таких этапов, как: построение модели, изучение модели, перенос знаний с модели на оригинал, а также проверка и применение знаний [5].

Попробуем разобраться, какие модели относят к агент-ориентированным и в чем их отличие от других видов имитационного моделирования.

Отечественными и зарубежными исследователями сформулированы разные определения агент-ориентированных моделей.

Например, А.Р. Бахтизин и М.Р. Фаттахов определяют агент-ориентированные модели как специальный класс моделей, которые основаны на индивидуальном поведении агентов и созданы для компьютерных симуляций [2; 25].

В.Л. Макаров определяет агент-ориентированную модель через перечисление ее свойств, к которым он относит: автономию, ограниченную интеллектуальность агентов, расположение в пространстве и неоднородность. Главным отличием агент-



ных моделей от других видов имитационного моделирования автор называет «наличие в них большого числа взаимодействующих друг с другом агентов» [11].

Е.Д. Сушко определяет агент-ориентированную модель как «искусственное общество, состоящее из взаимодействующих между собой самостоятельных агентов, каждый из которых обладает заданным набором личностных характеристик («ресурсов»), целевой функцией («интересами») и подчиняется правилам поведения, определяющим его реакцию в различных ситуациях, затрагивающих сферу его интересов» [23].

По мнению Н. Гилберта, агент-ориентированное моделирование — это вычислительный метод, который позволяет исследователю создавать и проводить анализ модели, состоящей из агентов, взаимодействующих в среде, а также проводить эксперименты с помощью построенных моделей. Главной особенностью агент-ориентированных моделей Н. Гилберт называет возможность агентов взаимодействовать друг с другом и средой, передавать информационные сообщения и осуществлять действия на их основе. При этом информационные сообщения могут представлять как прямой «диалог» между агентами, так и косвенные средства получения информации (воздействие другого агента, наблюдение за другим агентом). Как считает Н. Гилберт, именно возможность моделирования взаимодействий агентов является главным отличием агент-ориентированного моделирования от других видов вычислительных моделей [36].

По мнению А.Р. Бахтизина, «конечная цель процесса по созданию агент-ориентированных моделей — отследить влияние флуктуаций агентов, действующих на микроуровне, на показатели макроуровня» [2].

Одним из главных терминов в агент-ориентированном моделировании является понятие «агент». М.Р. Фаттахов полагает, что точного определения этого термина в агентном моделировании на данный момент не выработано. С его позиции «агент — интеллектуальная автономная компьютерная сущность, находящаяся в окружающей ее среде и взаимодействующая с другими подобными сущностями для достижения целей своего существования» [25].

По мнению В.Д. Боева, «агент» — это активный объект, который обладает поведением и имеет возможность взаимодействия с другими агентами и средой [3].

Исследуя термин «агент», В.Л. Макаров подчёркивает, что каждый из агентов обладает заданным набором характеристик и целевой функцией. На этой основе происходит имитация реакции агента на изменения внешней среды, которая затрагивает его интересы [13].

По словам М.Р. Фаттахова, основными свойствами и атрибутами агентов называют: «автономность, интеллектуальность, репрезентативность, расположенность во времени и пространстве, наличие жизненного цикла, самостоятельность от разработчика модели или внешнего оператора, взаимодействие, целеустремленность, восприятие мира, способность обучаться и адаптироваться, наличие у агента ресурса» [25].

Таким образом, исследователи, занимающиеся вопросами агент-ориентированного моделирования, при определении термина «агент» в качестве его основных особенностей выделяют способность к индивидуальному поведению и взаимодействию с другими агентами и средой. С учетом этого можно выделить следующие ключевые особенности, отличающие агент-ориентированные модели от других видов вычислительных моделей [12]:

1. *Неоднородность агентов (в том числе и в пределах класса).* В классе предприятий каждый агент (предприятие) отличается от другого, обладая при этом соответствующим набором признаков поведения, присущих этому классу. В неагентных имитационных моделях весь класс предприятий представлен одним предприятием, то есть все агенты этого класса действуют синхронно и одинаково как одно целое, что не соответствует реальной действительности. Например, при решении задачи в экономике с помощью вычислимых моделей, описывающих связи между двумя ее секторами — промышленностью и сельским хозяйством, эти сектора ведут себя как два огромных предприятия. В агент-ориентированной модели в каждом из этих классов будет действовать множество агентов-предприятий, которые будут отличаться друг от друга количеством рабочих, объемом выручки, эффективностью производства, видом продукции и т.п.

2. *Автономия (независимость действий агентов друг от друга).* Действия агентов в модели (например, людей) происходят одновременно и параллельно. Также действия агентов различаются даже в пределах одного класса. Например, в классе предприятий, при прочих равных условиях, одно предприятие-агент может принять решение об инвестировании всей прибыли в модернизацию своего производства, второе — направить всю прибыль на выплату дивидендов, а третье сделает и то и другое в определенной пропорции.

3. *Осуществление действий агентов в заданном пространстве, которое имеет определенную структуру.* Например, если агенты в модели (люди, автомобили и т.п.) используют дороги и реки там, где они есть в заданном пространстве, то горы для них являются преградой.

4. *Локальные взаимодействия.* Каждый агент в модели взаимодействует с другими агентами в определенной окрестности, а с теми, кто вне ее, данного типа взаимодействия не происходит. Это приближает модель к реальной жизни, поскольку взаимодействие людей друг с другом осуществляется в рамках определенной территории (даже через интернет взаимодействие не происходит одновременно со всем населением мира).

5. *Ограниченная рациональность.* Это особенность в модели относится к индивидам, предприятиям и государству. В отличие от концепции экономического человека (*homo economicus*) концепция ограниченной рациональности исходит из того, что человеку не удастся достигнуть максимума индивидуальной функции полезности в силу объектных естественных ограничений (ограниченность времени и скорости на принятие решений, ограниченность памяти и доступности информации о возможных вариантах и др.). Это позволяет приблизить агентные модели к реальности.

6. *Неравновесный характер динамики процессов.* Тогда как обычные задачи моделирования (например, задачи общего равновесия) заняты поиском равновесных решений, динамика процессов в агент-ориентированных моделях носит неравновесный характер [8].

