

Обзор российского и зарубежного опыта агент-ориентированного моделирования сложных социально-экономических систем мезоуровня*



**Елена Андреевна
ЧЕКМАРЕВА**

кандидат экономических наук

Институт социально-экономического развития территорий РАН

160014, Россия, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а

miteneva@inbox.ru

Аннотация. В статье представлен обзор разработанных российскими и зарубежными учёными агент-ориентированных моделей сложных социально-экономических систем мезоуровня. Рассмотрены агент-ориентированные модели муниципальных образований: городов, городских агломераций, пригородных районов и др. При выборе моделей для обзора предпочтение отдавалось моделям муниципального уровня, имеющим подробное описание агентов, их поведения и правил взаимодействия, сопровождаемое наглядной схемой концептуальной модели. Вместе с тем важным критерием являлось и наличие информации об апробации построенной модели на реальных данных по конкретному муниципальному образованию. Зарубежный опыт применения агент-ориентированного подхода к изучению социально-экономических систем мезоуровня раскрыт на примере наиболее интересных и перспективных с нашей точки зрения моделей муниципальных образований: моделей виртуальной экономики города, модели взаимосвязанных рынков жилья и земли, моделей расширения городской территории, модели сокращения города, модели внутригородской миграции, модели взаимосвязанного развития творческой индустрии и пространственной структуры города. Рассмотрен также опыт российских учёных в этой области, представленный в научных публикациях о разработанных к настоящему времени моделях социально-экономического развития городов и муниципальных районов. При этом описаны основные действующие в каждой модели агенты, среда их функционирования, правила взаимодействия между собой и с внешней средой. Наглядно представлены концептуальные модели взаимодействия агентов. Показаны возможности и примеры практического применения описанных агент-ориентированных моделей.

Ключевые слова: агент, агент-ориентированная модель, обзор, мезоуровень, муниципальные образования.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-36-60011 мол_а_дк

В современный век активного развития информационных технологий эффективность государственного управления любого уровня всё более зависит не только от объема и достоверности имеющейся у органов власти информации о социальных и экономических переменах, происходящих на подведомственной территории, но и от используемых способов обработки таких данных. Объем информации, с которой приходится иметь дело лицам, принимающим решения, с каждым днём нарастает. При этом, как справедливо отмечают *А. Мусеев* и *А. Шевчик*, человеческий мозг может воспринимать не более трёх-четырёх взаимосвязанных параметров динамического процесса, поэтому для выработки наиболее эффективных управленческих решений целесообразно привлекать «когнитивных советников», без труда обрабатывающих сотни и тысячи взаимосвязанных параметров [13, с. 50]. Такими когнитивными советниками, на наш взгляд, способны стать компьютерные агент-ориентированные модели, учитывающие характеристики и особенности поведения хозяйствующих субъектов микроуровня и позволяющие прогнозировать процессы макро- и мезоуровня, а также производить апробацию различных вариантов управляющих воздействий.

Агент-ориентированные модели — специальный класс моделей, основанных на индивидуальном поведении агентов и создаваемых для компьютерных симуляций [2, с. 24]. Они представляют собой искусственное общество, состоящее из взаимодействующих 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 [14, с. 5].

Как наглядно показано в исследовании *B. Heath, R. Hill* и *F. Ciarallo* [25], агент-ориентированное моделирование приобретает всё большую и большую популярность, число статей по данной тематике из года в год неуклонно растёт, причём около половины всех агент-ориентированных моделей строятся в области социальных наук и экономики, моделируют различные социальные и экономические явления и процессы.

Среди агент-ориентированных моделей социально-экономической тематики львиную долю занимают макроэкономические. В результате широкого применения агент-ориентированного моделирования в исследовании макроэкономических процессов и систем для обозначения этого класса моделей в зарубежных публикациях даже появилось понятие «МасгоАВМ» [27]. Ярким примером моделей макроуровня является EURACE [23] — агент-ориентированная вычислимая модель европейской экономики.

Агент-ориентированные модели микроуровня не менее широко распространены благодаря их активному применению для оптимизации бизнес-процессов в целях повышения прибыли предприятий и организаций. Наименьший сегмент занимают агент-ориентированные модели мезоуровня (от греч. *mesos* — средний, промежуточный), то есть модели муниципальных образований — городов и районов, реже встречающиеся в зарубежных и отечественных публикациях.

Однако стоит признать, что некоторые модели макроуровня могут быть адаптированы к мезоуровню. В то же время это возможно далеко не всегда, поскольку агент-ориентированные модели социально-экономических систем мезоуровня будут иметь свои особенности, заключающиеся в специфических типах агентов и среды. Согласно авторитетному мнению академика *В.Л. Макарова* и доктора экономи-

ческих наук *А.Р. Бахтизина*, агентами в агент-ориентированных моделях могут быть любые наблюдаемые в реальной жизни объекты, однако основной задачей их учёта в рамках модели является их корректная спецификация. В частности, в моделях социально-экономических систем обычно присутствуют агрегированные агенты, представляющие собой либо отрасль, либо регион, либо совокупное домохозяйство [9, с. 21].

В статье ставилась цель провести обзор разработанных российскими и зарубежными учёными агент-ориентированных моделей сложных социально-экономических систем мезоуровня. Для достижения поставленной цели были рассмотрены наиболее интересные, на наш взгляд, агент-ориентированные модели муниципальных образований: городов, городских агломераций, пригородных районов и др. При этом были описаны основные действующие в каждой модели агенты, среда их функционирования, правила взаимодействия между собой и с внешней средой, наглядно представлены концептуальные модели взаимодействия агентов, раскрыты возможности и примеры практического применения описанных агент-ориентированных моделей.

Информационную базу исследования составили отечественные и зарубежные публикации по агент-ориентированному моделированию, в частности статьи и монографии учёных ЦЭМИ РАН, активно развивающих данное направление в России, а также международные издания, доступные в сети Интернет.

I. Обзор зарубежного опыта

В настоящее время описанная в зарубежных публикациях практика агент-ориентированного моделирования социально-экономических систем мезоуровня в основном заключается в имитации развития городов, городских агломераций и

пригородных территорий. Как известно, моделирование городского развития, имеющее многолетнюю историю, представлено широким набором методов, включая социальную физику, клеточные автоматы и другое [20]. История развития данного направления хорошо отражена в работах ведущего мирового специалиста по городскому моделированию *М. Batty* [19], который рассматривает города как сложные социально-экономические системы в мезомасштабе [18].

Исследование городского развития методом агент-ориентированного моделирования является относительно новым и перспективным направлением. Тем не менее научным сообществом уже накоплен немалый опыт построения агент-ориентированных моделей развития городского социально-экономического пространства. С некоторыми из них можно ознакомиться в обзорной статье известного английского специалиста по агент-ориентированному моделированию *А. Heppenstall* и её соавторов [26]. Однако цель данного обзора несколько отличается от поставленных нами целей, т.к. он характеризуется обширным охватом публикаций, но крайне поверхностным изложением сути самих моделей. Авторы делают акцент на предназначении описываемых моделей, а конструкция моделей, представляющая, на наш взгляд, наибольший интерес, практически не рассматривается. Кроме того, в этом обзоре преимущество отдано моделям, входящим в сферу интересов авторов, и не затрагиваются многие другие модели, заслуживающие внимания.

При выборе агент-ориентированных моделей для нашего обзора предпочтение отдавалось моделям муниципального уровня, имеющим подробное описание агентов, их поведения и правил взаимодействия, сопровождаемое наглядной схемой

концептуальной модели. Вместе с тем важным критерием являлось и наличие информации об апробации построенной модели на реальных данных по конкретному муниципальному образованию. То есть абстрактные теоретические агент-ориентированные модели, не предполагающие практического использования, сознательно не включались в обзор.

Модели виртуальной экономики. В работе *P. Čech, P. Tučník, V. Bureš и M. Husráková* [31] предлагается агент-ориентированная модель виртуальной экономики, предназначенная для исследования экономических процессов и прогресса в чешском городе Градец-Кралове (Hradec Králové). Модель воссоздает процессы производства и потребления в реальной экономике и содержит четыре типа автономных агентов:

- 1) потребители или С-агенты (от англ. «Consumer»);
- 2) производители или F-агенты (от англ. «Factory»);
- 3) добывающие предприятия или M-агенты (от англ. «Mining»);
- 4) транспорт или T-агенты (от англ. «Transport»).

По словам авторов, предлагаемая ими модель аналогична модели виртуальной экономики японских коллег [22], которая была упрощена, поскольку обладала более специфическими производствами и имела более сложную сеть отношений между агентами, чем это требовалось в исследовании. В частности, чешская модель, в отличие от японской, не учитывает банковские операции и деятельность правительства, поэтому такие агенты, как «Банк», «Центральный банк» и «Правительство», были исключены. Кроме того, вместо четырёх специализированных агентов, представляющих сельское хозяйство, хлебопекарную промышленность, металлургию и машиностроение, вводится один —

«Производители» и добавляется новый тип агентов — «Транспорт».