Специфика построения агент-ориентированных моделей обуславливает многоэтапность этого процесса. Наряду с общими этапами имитационного моделирования (анализ и системы; формулировка цели моделирования системы; разработка концептуальной структуры модели; реализация модели в среде моделирования; реализация анимационного представления



модели; проверка корректности реализации модели; калибровка модели; планирование и проведение компьютерного эксперимента [3]), для разработки агентных моделей исследователю требуется определить индивидуальные характеристики агентов, смоделировать их поведение и правила взаимодействия со средой, осуществить калибровку модели (на этом этапе достигается соответствие между реально наблюдаемыми данными по моделируемому объекту и данными, которые рассчитаны по результатам индивидуальных действий агентов в модели).

Несмотря на сложность построения агент-ориентированных моделей, интерес к ним повышается, что подтверждается увеличением количества публикаций по данной тематике [39]. Следует отметить, что около половины прототипов агент-ориентированных моделей разрабатываются в социальных и экономических сферах.

В таблице представлены наиболее интересные и проработанные с нашей точки зрения отечественные и зарубежные агент-ориентированные модели в сфере социального и экономического развития различных территорий.

Отечественные и зарубежные агент-ориентированные модели

№ п/п	Модель	Структура модели	Авторы
<b>Отечественные модели</b>			
1.	Региональная модель «Губернатор»	Физические лица (люди – жители региона), юридические лица (предприятия и организации) и муниципальные районы	Е.Д. Сушко
2.	Демографическая модель «Россия»	Два типа агентов, которые различаются репродуктивными стратегиями. Первый вид агентов придерживается традиционной стратегии, а второй – современной	В.Л. Макаров, Е.Д. Сушко, А.Р. Бахтизин
3.	Модель социально-экономического развития мегаполисов (CUBMUD)	Предприятия и люди, а также три типа среды: общественный транспорт, районы, дороги	М.Р. Фаттахов
4.	Мультиагентная модель развития территориальной системы	Экономические районы, состоящие из территориальных производственных комплексов и площадок, на которых их можно разместить	К.С. Чиркунов
5.	Межрегиональная межотраслевая модель «затраты-выпуск» для экономики РФ	Фирмы, домохозяйства, внешние и товарные рынки	В.И. Суслов
<b>Зарубежные модели</b>			
6.	Модель европейской экономики – EURACE (Италия, Франция, Германия, Великобритания, Турция, США)	Домашние хозяйства, предприятия и банки	Ученые из разных стран Европы, нобелевский лауреат Д. Стиглиц
7.	Модель виртуальной экономики в г. Градец-Кралове, Чехия (Hradec Kralove)	Потребители; производители; добывающие предприятия; транспорт	P. Cech, P. Tucmk, V. Bures, M. Husrakova
8.	Модель расширения городской территории (Китай)	Жители города, крестьяне и органы власти	H. Zhang, Y. Zeng, L. Bian, X. Yu
9.	Модель внутригородской миграции (США)	Домашние хозяйства, застройщики и органы власти	S. Sun, S.M. Manson
10.	Модель сокращения города (Германия)	Население, пространство, принятие решений	D. Haase, S. Lautenbach, R. Seppelt
Источник: составлено автором.			

Остановимся более подробно на каждой представленной агент-ориентированной модели.

1. *Региональная модель «Губернатор»*, разработанная Е.Д. Сушко, [14] предназначена для имитации социально-экономического состояния региона на основе реконструкции его внутренней структуры и моделирования поведения действующих на его территории самостоятельных экономических агентов [23]. В модели присутствуют агенты трёх типов: физические лица (люди — жители региона), юридические лица (предприятия и организации) и муниципальные районы. О высокой проработанности модели говорит то, что она обладает очень сложной структурой и включает в себя модель демографического развития региона и его отдельных муниципальных районов; модель трудового потенциала и трудового поведения отдельного человека; модель рынка труда; модель производства; модель формирования и использования бюджета.

Модель «Губернатор» предназначена для апробации разных вариантов управляющих воздействий на уровне региона, модель можно также использовать в качестве инструмента планирования при бюджетировании, ориентированном на результат, т. е. при распределении бюджетных ресурсов согласно целям, задачам и функциям органов власти и управления.

Апробация модели выполнена на примере Вологодской области. С ее помощью были проведены численные эксперименты по имитации динамики состояния населения области, ее муниципальных районов и предприятий на их территории при разных значениях управляемых параметров модели. Итоги апробации показали, что модель достаточно точно отражает особенности регионального социально-экономического развития и может применяться для его имитации [23].

2. *Демографическая агент-ориентированная модель «Россия»* разработана сотрудниками ЦЭМИ РАН для имитации репродуктивного поведения людей исходя из их внутренних установок [15].

В модели агенты разделены на два вида, которые различаются репродуктивными стратегиями. Первый вид агентов придерживается традиционной стратегии, а второй — современной.

На первом этапе работы модели устанавливается стартовое состояние среды и формируются агенты, характеристики которых (возраст, пол, признак принадлежности к определенному типу, желаемое число детей) присваиваются таким образом, чтобы воспроизвести заданную половозрастную и социальную структуру населения моделируемого региона.

На втором этапе имитируются процессы естественного движения населения региона — смертность и рождаемость — с помощью метода перегруппировки возрастов и вероятностных механизмов. По словам авторов, «вымирание агентов происходит в соответствии с коэффициентами смертности, дифференцированными по полу и возрасту, но одинаковыми для всей популяции. Создание же новых агентов (рождение детей) в модели является результатом действий агентов. Вначале агенты-люди взаимодействуют между собой в процессе образования супружеских пар, при котором происходит согласование партнерами числа желаемых общих детей. А затем «семейные пары» договариваются о времени рождения каждого ребенка, и выбор этот зависит от их внутренних установок, связанных с принадлежностью к тому или иному типу» [15].

3. *Агент-ориентированная модель социально-экономического развития меганполисов (Complex Agent-Based Model of Urban Development или сокращенно CUBMUD)* [25], разработанная М.Р. Фаттаховым, состоит



из двух типов агентов: это люди (жители мегаполиса), городские предприятия и организации, а также трех видов среды: районы города, линии общественного транспорта и дороги общего пользования, которые находятся в этих районах. В ходе функционирования модели один вид агентов взаимодействует с другим (тип связи «агент-агент»), т.е. они либо уже работают и получают ежемесячный доход, либо находятся на бирже труда и ищут работу, взаимодействуя со средой модели (тип связи «агент-среда»). Здесь они оплачивают стоимость проживания (платежи ЖКХ, арендная плата). В модели агенты-люди могут менять район проживания исходя из своих предпочтений или финансового положения. В ходе перемещения между домом и работой агенты-люди взаимодействуют со средой – общественным транспортом и дорогами общего пользования. Выбор вида транспортного средства при перемещении определяет количество времени, которое они проводят в дороге и величину ежемесячных расходов. Агенты-люди обладают следующим набором характеристик: возраст, память, размер ежемесячного дохода, размер ежемесячных транспортных расходов, денежный баланс, район работы, район проживания, время начала рабочего дня, наличие или отсутствие личного транспортного средства. Агенты-люди могут находиться в одном из четырёх состояний: удовлетворения, недовольства, состоянии ожидания и нейтральном [27].

Апробация данной модели реализована на примере г. Москвы [24]. Построенная модель CABMUD позволяет осуществлять долгосрочные прогнозы и разрабатывать сценарии социально-экономического развития городов, получать количественную оценку результатов управленческих решений.

4. *Мультиагентная модель развития территориальной системы* разработана и апробирована К.С. Чиркуновым [29]. Основными агентами в ней выступают экономические районы, состоящие из агентов более низкого уровня иерархии: территориальных производственных комплексов и площадок, на которых их можно разместить. Площадки характеризуются географическим положением, а также имеющимися природными и трудовыми ресурсами. Внешняя среда в модели представлена множеством внешних ресурсов и рынков. В процессе функционирования территориальной системы агенты взаимодействуют друг с другом, например могут договариваться о наборе производственных специализаций системы и тем самым определять поведение территориальной системы в целом [28].

5. *Межрегиональная межотраслевая модель «затраты-выпуск»* разработана В.И. Сусловым и его коллегами для решения проблемы моделирования пространственной структуры экономической системы России с учетом ее огромной территории. Модель содержит четыре типа агентов: фирмы, домохозяйства, внешние рынки и товарные рынки. При этом она имеет географическую структуру и привязана к условной карте России с использованием геоинформационного подхода [19].

6. *В сентябре 2006 г. стартовал проект по разработке модели европейской экономики – EURACE (Agent-based Computational Economics)*. В данной модели в рамках социально-экономической системы взаимодействует множество автономных агентов [34]. В проект вовлечены специалисты из восьми научно-исследовательских центров Германии, Италии, Великобритании, Франции и Турции, а также консультант из Колумбийского университета США – нобелевский лауреат Джозеф Стиглиц [20].

Для модели используется географическая информационная система, охватывающая широкий перечень объектов: магазины, предприятия, школы, транспортные сети и т. д.

По своим масштабам и сложности EURACE является уникальной, поскольку в ней представлен весь Европейский союз. Для наполнения модели статистической информацией использовались данные (в виде геоинформационных карт) статистической службы Европейского союза уровня NUTS-2, представляющие сведения о 268 регионах 27 стран<sup>2</sup>.

В модели выделено три типа агентов: домашние хозяйства, предприятия и банки. Все они имеют географическую привязку и связаны друг с другом посредством социальных сетей, деловых отношений и т. д. С помощью разработанной модели был проведен ряд экспериментов с целью исследования рынка труда. Один из основных выводов исследования заключается в том, что макропоказатели двух регионов со схожими условиями (ресурсы, развитие экономики и т. д.) в течение продолжительного периода (10 лет и более) могут значительно разойтись из-за первоначальной неоднородности агентов.

7. *Агент-ориентированная модель виртуальной экономики*, разработанная P. Cech, P. Tucmk, V. Bures и M. Husrakova, воссоздает процессы производства и потребления в реальной экономике. Она предназначена для исследования экономических процессов в чешском городе Градец-Кралове (Hradec Kralove) [45].

<sup>2</sup> NUTS (фр. Nomenclature des unites territoriales statistiques) – Номенклатура территориальных единиц для целей статистики, представляющая собой стандарт территориального деления стран для статистических целей, разработанный Европейским союзом и охватывающий входящие в него страны. Существуют NUTS-единицы трех уровней, при этом второй уровень (NUTS-2) соответствует административным округам в Германии, графствам в Великобритании и т. д.

В модели авторы выделяют четыре типа агентов: потребители (С-агенты); производители (F-агенты); добывающие предприятия (M-агенты); транспорт (Т-агенты). *С-агенты* могут приобретать товары первой необходимости, нормальные товары и предметы роскоши. Структура и скорость потребления определяется индивидуальной функцией потребления, которая зависит от благосостояния агентов. Уровень благосостояния определяется работой и квалификацией. Делая выбор между инвестициями в потребление или повышение квалификации, агенты могут распоряжаться своим благосостоянием. *F-агенты*, потребляя сырьевые ресурсы и другие продукты, осуществляют выпуск конечного продукта, который покупают С-агенты, или промежуточного продукта, приобретаемого другими производителями. С помощью функции потребления в модели определяются пропорции закупаемых сырья и продуктов, а с помощью производственной функции задается ассортимент выпускаемой продукции. Объем выпуска зависит от используемой технологии и квалификации занятых в производстве С-агентов. *M-агенты в модели* осуществляют преобразование природных ресурсов в сырьевые, которые используют F-агенты, причем каждый M-агент поставляет только один вид сырья. Стоимость добычи определяется функцией потребления, отражающей необходимые энергию и технологии. *T-агенты в модели* выступают в роли посредников между агентами-производителями и добывающими предприятиями. Задача T-агента – найти оптимальный маршрут. Вместительность, скорость передвижения и технология определяют производительность t-агента. Стоимость перевозки зависит от расстояния.



На платформе NetLogo авторами реализована упрощенная компьютерная модель виртуальной экономики. Она имитирует процессы добычи сырья, его передачи транспортным агентам, транспортировку, обнаружение препятствий во время транспортировки, производство продукции, покупку, продажу и конечное потребление продукции агентами-потребителями. По замыслу исследователей, окончательная модель должна основываться на реальных статистических данных и согласовываться с поведением хозяйствующих субъектов города Градец-Кралове [27].