Поведение агентов в модели:

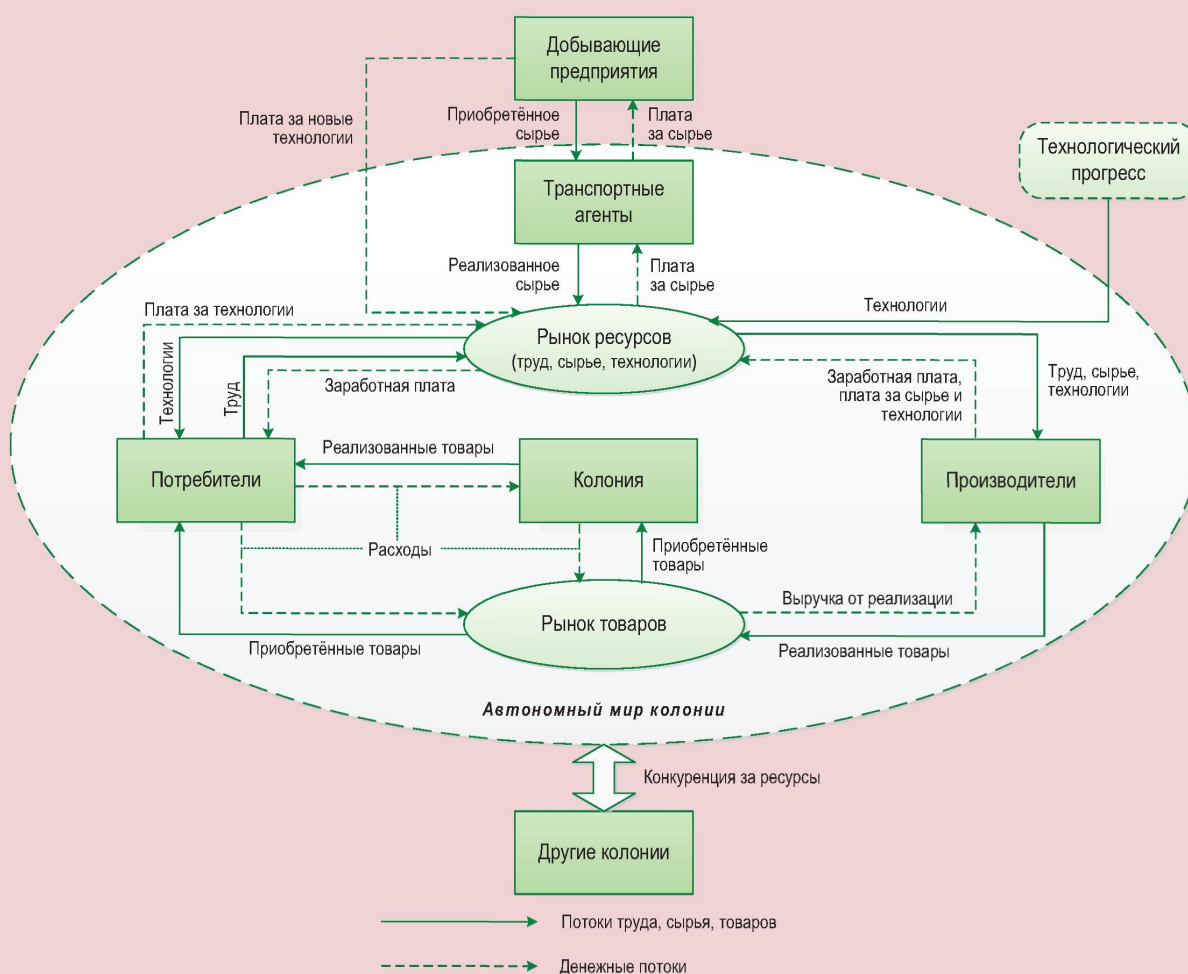
1. Агенты-потребители могут покупать товары трёх типов: первой необходимости, нормальные товары и предметы роскоши. Структура и скорость потребления определяется индивидуальной функцией потребления, зависящей от благосостояния агентов, которое в свою очередь определяется работой и квалификацией. При этом агенты могут распоряжаться своим благосостоянием, делая выбор между инвестициями в повышение квалификации и потреблением.

2. Агенты-производители потребляют сырьё и другие продукты и выпускают конечный продукт, покупаемый агентами-потребителями, или промежуточный продукт, покупаемый другими производителями. Закупаемое сырьё и продукты и их пропорции определяет функция потребления, а ассортимент выпускаемой продукции задаётся производственной функцией. Выпуск зависит от используемой технологии и квалификации занятых в производстве агентов-потребителей.

3. Добывающие предприятия отвечают за преобразование природных ресурсов в сырьё, используемое агентами-производителями. При этом каждый агент данного типа поставяет только один вид сырья. Стоимость добычи определяется функцией потребления, отражающей необходимые энергию и технологии.

4. Транспортные агенты являются посредниками между добывающими предприятиями и агентами-производителями. Задача транспортного агента — найти оптимальный маршрут. Производительность транспортного агента определяется скоростью передвижения, вместимостью и технологией. Стоимость перевозки зависит от расстояния.

Рисунок 1. Концептуальная модель виртуальной экономики (Градец-Кралове)



Источник: Modelling Complexity of Economic System with Multi-Agent Systems / P. Čech, P. Tučník, V. Bureš, M. Husárková // 5th International Conference on Knowledge Management and Information Sharing (KMIS 13), Vilamoura, Algarve, Portugal, 19-22 Sept. 2013. – Pp. 464-469 (перевод автора).

Кроме всего перечисленного, потребители, производители и транспортные агенты могут объединяться в небольшие сообщества, названные в модели колониями (Colony). Колонии конкурируют за ресурсы и имеют две базовые характеристики: положение в пространстве и размер (численность населения). При этом успешность колонии определяется её благосостоянием, которое вычисляется как сумма благосостояний всех входящих в неё агентов (рис. 1).

В общем виде агент описывается как вектор восьми переменных:

$$\text{AGENT} = (\text{pos}, w, s, \text{con}, e, \text{pro}, \text{mob}, a),$$

где pos — от англ. position — положение в двумерном декартовом пространстве,

w — от англ. wealth — благосостояние ($w \geq 0$, то есть долгов не допускается),

s — от англ. storage capacity — ёмкость, пропускная способность склада,

con — от англ. consumption — объём потребления,

е — от англ. efficiency — эффективность,
 pro — от англ. production function — производственная функция,
 mob — от англ. mobility — мобильность,
 а — от англ. affiliation — принадлежность к колонии.

Колония в свою очередь задаётся пятью переменными:

$$COL_{metaagent} = (pos, s, w, cw, CP),$$

где cw — от англ. creditworthiness — кредитоспособность колонии,

CP — от англ. colony population — размер колонии (количество агентов) [21].

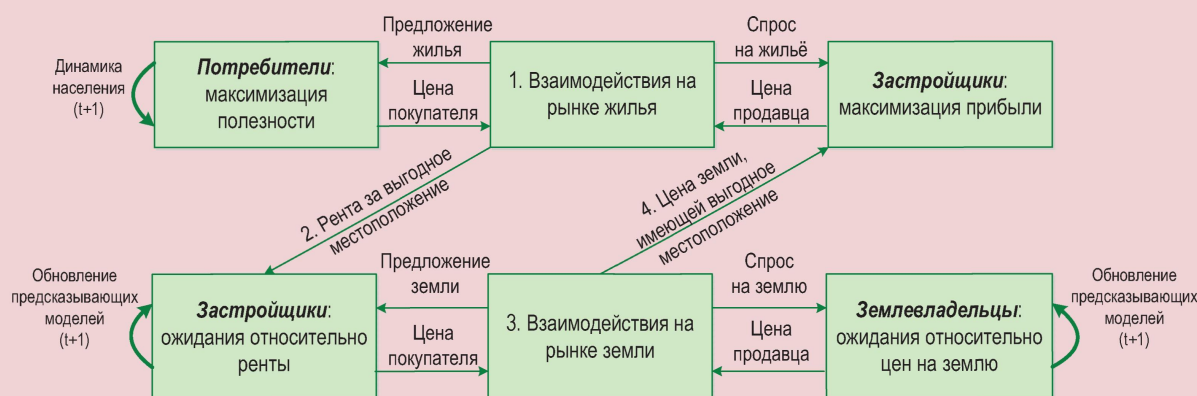
Первичная упрощенная компьютерная модель описанной виртуальной экономики реализована авторами на платформе NetLogo и имитирует такие процессы, как: добыча сырья, передача сырья транспортным агентам, транспортировка сырья в колонию, обнаружение препятствий во время транспортировки (болота, леса, водохранилища, песок), производство продукции, покупка, продажа и конечное потребление продукции агентами-потребителями.

Окончательная модель, по замыслу авторов, должна быть согласована с поведением хозяйствующих субъектов города Градец-Кралове и основываться на реальных статистических данных.

Модель взаимосвязанных рынков жилья и земли. Одной из наиболее известных экономических агент-ориентированных моделей мезоуровня можно назвать CHALMS (Coupled Housing and Land Markets model) [30] — модель взаимосвязанных рынков жилья и земли, разработанную N. Magliocca и описывающую динамику гипотетической пригородной местности (рис. 2).

Основными агентами в модели являются землевладельцы, потребители и застройщики. Модель имитирует постепенное превращение пригородных сельскохозяйственных угодий в жилые районы города, происходящее в результате действий агентов на рынках земли и жилья. По мнению авторов, разработанная модель хорошо улавливает основные тенденции развития большинства пригородных районов США.

Рисунок 2. Концептуальная модель взаимосвязанных рынков жилья и земли



Примечание: цифрами указана последовательность событий в рамках одного шага модельного времени.

Источник: 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 (перевод автора).