8. *Агент-ориентированная модель расширения китайского города* Чанша разработана Н. Zhang, Y. Zeng, L. Bian и X. Yu [46]. Модель включает три типа агентов: жителей города, крестьян и органы власти. В качестве одной из главных движущих сил расширения города в модели считаются агенты-жители, которые выбирают новое место жительства.

Агенты-крестьяне в поисках более комфортной жизни стремятся, с одной стороны, жить поближе к городу и «цивилизации», с другой — не потерять земли, которые их «кормят», ведь именно земли вблизи городской черты и крупных дорог с наибольшей вероятностью будут переданы городу. Принятие решений агентами-крестьянами зависит в модели от целого набора факторов: удельного веса охраняемых земель сельскохозяйственного назначения, удельного веса земель под застройку и зон возможной застройки, расстояния до железных дорог и шоссе, расстояния до главных городских дорог и центра города, плотности населения и др. Органы власти являются в модели агентом особого типа, который не обладает пространственными характеристиками в отличие от агентов двух других типов, однако может принимать решения, способствующие наиболее

рациональному использованию земель, обеспечивает устойчивое развитие города при одновременной защите и сохранении плодородных сельскохозяйственных земель [27].

Описанная модель построена на статистических данных о социально-экономическом развитии г. Чанша в Китае (начиная с 1990 г.) и использует ГИС-карту этого города.

9. *Модель внутригородской миграции* разработана американскими учёными S. Sun и S. M. Manson. В качестве основных агентов в модели представлены: домашние хозяйства (они формируют спрос на рынке недвижимости), застройщики (создают предложение нового жилья) и органы власти (осуществляют регулирование использования земли). Процесс моделирования внутригородской миграции осуществляется в несколько этапов: во-первых, определяются характеристики среды и пространственно-временных рамок; во-вторых, производится загрузка информации об агентах; в-третьих, осуществляется запуск модели и, в-четвертых, анализируются результаты моделирования. Модель верифицирована и откалибрована на данных столичной агломерации штата Миннесота, которую образуют Миннеаполис и примыкающий к нему Сент-Пол [50].

10. *Модель сокращения города*, разработанная немецкими исследователями D. Haase, S. Lautenbach и R. Seppelt, применяется для изучения миграции и землепользования в городе Лейпциг. Основу модели составляют три блока: «Население» (динамика населения влияет на жизненные циклы и типы домохозяйств, определяется миграционным приростом, рождаемостью и смертностью), «Пространство» (каждая точка городского пространства, за исключением её территориальной принадлежности, описывается составом домохозяйств,

типом жилой застройки, транспортной доступностью, стоимостью покупки и аренды недвижимости, безопасностью, криминальной обстановкой, а также наличием медицинских и образовательных учреждений, торговых центров, мест отдыха и развлечений), «Принятие решений» (на основе оценки привлекательности места жительства каждое домохозяйство осуществляет выбор между сохранением прежнего места жительства и переселением) [38].

Модель позволяет оценить уровень высвобождения жилья в городе на основе переселения домохозяйств, а в случае невосстановленности жилья более 5 лет – уровень его сноса.

На основе анализа подходов отечественных и зарубежных исследователей к разработке агент-ориентированных моделей в социальной и экономической сферах можно заключить, что большая их часть посвящена моделированию пространственного, территориального и социально-экономического развития регионов, городов и муниципальных образований. Основными агентами в такого рода моделях являются домашние хозяйства, жители регионов и городов, предприятия и организации, работающие на их территории, а также органы государственной власти и управления (их включение в модель позволяет осуществлять апробацию различных вариантов управленческих воздействий на территории посредством изменения параметров модели, например введения определенных запретов и квот, выдачи разрешений, распределения финансовых ресурсов и т. п.).

Для реализации агентных моделей социально-экономического развития на региональном уровне разработчикам необходимо преодолеть сложности, связанные с определением типов агентов, их количества и характеристик, пониманием механизма

взаимодействия агентов друг с другом и внешней средой, осуществлением калибровки модели и выбора периода симуляций. Ситуацию осложняет также проблема наполнения агент-ориентированных моделей социально-экономического развития территорий реальными данными. Частично данную проблему можно преодолеть путем проведения социологических опросов. Однако методики их проведения не всегда позволяют обеспечить сопоставимость полученных данных на разных уровнях моделирования. Одна из проблем, затрудняющих использование агент-ориентированного подхода при прогнозировании социально-экономического развития территорий, заключается в недостаточной информированности органов государственной власти и управления о возможностях и перспективах этого метода и целесообразности его применения при изучении экономической динамики, принятии управленческих решений и выборе стратегических приоритетов.

Обобщая, можно заключить, что агент-ориентированный подход к моделированию социально-экономического развития территорий очень перспективен, он позволяет повысить эффективность прогнозирования регионального развития и принимаемых управленческих решений за счет очень подробного и реалистичного воссоздания внутренней структуры региона в виде отдельных самостоятельных экономических субъектов, которые взаимодействуют друг с другом и внешней средой, а также возможности быстрой обработки и анализа больших массивов информации.

По нашему мнению, дальнейшие исследования в области агент-ориентированного моделирования социально-экономического развития территорий могут быть направлены на решение задач, связанных с изучением взаимодействия агентов друг с другом



и средой, разработкой теоретических и методологических основ агент-ориентированного подхода, проведением анализа программного обеспечения и технической

реализации агент-ориентированных моделей на суперкомпьютерах, а также разработкой алгоритмов калибровки и верификации агентных моделей.