Модели расширения городской территории. Агент-ориентированная модель расширения китайского города Чанша, разработанная *H. Zhang, Y. Zeng, L. Bian* и *X. Yu* [32], также содержит три типа агентов: это жители города, крестьяне и органы власти. Агенты-жители, выбирающие новое место жительства, считаются в модели одной из главных движущих сил расширения города. При этом рассматриваются два вида агентов-жителей: новые жители города, приезжающие извне, и уже существующие жители, переезжающие на новое место жительства. Предполагается, что при поиске нового места жительства агент стремится максимизировать функцию полезности:

$$U_{x,y} = \alpha \cdot C_{x,y} + \beta \cdot L_{x,y} + \gamma \cdot E_{x,y} + \mu_{x,y},$$

где C , L и E — стандартизованные транспортная доступность, стоимость земли и природная ценность места (x, y) соответственно,

α , β и γ — веса каждого фактора для конкретного агента ($\alpha + \beta + \gamma = 1$),

$\mu_{x,y}$ — случайный остаток. Введение весовых коэффициентов позволяет учесть, что значимость рассматриваемых факторов при выборе места жительства для агентов с разным уровнем дохода и составом семьи не одинакова.

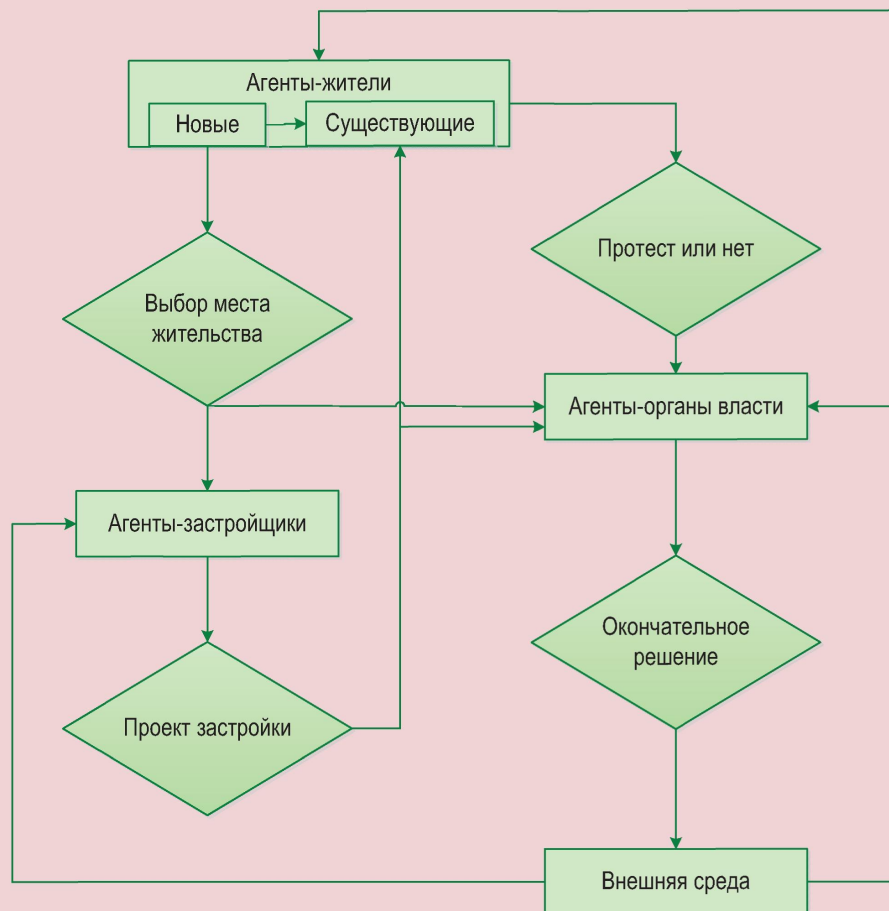
Агенты-крестьяне в поисках более комфортной жизни стремятся, с одной стороны, жить поближе к городу и «цивилизации», с другой — не потерять земли, которые их «кормят», ведь именно земли вблизи городской черты и крупных дорог с наибольшей вероятностью будут переданы городу. Принятие решений агентами-крестьянами зависит в модели от целого набора факторов: удельного веса охраняемых земель сельскохозяйственного назначения, удельного веса земель под застрой-

ку 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. Модель построена на реальных статистических данных о социально-экономическом развитии города Чанша, начиная с 90-х годов прошлого века, использует ГИС-карту города и реализована в виде клеточного автомата.

Ещё одним примером агент-ориентированных моделей роста городов служит модель расширения Большого Торонто [33], упоминаемая также в статье [7, с. 34]. Модель содержит три типа агентов: жители города, застройщики и органы власти (рис. 3). Как и в описанной выше «китайской» модели, здесь рассматриваются два вида жителей: новые и уже существующие. Новые жители в поисках места жительства побуждают застройщиков (которые, естественно, ориентированы на прибыль) разрабатывать проекты застройки и отправлять их на рассмотрение в органы власти и жителям домов, прилежащих к району потенциальной застройки. В зависимости от наличия протеста существующих жителей органы власти выносят окончательное решение об утверждении либо отклонении проекта и в случае положительного решения происходит застраивание новых территорий и расширение города.

Рисунок 3. Концептуальная модель расширения города (Большой Торонто)

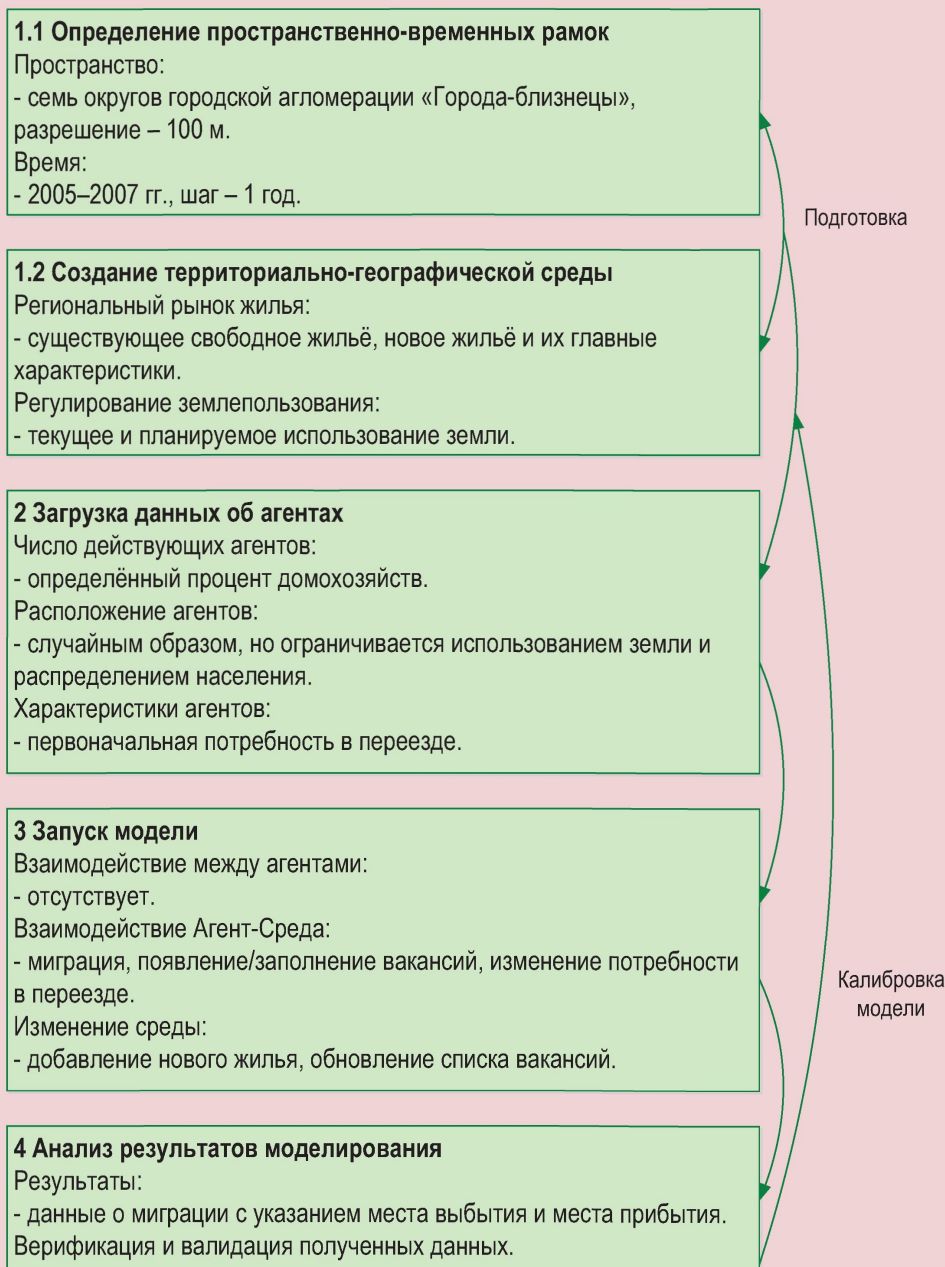


Источник: Rui Y., Ban Y. Multi-agent Simulation for Modeling Urban Sprawl In the Greater Toronto Area // Proc. of the 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science. – Guimarães (Portugal), 2010. – URL: https://agile-online.org/Conference_Paper/CDs/agile_2010/ShortPapers_PDF/124_DOC.pdf (перевод автора).

Модель внутригородской миграции. Агент-ориентированному моделированию основной причины расширения городов – внутригородской миграции – посвящена работа американских учёных *S. Sun* и *S. M. Manson* [34]. Главными агентами в модели являются домашние хозяйства, создающие спрос на рынке недвижимости, застройщики, формирующие предложение нового жилья, и органы власти, регулирующие использование земель. Процесс моделирова-

ния внутригородской миграции проводится авторами в четыре этапа: 1) определение характеристик среды и пространственно-временных рамок, 2) загрузка данных об агентах, 3) запуск модели, 4) анализ результатов моделирования (рис. 4). Модель откалибрована и верифицирована на реальных данных по столичной агломерации штата Миннесота, которую образуют так называемые Города-близнецы: Миннеаполис и примыкающий к нему Сент-Пол.

Рисунок 4. Основные этапы моделирования внутригородской миграции (Города-близнецы)



Источник Sun S., Manson M. Simple Agents, Emergent City: Agent-Based Modeling of Intraurban Migration // Computational Approaches for Urban Environments. – Berlin: Springer, 2015. – Pp. 123-147 (перевод автора).

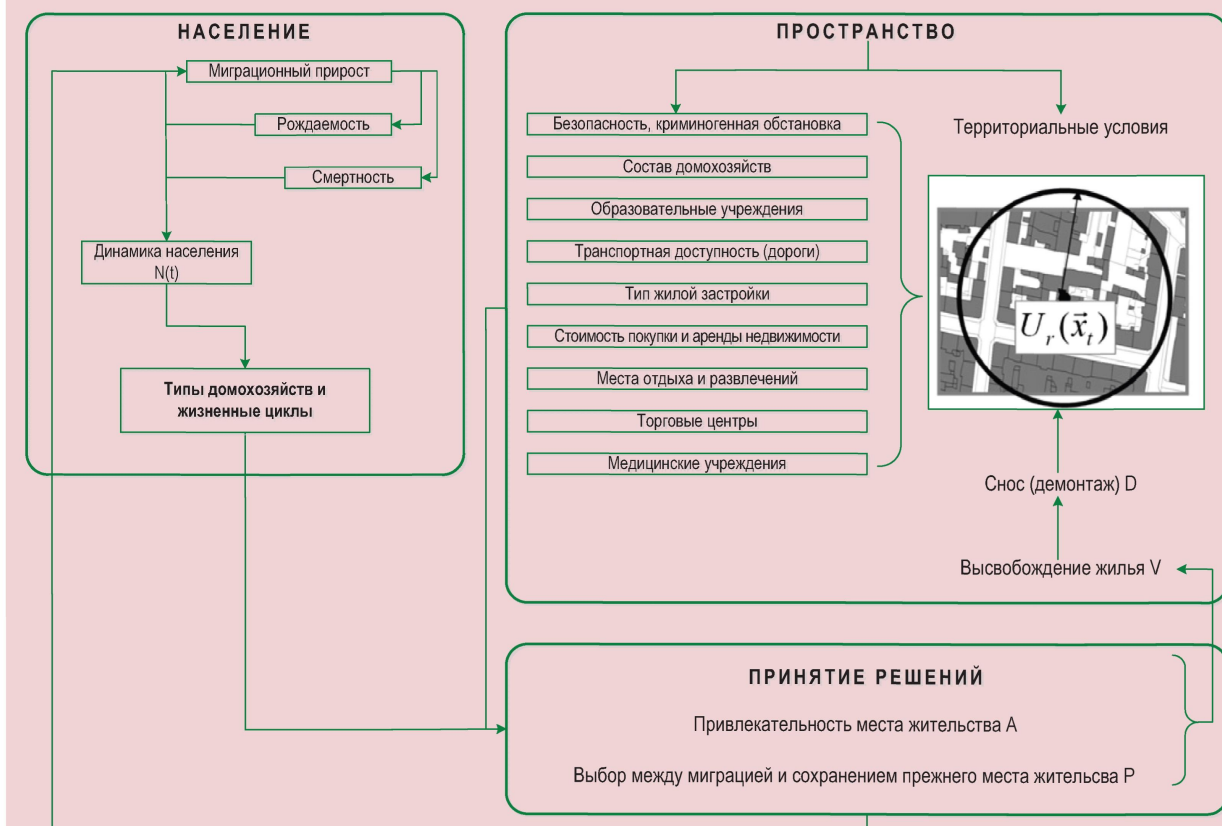
Модель сокращения города. Обратный процесс — сокращение города — рассматривается в работе немецких исследователей *D. Haase, S. Lautenbach* и *R. Seppelt* [24], которые использовали агент-ориентированное моделирование для изучения миграции и землепользования в городе Лейпциг. Компьютерная агент-ориентированная модель сокращения города, названная авторами RESMOVcity, основана на концептуальной модели (рис. 5), состоящей из трёх блоков:

1. Блок «Население»: динамика населения определяется миграционным приростом, рождаемостью и смертностью и, в свою очередь, влияет на типы домохозяйств и жизненные циклы.

2. Блок «Пространство»: каждая точка городского пространства, кроме её территориальной принадлежности, описывается целым набором характеристик, отражающих условия проживания в данном месте: это безопасность, криминогенная обстановка, состав домохозяйств, имеющиеся образовательные и медицинские учреждения, торговые центры, места отдыха и развлечений, транспортная доступность (дороги), тип жилой застройки, стоимость покупки и аренды недвижимости.

3. Блок «Принятие решений»: каждое домохозяйство осуществляет оценку привлекательности места жительства, а также выбор между переселением и сохранением прежнего места жительства.

Рисунок 5. Концептуальная модель сокращения города (Лейпциг)



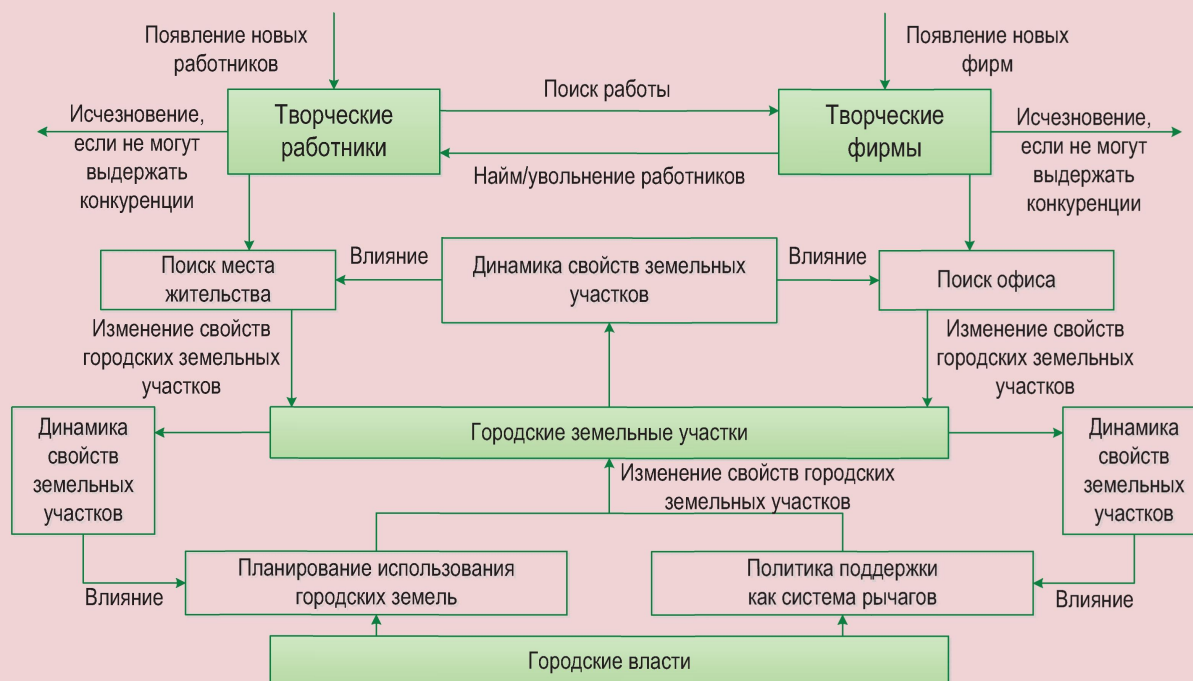
Источник: Haase D., Lautenbach S., Seppelt R. Modeling and simulating residential mobility in a shrinking city using an agent-based approach // Environ. Model. Softw. – 2010. – No. 25. – Pp. 1225-1240 (перевод автора).

В результате переселения домохозяйств в городе происходит высвобождение жилья, имеющего наименьшую привлекательность, и в случае его длительной невостребованности (более 5 лет) — снос.

Модель взаимосвязанного развития творческой индустрии и пространственной структуры города. Учёные Кембриджского университета *H. Liu* и *E. A. Silva* [28, 29] разработали агент-ориентированную модель взаимосвязи развития творческой индустрии и пространственной структуры города. Агент-ориентированная модель реализована авторами в NetLogo в виде компьютерной модели под названием CID-USST и апробирована на данных китайского города Нанкин. Модель содержит три типа агентов: творческие фирмы, творческие работники и городские власти (рис. 6).

Фирмы могут появляться и исчезать, нанимать работников и увеличивать штат или увольнять работников и сокращать штат, переезжать из одного офиса в другой. Творческие работники могут также появляться и исчезать, менять место жительства. Городские власти отвечают за планирование использования городских земель и могут осуществлять политику поддержки как отдельных фирм, так и некоторых городских районов, принимая или отменяя политические решения относительно использования земли в городе. Каждый земельный участок в модели характеризуется набором свойств, включающим: местоположение, тип землепользования, рельеф местности, пригодность для использования, район города, качество застройки и др. Некоторые из этих свойств могут изменяться в зависи-

Рисунок 6. Концептуальная модель взаимосвязанного развития творческой индустрии и пространственной структуры города (Нанкин)



Источник: Liu H., Silva E. A. Creative industries urban model: structure and functioning / H. Liu, // Urban Design and Planning. – 2015. – Vol. 168 (2). – Pp. 88-100 (перевод автора).