*За помощь при подготовке данной статьи автор выражает благодарность заместителю директора ИСЭРТ РАН, заведующему отделом проблем научно-технологического развития и экономики знаний д.э.н., доценту Гулину Константину Анатольевичу.*

### Литература

1. Агент-ориентированные модели: мировой опыт и технические возможности реализации на суперкомпьютерах / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко, В.А. Васенин, В.А. Борисов, В.А. Роганов // Вестник РАН. – 2016. – № 3. – С. 253.
2. Бахтизин, А.Р. Агент-ориентированные модели экономики [Текст] / А.Р. Бахтизин. – М.: Экономика, 2008. – 279 с.
3. Боев, В.Д. Компьютерное моделирование: пособие для курсового и дипломного проектирования [Текст] / В.Д. Боев, Д.И. Кирик, Р.П. Сыпченко. – СПб.: ВАС, 2011. – 348 с.
4. Борщев, А.В. Имитационное моделирование: состояние области на 2015 год, тенденции и прогноз [Электронный ресурс] / А.В. Борщев // ИММОД 2015. – Режим доступа: [http://www.anylogic.ru/upload/pdf/immod15\\_borshchev\\_statia.pdf](http://www.anylogic.ru/upload/pdf/immod15_borshchev_statia.pdf).
5. Гранберг, А.Г. Моделирование социалистической экономики: учебник для вузов / А.Г. Гранберг. – М.: Экономика, 1988. – 487 с.
6. Денисова, С.В. Моделирование процесса слияний организаций с помощью агент-ориентированной модели / С.В. Денисова, А.Р. Бахтизин // Проблемный анализ и государственно-управленческое проектирование. – 2011. – № 2. – С. 60.
7. Звягин, Л.С. Практические приёмы моделирования экономических систем / Л.С. Звягин // Проблемы современной экономики: материалы IV междунар. науч. конф. (г. Челябинск, февраль 2015 г.). – Челябинск: Два комсомольца, 2015. – С. 14-19.
8. Зилькарнай, И.У. Задача агент-ориентированного моделирования распределения функций по вертикали в асимметричной федерации / И.У. Зилькарнай // Вестник Башкирского университета. – 2014. – Т. 19. – № 4. – С. 1249-1255.
9. Ивантер, В.В. Стратегия перехода к экономическому росту / В.В. Ивантер // Проблемы прогнозирования. – 2016. – № 1. – С. 3-8.
10. Лаборатория агентного моделирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://abm.center>.
11. Макаров, В.Л. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели) [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин. – М.: Экономика, 2013. – 295 с.
12. Макаров, В.Л. Искусственные общества / В.Л. Макаров // Искусственные общества. – 2006. – Т. 1. – № 1. – С. 10-24.
13. Макаров, В.Л. Современные методы прогнозирования последствий управленческих решений [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин // Управленческое консультирование. – 2015. – № 7. – С. 12-24.
14. Макаров, В.Л. Общее описание модели Вологодской области «Губернатор» [Электронный ресурс] / В.Л. Макаров, Е.Д. Сушко, А.Р. Бахтизин. – Режим доступа: <http://abm.center/publications/index.php?ID=276>.
15. Макаров, В.Л. Общее описание демографической модели «Россия» [Электронный ресурс] / В.Л. Макаров, Е.Д. Сушко, А.Р. Бахтизин. – Режим доступа: <http://abm.center/publications/index.php?ID=278>.
16. Макаров, В. Моделирование демографических процессов с использованием агент-ориентированного подхода / В. Макаров, А. Бахтизин, Е. Сушко // Федерализм. – 2014. – № 4. – С. 37.

17. Мусаев, А. Тихая когнитивная революция / А. Мусаев, А. Шевчик // Эксперт. – 2016. – № 4. – С. 45.
18. О стратегическом планировании в Российской Федерации [Электронный ресурс] : Федеральный закон : принят Государственной Думой 20 июня 2014 г. №172-ФЗ // Консультант-плюс.
19. Опыт агент-ориентированного моделирования пространственных процессов в большой экономике [Текст] / В.И. Суслов, Д.А. Доможиров, В.С. Костин, Л.В. Мельникова, Н. М. Ибрагимов, А. А. Пыплаков // Регион: экономика и социология. – 2014. – № 4. – С. 32-54.
20. Применение суперкомпьютерных технологий для моделирования социально-экономических систем [Текст] / В.В. Окрепилов, В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин и др. // Экономика региона. – 2015. – № 2. – С. 301-313.
21. Савчишина, К. Прогнозирование показателей налогового-бюджетной сферы в рамках квартальной макроэкономической модели QUMMIR» / К. Савчишина // Научные труды. – МАКС Пресс, 2008.
22. Саянова, А.Р. Таблицы «затраты-выпуск» в анализе и прогнозировании структурных параметров региона / А.Р. Саянова // Проблемы прогнозирования – 2004. – № 6. – С. 38.
23. Сушко, Е.Д. Мультиагентная модель региона [Электронный ресурс] / Е.Д. Сушко. – Режим доступа: <http://www.artsoc.ru/publications/index.php?ID=155>.
24. Фаттахов, М.Р. Агент-ориентированная модель социально-экономического развития Москвы [Текст] / М.Р. Фаттахов // Экономика и математические методы. – 2013. – № 2. – С. 30-42.
25. Фаттахов, М.Р. Агент-ориентированная модель социально-экономического развития мегаполисов [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. ст. к.э.н.: 08.00.13. – Москва, 2011. – 30 с.
26. Фомин, А.В. Агент-ориентированная динамическая модель российского фармацевтического рынка [Электронный ресурс] / А.В. Фомин, А.С. Акопов. – Режим доступа: <http://abm.center/publications/index.php?ID=187>.
27. 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.
28. Чиркунов, К.С. Агентное моделирование развития территориальной системы [Текст] / К.С. Чиркунов // Информатика и её применения. – 2011. – Т. 5. – Вып. 1. – С. 58-64.
29. Чиркунов, К.С. Мультиагентный подход и моделирование поведения взаимодействующих иерархических систем экономической природы [Текст]: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.11. / К.С. Чиркунов. – Новосибирск, 2012. – 26 с.
30. Широ, А.А. Обоснование возможных сценариев долгосрочного развития российской экономики [Текст] / А.А. Широ, М.С. Гусев, А.А. Янговский // Всероссийский экономический журнал – «ЭКО». – 2012. – № 6.
31. Batty, M. Urban Modeling / M. Batty // International Encyclopedia of Human Geography. – Oxford: Elsevier, 2009. – Pp. 51-58.
32. Bures, V. Complex agent-based models: Application of a constructivism in the economic research / V. Bures, P. Tucnik // Economics & Management. – 2014. – XVII (1). – Pp. 152-168.
33. Collier N. (2012). Repast HPC Manual. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://repast.sourceforge.net>
34. Deissenberg C., Hoog S. van der, Herbert D. (2008). EURACE: A Massively Parallel Agent-Based Model of the European Economy // Document de Travail No. 2008. Vol. 39. 24 June.
35. Epstein J.M., Axtell R.L. (1996). Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up. Ch.V. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
36. Gilbert N. Agent-based models: Sage Publications Inc. 2008. – 112 p.
37. Grassini M. Accumulation and Competitiveness [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://inforumweb.umd.edu/papers/conferences/2009/grassini\\_paper.pdf](http://inforumweb.umd.edu/papers/conferences/2009/grassini_paper.pdf).
38. Haase, D. Modeling and simulating residential mobility in a shrinking city using an agent-based approach / D. Haase, S. Lautenbach, R. Seppelt // Environ. Model. Softw. – 2010. – No. 25. – Pp. 1225-1240.
39. Heath B., Hill R., Ciarallo F. A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008) // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2009. – No. 12 (4) 9. – URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>.
40. Heppenstall, A. «Space, the Final Frontier»: How Good are Agent-based Models at Simulating Individuals and Space in Cities? / A. Heppenstall, N. Malleon, A.T. Crooks // Systems. – 2016. – No. 4 (1) 9. – URL: <http://www.mdpi.com/2079-8954/4/1/9/pdf>.