мости от действий агентов, и, наоборот, динамика свойств земельных участков оказывает влияние на действия агентов в модели.

В завершение обзора зарубежного опыта отметим, что описанные модели не исчерпывают всего многообразия агент-ориентированных моделей мезоуровня, разработанных за рубежом¹, однако именно они, на наш взгляд, являются наиболее интересными и хорошо проработанными, о чём свидетельствует их подробное описание в проанализированных нами статьях. Кроме того, нацеленность большинства разработчиков на практическое применение построенных моделей и использование реальных статистических данных по муниципалитетам задаёт хорошие перспективы дальнейшего развития моделей при условии качественной калибровки и валидации.

Так, отвечая на вопрос, обозначенный в названии своей статьи «Насколько хороши агент-ориентированные модели для имитации индивидов и пространства в городах?», *A. Heppenstall, N. Malleson и A. Crooks* [26] приходят к выводу, что, хотя агент-ориентированное моделирование городов благодаря «спуску» до микроуровня и большей детализации и привело к более глубокому пониманию и осмыслению внутригородских процессов и городской динамики, тем не менее остаётся ряд нерешённых проблем, связанных с калибровкой и валидацией агент-ориентированных моделей, моделированием индивидуального поведения, качеством исходных данных и т.п. Резюмируя свои рассуждения, авторы указывают на большой потенциал агент-ориентированного моделирования как метода имитации городского развития, отмечая, что решение выделенных проблем

принципиально важно, если в перспективе агент-ориентированное моделирование будет применяться на практике для помощи управленцам в создании устойчивых и «умных» городов.

II. Обзор российского опыта

В России агент-ориентированное моделирование начало развиваться несколько позже, чем за рубежом, и пока не получило такого широкого распространения. По этой причине число разработанных в нашей стране агент-ориентированных моделей в разы меньше, а агент-ориентированных моделей сложных социально-экономических систем мезоуровня совсем мало. Однако приятно отметить, что, несмотря на это и сравнительно небольшой опыт агент-ориентированного моделирования, качество разработанных моделей очень высокое. В первую очередь это является заслугой сотрудников Центрального экономико-математического института РАН, которые активно развивают данное направление в России. К настоящему времени специалистами ЦЭМИ РАН разработаны:

- комплексная агент-ориентированная модель социально-экономического развития мегаполисов [15];
- мультиагентная модель муниципальных образований в составе региона [7];
- демографическая модель условного региона [6];
- агент-ориентированная региональная модель «Губернатор» [14];
- агент-ориентированная демографическая модель «Россия» [8] и другие модели.

Накопленный опыт агент-ориентированного моделирования обобщён исследователями в двух монографиях: «Агент-ориентированные модели экономики» [2] и «Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели)» [10]. Рассмотрим подробнее модели мезоуровня.

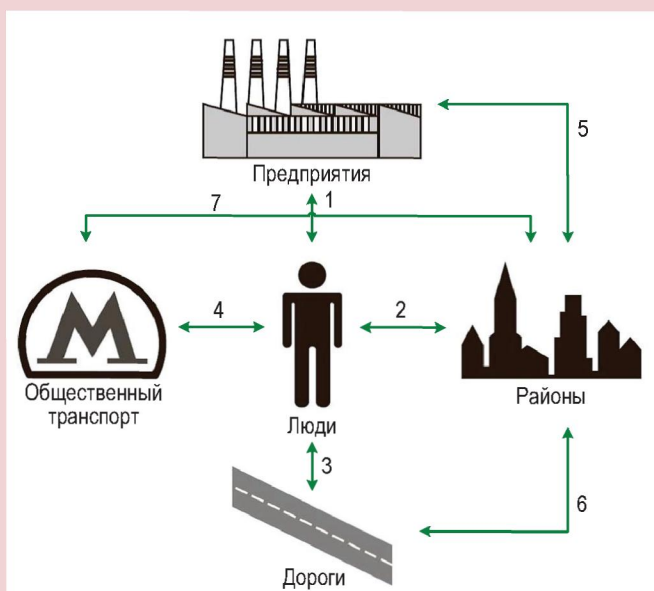
¹ Подробное описание некоторых других моделей можно найти в сборнике: *Agent-Based Models of Geographical Systems* / A.J. Heppenstall et al. (eds.). — Springer Science+Business Media B.V., 2012. — 759 p.

Модели социально-экономического развития городов. Комплексная агент-ориентированная модель социально-экономического развития мегаполисов [15], разработанная *М.Р. Фаттаховым*, получила название CABMUD (Complex Agent-Based Model of Urban Development). Она состоит из 5 блоков: два типа агентов и три типа среды (*рис. 7*). Основными агентами в модели являются люди — жители мегаполиса, а также городские предприятия и организации. В качестве среды модели выступают районы города и находящиеся в них дороги общего пользования и линии общественного транспорта. В процессе работы модели агенты-люди взаимодействуют с другим видом агентов — предприятиями (тип связи агент-агент), т.е. они либо уже работают и получают ежемесячный доход, либо находятся на бирже труда и ищут работу. Проживая в районах города, они взаи-

модействуют со средой модели (тип связи агент-среда). Здесь они оплачивают стоимость проживания (платежи ЖКХ, арендная плата).

Агенты могут изменять район проживания исходя из своих предпочтений или текущего финансового положения. Перемещаясь между домом и работой, агенты-люди взаимодействуют с еще двумя видами среды — дорогами общего пользования и общественным транспортом. От выбора типа транспорта зависят величина ежемесячных расходов и время, проведенное агентами в пути. Характеристиками данного типа агентов являются: возраст, память, денежный баланс, размер ежемесячного дохода, район проживания, район работы, время начала рабочего дня, размер ежемесячных транспортных расходов, наличие или отсутствие личного транспортного средства. При этом агенты-люди

Рисунок 7. Концептуальная схема агент-ориентированной модели развития мегаполиса (Москва)



Условные обозначения: 1 — взаимодействие между агентами: люди работают на предприятиях и получают заработную плату или осуществляют поиск работы; 2 — взаимодействие со средой: агенты-люди проживают в районах города; 3 — взаимодействие со средой: агенты-люди передвигаются по дорогам общего пользования; 4 — взаимодействие со средой: агенты-люди пользуются общественным транспортом; 5 — взаимодействие со средой: агенты-предприятия, находящиеся в районах города, вносят ежемесячную арендную плату; 6 — реализация принципа иерархического построения среды: дороги общего пользования располагаются в районах города; 7 — реализация принципа иерархического построения среды: линии общественного транспорта проходят по районам города.

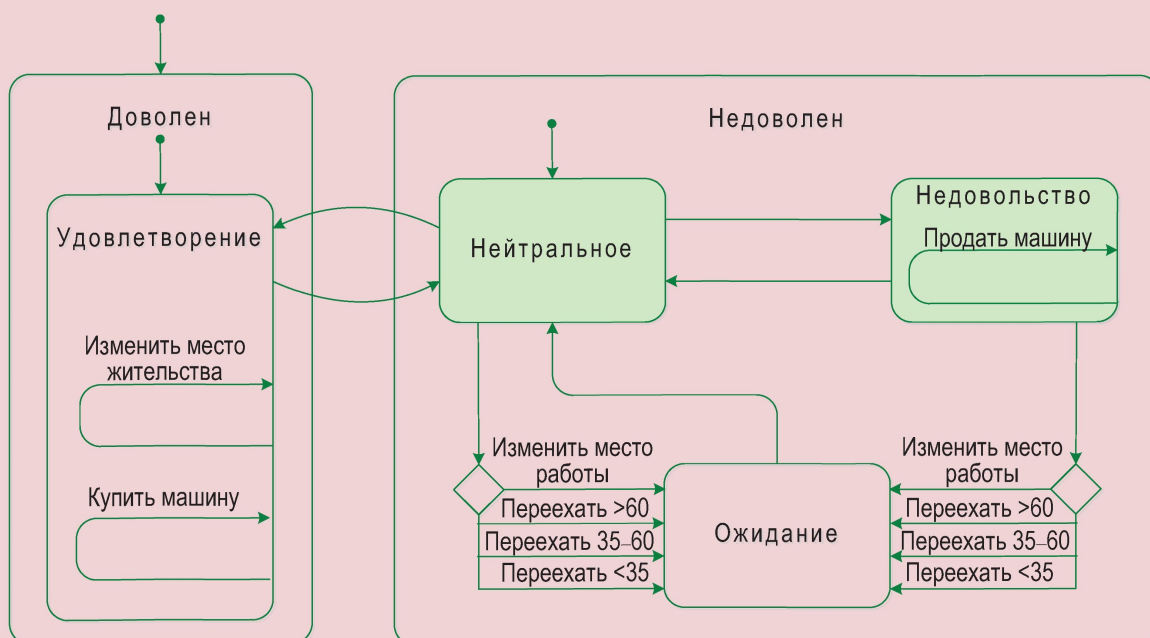
Источник: Фаттахов М.Р. Агентно-ориентированная модель социально-экономического развития Москвы // Экономика и математические методы. — 2013. — №2. — С. 30-42.