41. Jiang, X. *Statistical and Economic Applications of Chinese Regional Input-Output Tables*, University of Groningen, Groningen, The Netherlands, 2011.
42. 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>.
43. Lynar T. M., Herbert R. D., Chivers W. J. (2009): Implementing an Agent Based Auction Model on a Cluster of Reused Workstations // *International J. of Computer Applications in Technology*. Vol. 34. Issue 4, p. 13-24.
44. Magliocca, N. An economic agent-based model of coupled housing and land markets (CHALMS) / N. Magliocca, E. Safirova, V. McConnell, M. Walls // *Computers, Environment and Urban Systems*. – 2011. – No. 35. – Pp. 183-191.
45. Modelling Complexity of Economic System with Multi-Agent Systems / P. Cech, P. Tucnik, V. Bures, M. Husrakova // *5th International Conference on Knowledge Management and Information Sharing (KMIS 13)*, Vilamoura, Algarve, Portugal, 19-22 Sept. 2013. – Pp. 464-469.
46. Modelling urban expansion using a multi agent-based model in the city of Changsha / H. Zhang, Y. Zeng, L. Bian, X. Yu // *Journal of Geographical Sciences*. – 2010. – No. 20(4). – Pp. 540-556.
47. Nikolai C., Madey G. Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2009. – No. 12 (2) 2. – URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/2.html>.
48. Parker J. (2007). A Flexible, Large-Scale, Distributed Agent Based Epidemic Model. Center on Social and Economic Dynamics. Working Paper No. 52, p. 25.
49. Rui, Y. Multi-agent Simulation for Modeling Urban Sprawl in the Greater Toronto Area / Y. Rui, Y. Ban // *Proc. of the 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*. – Guimaraes (Portugal), 2010. – URL: [https://agile-online.org/Conference\\_Paper/CDs/agile\\_2010/ShortPapers\\_PDF/124\\_DOC.pdf](https://agile-online.org/Conference_Paper/CDs/agile_2010/ShortPapers_PDF/124_DOC.pdf).
50. Sun, S. Simple Agents, Emergent City: Agent-Based Modeling of Intraurban Migration / S. Sun, S.M. Manson // *Computational Approaches for Urban Environments*. – Berlin: Springer, 2015. – Pp. 123-147.

### Сведения об авторе

Виталий Николаевич Маковеев – кандидат экономических наук, и.о. зав. лабораторией интеллектуальных и программно-информационных систем, Институт социально-экономического развития территорий Российской академии наук (160014, Россия, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а, makoveevvn@mail.ru)

Makoveev V.N.

## Using Agent-Based Models in the Analysis and Forecast of Socio-Economic Development of Territories

**Abstract.** The purpose of the paper is to study the essence of agent-based modeling, defining its features and prospects of usage in the modeling of socio-economic development of territories and systematization of domestic and foreign approaches to the development of prototypes for agent-based models of territories. Information basis for the research comprised the works on agent-based modeling by Russian and foreign scholars, especially articles and monographs of scientists of the Central Economics and Mathematics Institute under the Russian Academy of Sciences, papers presented in an international journal *The Journal of Artificial Societies and Social Simulation* and other sources available on the Internet. The article presents theoretical and methodological foundations of agent-based models of territories. The author considers the concepts of “agent-based modeling” and “agent” and defines specifics of agent-based models in comparison with other types of simulation modeling. The paper also describes major stages of building agent-based models for territories and considers qualification requirements to a modeling subject. Furthermore, it reviews Russian and foreign approaches to the development of prototypes for agent-based models of territories. It has been determined that most of them deal with the modeling of spatial, territorial and socio-

economic development of regions, cities and municipal entities. Agents in such models are presented by households, residents of regions and cities, enterprises and organizations operating in their territory, and public administration authorities (their inclusion in the model makes it possible to test different options of management impacts on territories by changing the model parameters, for instance, the introduction of certain prohibitions and quotas, issuance of permits, distribution of financial resources, etc.). At the end of the paper, the author formulates major conclusions. He shows the complexity faced by developers of agent-based models of socio-economic development and prospects for further research in this field. It has been established that the agent-based approach to the modeling of socio-economic development of territories is very promising, it helps improve the efficiency of forecasting regional development and management decisions due to a very detailed and realistic reconstruction of the internal structure of a region in the form of separate independent economic entities that interact with each other and with external environment, and also due to the possibility of fast processing and analysis of large amounts of data.

**Key words:** economy, mathematical modeling, agent-based models of socio-economic development.

### References

1. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Vasenin V.A., Borisov V.A., Roganov V.A. Agent-orientirovannye modeli: mirovoi opyt i tekhnicheskie vozmozhnosti realizatsii na superkomp'yuterakh [Agent-based models: world experience and technical capability of implementation on supercomputers]. *Vestnik RAN* [Herald of the Russian Academy of Sciences], 2016, no. 3, p. 253. (In Russian).
2. Bakhtizin A.R. *Agent-orientirovannye modeli ekonomiki* [Agent-based models for the economy]. Moscow: Ekonomika, 2008. 279 p. (In Russian).
3. Boev V.D., Kirik D.I., Sypchenko R.P. *Komp'yuternoe modelirovanie: posobie dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya* [Computer simulation: a handbook for simulation in term and graduation papers]. Saint Petersburg: VAS, 2011. 348 p. (In Russian).
4. Borshchev A.V. Imitatsionnoe modelirovanie: sostoyanie oblasti na 2015 god, tendentsii i prognoz [Simulation modeling: current state of the field as of 2015, its trends and forecast]. *IMMOD 2015*. Available at: [http://www.anylogic.ru/upload/pdf/immod15\\_borshchev\\_statia.pdf](http://www.anylogic.ru/upload/pdf/immod15_borshchev_statia.pdf). (In Russian).
5. Granberg A.G. *Modelirovanie sotsialisticheskoi ekonomiki: uchebnik dlya vuzov* [Modeling of the socialist economy: textbook for universities]. Moscow: Ekonomika, 1988. 487 p. (In Russian).
6. Denisova S.V., Bakhtizin A.R. Modelirovanie protsessa sliyanii organizatsii s pomoshch'yu agent-orientirovannoi modeli [Modeling of the process of mergers of organizations using an agent-based model]. *Problemy analiz i gosudarstvenno-upravlencheskoe proektirovanie* [Problem analysis and public administration projection], 2011, no. 2, p. 60. (In Russian).
7. Zvyagin L.S. Prakticheskie priemy modelirovaniya ekonomicheskikh sistem [Practical techniques for modeling economic systems]. *Problemy sovremennoi ekonomiki: materialy IV mezhdunar. nauch. konf. (g. Chelyabinsk, fevral' 2015 g.)* [Problems of modern economics: proceedings of the 4th international scientific conference (Chelyabinsk, February 2015)]. Chelyabinsk: Dva komsomol'tsa, 2015. P. 14-19. (In Russian).
8. Zul'karnai I.U. Zadacha agent-orientirovannogo modelirovaniya raspredeleniya funktsii po vertikali v asimmetrichnoi federatsii [Task of agent-based modeling for vertical distribution of the function in an asymmetric federation]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta* [Bulletin of Bashkir University], 2014, vol. 19, no. 4, pp. 1249-1255. (In Russian).
9. Ivanter V.V. Strategiya perekhoda k ekonomicheskomu rostu [Strategy for transition to economic growth]. *Problemy prognozirovaniya* [Studies on Russian Economic Development], 2016, no. 1, pp. 3-8. (In Russian).
10. *Laboratoriya agentnogo modelirovaniya* [Laboratory for agent-based modeling]. Available at: <http://abm.center>. (In Russian).
11. Makarov V.L., Bakhtizin A.R. *Sotsial'noe modelirovanie – novyi komp'yuternyi proryv (agent-orientirovannye modeli)* [Social simulation – a new computer breakthrough (agent-oriented models)]. Moscow: Ekonomika, 2013. 295 p. (In Russian).
12. Makarov V.L. Iskusstvennye obshchestva [Artificial societies]. *Iskusstvennye obshchestva* [Artificial Societies], 2006, vol. 1, no. 1, pp. 10-24. (In Russian).



13. Makarov V.L., Bakhtizin A.R. *Sovremennyye metody prognozirovaniya posledstviy upravlencheskikh reshenii* [Modern methods for forecasting the effects of management decisions]. *Upravlencheskoe konsul'tirovanie* [Management Consulting], 2015, no. 7, pp. 12–24. (In Russian).
14. Makarov V.L., Sushko E.D., Bakhtizin A.R. *Obshchee opisanie modeli Vologodskoi oblasti "Gubernator"* [General description of Vologda Oblast model "The Governor"]. Available at: <http://abm.center/publications/index.php?ID=276>. (In Russian).
15. Makarov V.L., Sushko E.D., Bakhtizin A.R. *Obshchee opisanie demograficheskoi modeli "Rossiya"* [General description of the demographic model "Russia"]. Available at: <http://abm.center/publications/index.php?ID=278>. (In Russian).
16. Makarov V., Bakhtizin A., Sushko E. *Modelirovanie demograficheskikh protsessov s ispol'zovaniem agent-orientirovannogo podkhoda* [Simulation of demographic processes using the agent-based approach]. *Federalizm* [Federalism], 2014, no. 4, p. 37. (In Russian).
17. Musaev A., Shevchik A. *Tikhaya kognitivnaya revolyutsiya* [Quiet cognitive revolution]. *Ekspert* [Expert], 2016, no. 4, p. 45. (In Russian).
18. *O strategicheskom planirovanii v Rossiiskoi Federatsii: Federal'nyi zakon: prinyat Gosudarstvennoi Dumoi 20 iyunya 2014 g. №172-FZ* [On strategic planning in the Russian Federation: Federal Law: adopted by the State Duma on 20 June 2014 No. 172-FZ]. *Konsul'tant-plyus* [Consultant-plus]. (In Russian).
19. Suslov V.I., Domozhirov D.A., Kostin V.S., Mel'nikova L.V., Ibragimov N.M., Tsyplakov A.A. *Opyt agent-orientirovannogo modelirovaniya prostranstvennykh protsessov v bol'shoi ekonomike* [Agent-based modeling of spatial processes in big economy]. *Region: ekonomika i sotsiologiya* [Region: Economics and Sociology], 2014, no. 4, pp. 32-54. (In Russian).
20. Okrepilov V.V., Makarov V.L., Bakhtizin A.R. et al. *Primenenie superkomp'yuternykh tekhnologii dlya modelirovaniya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem* [Application of supercomputer technologies for simulation of socio-economic systems]. *Ekonomika regiona* [Economy of Region], 2015, no. 2, pp. 301-313. (In Russian).
21. Savchishina K. *Prognozirovaniye pokazatelei nalogovo-byudzhethnoi sfery v ramkakh kvartal'noi makroekonomicheskoi modeli "QUMMIR"* [Forecasting the performance of the fiscal sector in the framework of the quarterly macroeconomic model "QUMMIR"]. *Nauchnye trudy* [Scientific works]. MAKS Press, 2008. (In Russian).
22. Sayanova A.R. *Tablitsy "zatraty-vypusk" v analize i prognozirovanii strukturnykh parametrov regiona* ["Input-output" tables in the analysis and forecasting of structural parameters of the region]. *Problemy prognozirovaniya* [Studies on Russian Economic Development], 2004, no. 6, p. 38. (In Russian).
23. Sushko E.D. *Mul'tiagentnaya model' regiona* [A multi-agent model of the region]. Available at: <http://www.artsoc.ru/publications/index.php?ID=155>. (In Russian).
24. Fattakhov M.R. *Agent-orientirovannaya model' sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Moskvy* [An agent-based model of socio-economic development of Moscow]. *Ekonomika i matematicheskie metody* [Economics and mathematical methods], 2013, no. 2, pp. 30-42. (In Russian).
25. Fattakhov M.R. *Agent-orientirovannaya model' sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya megapolisov: avtoref. dis. na soisk. uch. st. k.e.n.: 08.00.13* [An agent-based model for socio-economic development of megacities: Ph.D. in Economics dissertation abstract]. Moscow, 2011. 30 p. (In Russian).
26. Fomin A.V., Akopov A.S. *Agent-orientirovannaya dinamicheskaya model' rossiiskogo farmatsevticheskogo rynka* [Agent-based dynamic model of the Russian pharmaceutical market]. Available at: <http://abm.center/publications/index.php?ID=187>. (In Russian).
27. 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).
28. Chirkunov K.S. *Agentnoe modelirovanie razvitiya territorial'noi sistemy* [Agent-based modeling of development of territorial systems]. *Informatika i ee primeneniya* [Informatics and its applications], 2011, vol. 5, no. 1, pp. 58-64. (In Russian).
29. Chirkunov K.S. *Mul'tiagentnyi podkhod i modelirovanie povedeniya vzaimodeistvuyushchikh ierarkhicheskikh sistem ekonomicheskoi prirody: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 05.13.11* [Multi-agent approach and simulation of the behavior of interacting hierarchical systems of economic nature: Ph.D. in Physics and Mathematics dissertation abstract]. Novosibirsk, 2012. 26 p. (In Russian).