могут находиться в одном из четырёх состояний: удовлетворения, нейтральном, недовольства и в состоянии ожидания (рис. 8). Построенная исследователем модель CABMUD позволяет разрабатывать долгосрочный прогноз и сценарии социально-экономического развития города с учетом уровня комфортности проживания людей, а также получать количественную оценку результатов управленческих решений. Модель апробирована на примере г. Москвы [16] и показала хорошие результаты.

В настоящее время специалистами ЦЭМИ РАН совместно с коллегами из Северо-Западного института управления РАНХиГС разрабатывается крупномасштабная агент-ориентированная модель социальной системы «северной столицы» – Санкт-Петербурга [9, с. 23].

Модели муниципальных образований. Отдельного внимания заслуживает агент-ориентированная модель муниципального образования, разработанная Е.Д. Сушко [7]. В ней функционируют два типа агентов: агенты-физические лица (жители муниципального образования) и агенты-юридические лица (предприятия и организации, действующие на территории муниципального образования). Агенты-организации разделяются ещё на две категории: предприятия реального сектора и организации социальной сферы. Автором реализован принцип иерархического построения модели: агенты-физические лица считаются агентами первого уровня иерархии, а предприятия и организации, на которых работают жители муниципального образования, – агентами второго уровня. Сами муниципальные образования при моделировании

Рисунок 8. Состояния агентов-людей в модели CABMUD



Источник: Фаттахов М.Р. Агент-ориентированная модель социально-экономического развития Москвы // Экономика и математические методы. – 2013. – №2. – С. 30-42.

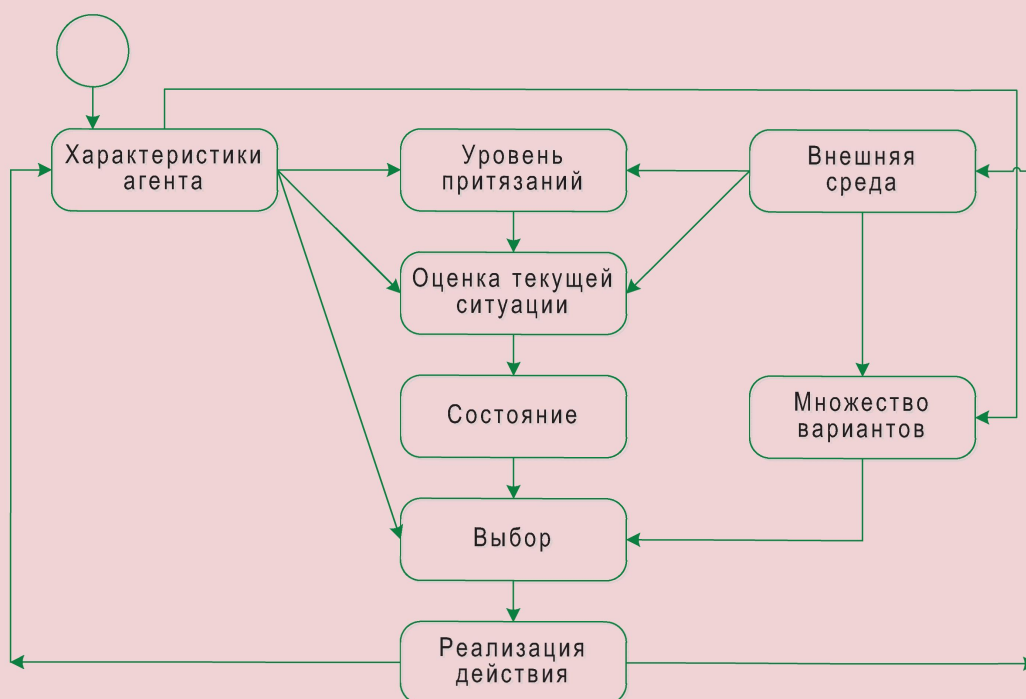
региона станут агентами третьего уровня иерархии. Причём агенты одного уровня в модели напрямую не взаимодействуют друг с другом.

Каждый агент в модели обладает определённым набором индивидуальных характеристик. Для агентов первого уровня такими характеристиками будут уровень образования и здоровья, трудовой стаж и т.п. Основными характеристиками агентов второго уровня являются основные фонды, располагаемые финансовые средства, трудовой потенциал работников и т.д. На состояние агентов в модели влияют многочисленные условия внешней среды.

Поведение агентов обоих типов обуславливается их «системой ценностей»

(предпочтений) и имитируется на основе целевых функций. Агенты-люди, работающие на предприятиях и организациях муниципального образования, анализируют доступную им информацию о внешней среде и собственном положении в ней и в соответствии со своей системой ценностей переходят, как и в описанной выше модели *М.Р. Фаттахова*, в одно из трёх состояний, которые названы автором «нормальное», «недовольство» и «критическое». Нормальное является стартовым состоянием агентов в модели, а критическое сигнализирует о необходимости безотлагательных действий для изменения ситуации. Общая схема поведения агента в модели представлена на *рисунке 9*.

Рисунок 9. Схема поведения агента в модели муниципального образования



Источник: Сушко Е.Д. Мультиагентная модель региона: концепция, конструкция и реализация: препринт # WP/2012/292. – М.: ЦЭМИ РАН, 2012. – 54 с.

Агент-ориентированная модель апробирована на примере муниципальных районов Вологодской области с привязкой к её карте и реализована исследователем в виде пользовательского программного продукта, разработанного в системе имитационного моделирования AnyLogic², выпускаемой российской компанией «The AnyLogic Company», ранее известной как «XJ Technologies». Важно подчеркнуть, что компьютерная модель ориентирована на практическое применение в управленческой деятельности и даёт возможность апробации различных стратегий управления доходами и расходами бюджетов муниципальных образований. Апробация осуществляется путём изменения управляемых параметров модели, в частности бюджетных расходов на отрасли социальной сферы и налогового бремени.

Приятно отметить, что, наряду со статистическими данными Федеральной службы государственной статистики, информационной базой для построения компьютерной агент-ориентированной модели муниципальных образований Вологодской области послужили социологические данные ИСЭРТ РАН, представленные в монографии «Местное самоуправление в региональном развитии» [1], и что при конструировании модели использовался методологический подход к оценке трудового потенциала, описанный в монографии «Трудовой потенциал региона» [5].

Родственной данной модели по концепции и предназначению можно назвать мультиагентную имитационную модель муниципального образования, разработан-

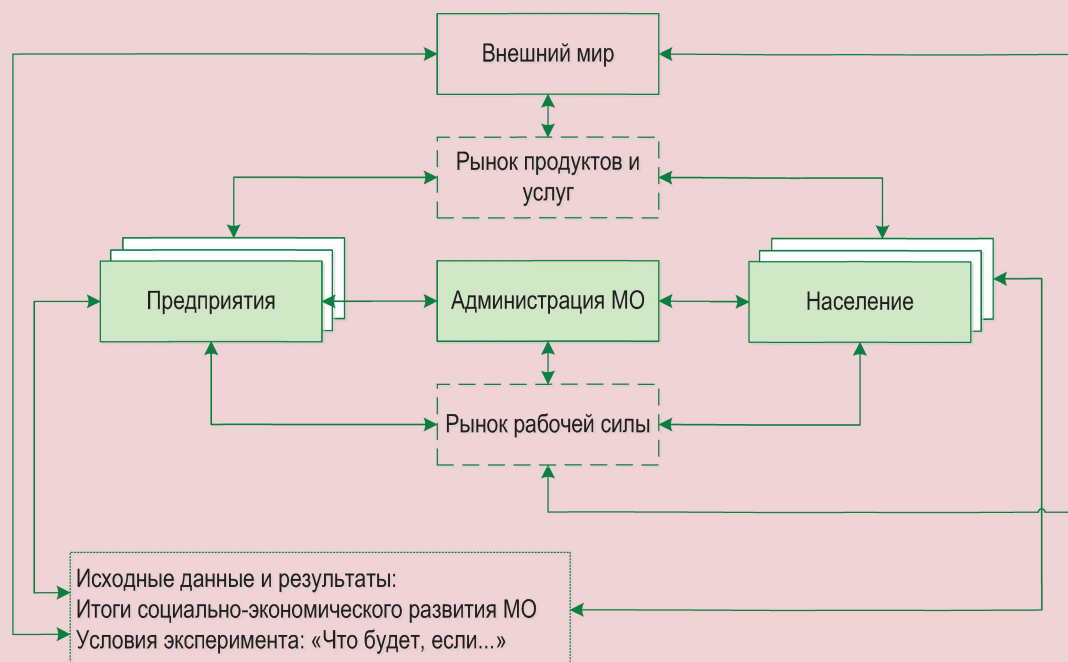
ную коллективом екатеринбургских учёных во главе с *Н.А. Бегуновым* [3]. Авторы считают актуальным использование управленцами автоматизированных систем поддержки принятия решений, разработанных на основе мультиагентных имитационных моделей муниципальных образований, и придерживаются мнения, что такая система способна стать инструментом комплексного анализа и прогноза социально-экономического развития муниципального образования, позволяя апробировать реализацию тех или иных проектов, оценивать их потенциальное влияние на качество жизни населения [12]. Концептуальная модель муниципального образования упрощённо представлена на *рисунке 10*.

По словам разработчиков, в модели рассматриваются следующие типы агентов муниципального образования и его окружения: предприятия двух видов (промышленные и сферы услуг), население муниципального образования, рынок рабочей силы, рынок товаров и услуг, жилой фонд и бюджет муниципального образования, а также федеральный и региональный бюджеты [4]. Причём модель поведения каждого экономического агента включает в себя две модели — жизненного цикла и поведения на конкретных этапах развития.