30. Shirov A.A., Gusev M.S., Yantovskii A.A. Obosnovanie vozmozhnykh stsenariiev dolgosrochnogo razvitiya rossiiskoi ekonomiki [Substantiation of possible scenarios for the long-term development of the Russian economy]. *Vserossiiskii ekonomicheskii zhurnal – “EKO”* [All-Russian economic journal – ECO], 2012, no. 6. (In Russian).
31. Batty M. Urban Modeling. *International Encyclopedia of Human Geography*. Oxford: Elsevier, 2009. Pp. 51–58.
32. Bures V., Tucnik P. Complex agent-based models: Application of a constructivism in the economic research. *Economics & Management*, 2014, no. 17 (1), pp. 152–168.
33. Collier N. *Repast HPC Manual. 2012*. Available at: <http://repast.sourceforge.net>
34. Deissenberg C., van der Hoog S., Herbert D. EURACE: A Massively Parallel Agent-Based Model of the European Economy. *Document de Travail No. 2008, vol. 39, 24 June*.
35. Epstein J.M., Axtell R.L. *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up. Ch. V*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1996.
36. Gilbert N. *Agent-based models*. Sage Publications Inc., 2008. 112 p.
37. Grassini M. *Accumulation and Competitiveness*. Available at: [http://inforumweb.umd.edu/papers/conferences/2009/grassini\\_paper.pdf](http://inforumweb.umd.edu/papers/conferences/2009/grassini_paper.pdf).
38. Haase D., Lautenbach S., Seppelt R. Modeling and simulating residential mobility in a shrinking city using an agent-based approach. *Environ. Model. Softw.*, 2010, no. 25, pp. 1225–1240.
39. Heath B., Hill R., Ciarallo F. A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008). *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2009, no. 12 (4) 9. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>.
40. Heppenstall A., Malleson N., Crooks A.T. “Space, the Final Frontier”: How Good are Agent-based Models at Simulating Individuals and Space in Cities? *Systems*, 2016, no. 4 (1) 9. Available at: <http://www.mdpi.com/2079-8954/4/1/9/pdf>.
41. Jiang X. *Statistical and Economic Applications of Chinese Regional Input-Output Tables*. Groningen, 2011.
42. 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>.
43. Lynar T.M., Herbert R.D., Chivers W.J. Implementing an agent based auction model on a cluster of reused workstations. *International J. of Computer Applications in Technology*, 2009, vol. 34, no. 4, pp.13–24.
44. Magliocca N., Safirova E., McConnell V., Walls M. An economic agent-based model of coupled housing and land markets (CHALMS). *Computers, Environment and Urban Systems*, 2011, no. 35, pp. 183–191.
45. Cech P., Tucnik P., Bures V., Husrakova M. Modelling complexity of economic system with multi-agent systems. *5th International Conference on Knowledge Management and Information Sharing (KMIS 13), Vilamoura, Algarve, Portugal, 19-22 September 2013*. Pp. 464–469.
46. Zhang H., Zeng Y., Bian L., Yu X. Modelling urban expansion using a multi agent-based model in the city of Changsha. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, no. 20 (4), pp. 540–556.
47. Nikolai C., Madey G. Tools of the trade: a survey of various agent based modeling platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2009, no. 12 (2) 2. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/2.html>.
48. Parker J. *A Flexible, Large-Scale, Distributed Agent Based Epidemic Model. Center on Social and Economic Dynamics. Working Paper No. 52, 2007. P.25*.
49. Rui Y., Ban Y. Multi-agent simulation for modeling urban sprawl in the Greater Toronto Area. *Proc. of the 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*. Guimaraes, 2010. Available at: [https://agile-online.org/Conference\\_Paper/CDs/agile\\_2010/ShortPapers\\_PDF/124\\_DOC.pdf](https://agile-online.org/Conference_Paper/CDs/agile_2010/ShortPapers_PDF/124_DOC.pdf).
50. Sun S., Manson S.M. Simple Agents, Emergent City: Agent-Based Modeling of Intraurban Migration. *Computational Approaches for Urban Environments*. Berlin: Springer, 2015. Pp. 123–147.

### Information about the Author

Vitalii Nikolaevich Makoveev – Ph.D. in Economics, Acting Head of the Laboratory, Institute of Socio-Economic Development of Territories of Russian Academy of Science (56A, Gorky Street, 160014, Vologda, Russian Federation, makoveevvn@mail.ru)

Статья поступила 09.09.2016