Развитие и усовершенствование построенной агент-ориентированной модели позволило авторам разработать и предложить управленцам онлайн-сервис прогнозирования развития экономико-социальных процессов территориальных образований [11]. По мнению авторов, разработанный сервис, центральным звеном которого стала агент-ориентированная модель, может использоваться в проведении оптимизаци-

² Официальный сайт продукта: <http://www.anylogic.ru/>

Рисунок 10. Концептуальная модель муниципального образования



Источник: Мультиагентная имитационная модель муниципального образования / Б.И. Клебанов, И.М. Москалёв, Н.А. Бегунов, А.В. Крицкий // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2007): сборник докладов III Всерос. науч.-практ. конф., г. Санкт-Петербург, 17–19 октября 2007 г. – СПб.: ЦНИИТС, 2007 – Т.2. – С. 86–90.

онных экспериментов, оценке стратегических проектов, ситуационном моделировании и в коллективной работе по поиску и принятию оптимальных управленческих решений.

Таким образом, накопленный к настоящему времени отечественный и зарубежный опыт агент-ориентированного моделирования сложных социально-экономических систем мезоуровня заключается преимущественно в моделировании социально-экономического и пространственно-территориального развития городов, городских агломераций, пригородных районов и других муниципальных образований. Основными агентами, действующими в моделях, чаще всего являются жители муниципального образования или домашние

хозяйства, предприятия и организации, работающие на территории муниципального образования, в том числе отдельные их виды, например строительные фирмы, а также органы власти.

Наличие в моделях такого специфического агента, как администрация муниципального образования, даёт возможность использования их для апробации различных вариантов управленческих воздействий на территории муниципального образования за счёт изменения управляемых параметров модели, например регулирования распределения бюджетных расходов, налогов, введения отдельных запретов или выдачи разрешений (например, на строительство), грантовой и иной поддержки хозяйствующих субъектов.

В то же время обзор зарубежных и отечественных публикаций, посвящённых агент-ориентированному моделированию социального-экономических процессов мезоуровня, позволяет сделать вывод о наличии существенных проблем, затрудняющих внедрение агент-ориентированных моделей на современном этапе их развития в практику государственного муниципального управления.

Первая проблема заключается в недостаточной теоретико-методологической разработанности самого метода агент-ориентированного моделирования, в частности, существуют значительные трудности, связанные с калибровкой, верификацией и валидацией построенных моделей. Об этом говорят и российские, и зарубежные специалисты. Решение данной проблемы возможно, на наш взгляд, путём разработки алгоритмов калибровки агент-ориентированных моделей, инструкций или рекомендаций по их верификации и валидации. Однако всё это требует консолидации усилий научного сообщества, значительных трудовых и временных затрат.

Вторая проблема состоит в потребности наполнения агент-ориентированных моделей реальными данными. Вследствие этого возникает необходимость сбора репрезентативных данных об агентах микроуровня.

Частично эту проблему можно решить за счёт использования социологических опросов. Однако методика социологических измерений должна обеспечивать сопоставимость данных на различных уровнях моделирования и возможность воплощения иерархического принципа построения моделей.

Третье препятствие на пути внедрения агент-ориентированных моделей в практику муниципального управления представляет человеческий фактор. Необходимо обеспечить доведение до органов власти информации о возможностях и перспективах агент-ориентированного моделирования социально-экономических систем и целесообразности его использования при принятии управленческих решений и выборе оптимальных стратегий государственного управления.

Тем не менее, как нам видится, все перечисленные проблемы решаемы и при наличии политической воли компьютерные агент-ориентированные модели в ближайшем будущем вполне могут войти в практику государственного управления и стать своеобразными когнитивными советниками, способными значительно увеличить эффективность управления на любом уровне, начиная с муниципального.

Литература

1. Амелин, Д.Е. Местное самоуправление в региональном развитии [Текст] / Д.Е. Амелин. — Вологда: ВНКЦ ЦЭМИ РАН, 2006. — 182 с.
2. Бахтизин, А.Р. Агент-ориентированные модели экономики [Текст] / А.Р. Бахтизин. — М.: Экономика, 2008. — 279 с.
3. Бегунов, Н.А. Моделирование развития муниципальных образований на основе агентного подхода [Текст] / Н.А. Бегунов // Современные исследования социальных проблем: электронный научный журнал. — 2011. — №4. — С. 1-18. — URL: <http://sisp.nkras.ru/issues/2011/4/begunov.pdf>
4. Бегунов, Н.А. Имитационное моделирование социально-экономического развития города [Текст] / Н.А. Бегунов, Б.И. Клебанов, Е.В. Попов // Журнал экономической теории. — 2010. — №4. — С. 180-183.
5. Гулин, К.А. Трудовой потенциал региона [Текст] / К.А. Гулин, А.А. Шабунова, Е.А. Чекмарева. — Вологда: ИСЭРТ РАН, 2009. — 84 с.

6. Макаров, В.Л. Имитация особенностей репродуктивного поведения населения в агент-ориентированной модели региона [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко // Экономика региона. — 2015. — №3. — С. 313-322.
7. Макаров, В.Л. Компьютерное моделирование взаимодействия между муниципалитетами, регионами, органами государственного управления [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко // Проблемы управления. — 2013. — №6. — С. 31-40.
8. 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/?ID=278>.
9. Макаров, В.Л. Современные методы прогнозирования последствий управленческих решений [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин // Управленческое консультирование. — 2015. — №7. — С. 12-24.
10. Макаров, В.Л. Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели) [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин. — М.: Экономика, 2013. — 295 с.
11. Москалёв, И.М. Сервис прогнозирования развития экономико-социальных процессов территориальных образований [Текст] / И.М. Москалёв, Н.А. Бегунов // Научное обозрение: экономика и управление. — 2012. — №4. — С. 69-76.
12. Мультиагентная имитационная модель муниципального образования [Текст] / Б.И. Клебанов, И.М. Москалёв, Н.А. Бегунов, А.В. Крицкий // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2007): сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции, г. Санкт-Петербург, 17–19 октября 2007 г. — СПб.: ЦНИИТС, 2007. — Т. 2. — С. 86-90.
13. Мусаев, А. Тихая когнитивная революция [Текст] / А. Мусаев, А. Шевчик // Эксперт. — 2016. — №4. — С. 45-51.
14. Сушко, Е.Д. Мультиагентная модель региона: концепция, конструкция и реализация [Текст] / Е.Д. Сушко: препринт # WP/2012/292. — М.: ЦЭМИ РАН, 2012. — 54 с.
15. Фаттахов, М.Р. Агент-ориентированная модель социально-экономического развития мегаполисов [Текст] / М. Р. Фаттахов: автореф. дис. на соиск. уч. ст. к.э.н. : 08.00.13. — М., 2011. — 30 с.
16. Фаттахов, М.Р. Агент-ориентированная модель социально-экономического развития Москвы [Текст] / М. Р. Фаттахов // Экономика и математические методы. — 2013. — №2. — С. 30-42.
17. Agent-Based Models of Geographical Systems / A.J. Heppenstall et al. (eds.). — Springer Science+Business Media B.V., 2012. — 759 p.
18. Batty, M. Agents, cells, and cities: new representational models for simulating multiscale urban dynamics / M. Batty // Environment and Planning. — 2005. — Vol. 37. — Pp. 1373-1394.
19. Batty, M. Fifty Years of Urban Modelling: Macro Statics to Micro Dynamics / M. Batty // The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach/ — Heidelberg: Physica-Verlag, 2008. — Pp. 1-20.
20. Batty, M. Urban Modeling / M. Batty // International Encyclopedia of Human Geography. — Oxford: Elsevier, 2009. — Pp. 51-58.
21. 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.
22. Deguchi, H. Virtual Economy Simulation and Gaming — An Agent Based Approach / H. Deguchi, T. Terano, K. Kurumatani, T. Yuzawa, S. Hashimoto, H. Matsui, A. Sashima, T. Kaneda // JSAI 2001 Workshops, LNAI 2253 — Pp. 218-226.
23. Deissenberg, C. EURACE: A massively parallel agent-based model of the European economy / C. Deissenberg, S. Hoog, H. Dawid // Applied Mathematics and Computation. — 2008. — 204. — Pp. 541-552.
24. 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.
25. Heath, B. A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008) / B. Heath, R. Hill, F. Ciarallo // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. — 2009. — No. 12 (4) 9. — Pp. 1-35.
26. Heppenstall, A. “Space, the Final Frontier”: How Good are Agent-based Models at Simulating Individuals and Space in Cities? / A. Heppenstall, N. Malleson, A.T. Crooks // Systems. — 2016. — No. 4 (1) 9. — URL: <http://www.mdpi.com/2079-8954/4/1/9/pdf/>
27. Legendi, R. Replication of the MacroABM Model: Replication Issues in the Context of Economic Agents / R. O. Legendi, L. Gulyás // 17th Annual Workshop on Economic Heterogeneous Interacting Agents, WEHIA 2012, June 21-23 in Paris, France. — 15 p.

28. Liu, H. Creative industries urban model: structure and functioning / H. Liu, E. A. Silva // *Urban Design and Planning*. – 2015. – Vol. 168 (2). – Pp. 88-100.
29. Liu, H. Simulating the Dynamics Between the Development of Creative Industries and Urban Spatial Structure: An Agent-Based Model / H. Liu, E. A. Silva // *Planning Support Systems for Sustainable Urban Development*. Springer, Berlin, Germany, 2013. – Pp. 51-72.
30. 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.
31. Modelling Complexity of Economic System with Multi-Agent Systems / P. Čech, P. Tučník, V. Bureš, M. Husáková // *5th International Conference on Knowledge Management and Information Sharing (KMIS 13)*, Vilamoura, Algarve, Portugal, 19-22 Sept. 2013. – Pp. 464-469.
32. 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.
33. 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*. – Guimarães (Portugal), 2010. – URL: https://agile-online.org/Conference_Paper/CDs/agile_2010/ShortPapers_PDF/124_DOC.pdf
34. 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

Елена Андреевна Чекмарева — кандидат экономических наук, научный сотрудник, Институт социально-экономического развития территорий Российской академии наук (160014, Россия, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а, miteneva@inbox.ru)

© Chekmareva E.A.

Overview of the Russian and Foreign Experience of Agent-Based Modeling of Complex Socio-Economic Systems of the Meso-Level

Elena Andreevna Chekmareva - Ph.D. in Economics, Research Associate, Institute of Socio-Economic Development of Territories of Russian Academy of Science (56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation, miteneva@inbox.ru)

Abstract. The paper presents an overview of the agent-oriented models of complex socio-economic systems of the meso-level developed by Russian and foreign scientists. It considers agent-oriented models of municipalities: cities, urban agglomerations, suburban areas, etc. When choosing models for the review, preference was given to municipal level models that have a detailed description of agents, their behavior and rules of interaction accompanied by a visual diagram of the conceptual model. However, the important criterion was the availability of information about the testing of the constructed model on the actual data for a specific municipality. Foreign experience of application of the agent-oriented approach to the study of socio-economic systems of the meso-level is disclosed on the example of the models of municipalities that are the most interesting and promising from our point of view: these models are models of the virtual economy of the city, the model of interrelated markets for housing and land, the models of expansion of the city area, the models of reducing the city, the model of intra-city migration, the models of interconnected development of creative industries and spatial structure of the city. The author also considers the experience of Russian scientists in this field presented in scientific publications on the current models of socio-economic development of cities and municipal areas. The main agents acting within each model, the environment

of their functioning, and the rules of interaction between themselves and with the external environment are described. The author presents conceptual models of interaction between the agents. The paper shows possibilities and examples of practical application of the described agent-based models.

Key words: agent, agent-based model, review, meso-level, municipal formations.

References

1. Amelin D.E. *Mestnoe samoupravlenie v regional'nom razvitii* [Local Government in Regional Development]. Vologda: VNKTs TsEMI RAN, 2006. 182 p.
2. Bakhtizin A.R. *Agent-orientirovannye modeli ekonomiki* [Agent-Based Models of Economy]. Moscow: Ekonomika, 2008. 279 p.
3. Begunov N.A. Modelirovanie razvitiya munitsipal'nykh obrazovaniy na osnove agentnogo podkhoda [Modeling the Development of Municipalities Based on the Agent Approach]. *Sovremennye issledovaniya sotsial'nykh problem: elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Modern Research into Social Issues: Scientific Electronic Journal], 2011, no. 4, pp. 1-18. Available at: <http://sisp.nkras.ru/issues/2011/4/begunov.pdf>
4. Begunov N.A., Klebanov B.I., Popov E.V. Imitatsionnoe modelirovanie sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya goroda [Simulation Modeling of Socio-Economic Development of the City]. *Zhurnal ekonomicheskoi teorii* [The Journal of Economic Theory], 2010, no. 4, pp. 180-183.
5. Gulina K.A., Shabunova A.A., Chekmareva E.A. *Trudovoi potentsial regiona* [Labor Potential of the Region]. Vologda: ISERT RAN, 2009. 84 p.
6. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. Imitatsiya osobennostei reproduktivnogo povedeniya naseleniya v agent-orientirovannoi modeli regiona [Simulating the Reproductive Behavior of a Region's Population with an Agent-Based Model]. *Ekonomika regiona* [Economy of the Region], 2015, no. 3, pp. 313-322.
7. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. Komp'yuternoe modelirovanie vzaimodeistviya mezhdu munitsipalitetami, regionami, organami gosudarstvennogo upravleniya [Computer-Based Simulation of Interaction between Municipalities, Regions, and Bodies of Public Administration]. *Problemy upravleniya* [Management Issues], 2013, no. 6, pp. 31-40.
8. 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/?ID=278>.
9. Makarov V.L., Bakhtizin A.R. Sovremennye 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.
10. Makarov V.L., Bakhtizin A.R. *Sotsial'noe modelirovanie – novyi komp'yuternyi proryv (agent-orientirovannye modeli)* [Social Simulation – a new Computer-Based Breakthrough (Agent-Oriented Models)]. Moscow: Ekonomika, 2013. 295 p.
11. Moskaev I.M., Begunov N.A. Servis prognozirovaniya razvitiya ekonomiko-sotsial'nykh protsessov territorial'nykh obrazovaniy [Service of Forecasting of Development of Economic and Social Processes of Territorial Entities]. *Nauchnoe obozrenie: ekonomika i upravlenie* [Science Review: Economics and Management], 2012, no. 4, pp. 69-76.
12. Klebanov B.I., Moskaev I.M., Begunov N.A., Kritskii A.V. Mul'tiagentnaya imitatsionnaya model' munitsipal'nogo obrazovaniya [Multi-Agent Simulation Model for a Municipal Formation]. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD-2007): sbornik dokladov III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Sankt-Peterburg, 17–19 oktyabrya 2007 g.* [Simulation Modeling. Theory and Practice (IMMOD-2007): Collection of Reports of the Third All-Russian Research-to-Practice Conference, Saint Petersburg, October 17–19, 2007]. Saint Petersburg: TsNIITS, 2007. Vol. 2. Pp. 86-90.
13. Musaev A., Shevchik A. Tikhaya kognitivnaya revolyutsiya [A Quiet Cognitive Revolution]. *Ekspert* [Expert], 2016, no. 4, pp. 45-51.
14. Sushko E.D. *Mul'tiagentnaya model' regiona: kontseptsiya, konstruktsiya i realizatsiya: Preprint # WP/2012/292* [Multi-Agent Model of the Region: Concept, Design, and Implementation: Preprint # WP/2012/292]. Moscow: TsEMI RAN, 2012. 54 p.

15. Fattakhov M.R. *Agent-orientirovannaya model' sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya megapolisov: avtoref. dis. na soisk. uch. st. k.e.n.: 08.00.13* [The Agent-Based Model of Socio-Economic Development of Megapolises: Ph.D. in Economics Dissertation Abstract]. Moscow, 2011. 30 p.
16. Fattakhov M.R. *Agento-orientirovannaya model' sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Moskvy* [Agent-Based Model for Socio-Economic Development of Moscow]. *Ekonomika i matematicheskie metody* [Economics and Mathematical Methods], 2013, no. 2, pp. 30-42.
17. *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Ed. by A.J. Heppenstall et al. Springer Science+Business Media B.V., 2012. 759 p.
18. Batty M. Agents, Cells, and Cities: New Representational Models for Simulating Multiscale Urban Dynamics. *Environment and Planning*, 2005, vol. 37, pp. 1373-1394.
19. Batty M. Fifty Years of Urban Modelling: Macro Statics to Micro Dynamics. *The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach*. Heidelberg: Physica-Verlag, 2008. Pp. 1-20.
20. Batty M. Urban Modeling. *International Encyclopedia of Human Geography*. Oxford: Elsevier, 2009. Pp. 51-58.
21. Bures V., Tucnik P. Complex Agent-Based Models: Application of a Constructivism in the Economic Research. *Economics & Management*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 152-168.
22. Deguchi H., Terano T., Kurumatani K., Yuzawa T., Hashimoto S., Matsui H., Sashima A., Kaneda T. Virtual Economy Simulation and Gaming – An Agent Based Approach. *JSAI 2001 Workshops, LNAI 2253*. Pp. 218-226.
23. Deissenberg C., Hoog S., Dawid H. EURACE: A massively parallel agent-based model of the European economy. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, no. 204, pp. 541-552.
24. 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.
25. 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, pp. 1-35.
26. 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/>
27. Legendi R. O., Gulyás L. Replication of the MacroABM Model: Replication Issues in the Context of Economic Agents. *17th Annual Workshop on Economic Heterogeneous Interacting Agents, WEHIA 2012, June 21-23 in Paris, France*. 15 p.
28. Liu H., Silva E. A. Creative Industries Urban Model: Structure and Functioning. *Urban Design and Planning*, 2015, vol. 168, no. 2, pp. 88-100.
29. Liu H., Silva E. A. Simulating the Dynamics Between the Development of Creative Industries and Urban Spatial Structure: An Agent-Based Model. *Planning Support Systems for Sustainable Urban Development*. Berlin: Springer, 2013. Pp. 51-72.
30. 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.
31. Čech P., Tučník P., Bureš V., Husráková M. Modelling Complexity of Economic System with Multi-Agent Systems. *5th International Conference on Knowledge Management and Information Sharing (KMIS 13), Vilamoura, Algarve, Portugal, September 19-22, 2013*. Pp. 464-469.
32. 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, vol. 20, no. 4, pp. 540-556.
33. 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. – Guimarães (Portugal), 2010*. Available at: https://agile-online.org/Conference_Paper/CDs/agile_2010/ShortPapers_PDF/124_DOC.pdf
34. 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.