

Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.

Агент-ориентированные модели как инструмент апробации управленческих решений*

Макаров Валерий Леонидович

Центральный экономико-математический институт РАН (Москва)
 Директор
 Академик РАН
 Доктор физико-математических наук, кандидат экономических наук, профессор
 makarov@cemi.rssi.ru

Бахтизин Альберт Рауфович

Центральный экономико-математический институт РАН (Москва)
 Заместитель директора по научной работе
 Член-корреспондент РАН
 Доктор экономических наук, профессор
 albert.bakhtizin@gmail.com

Сушко Елена Давидовна

Центральный экономико-математический институт РАН (Москва)
 Ведущий научный сотрудник
 Кандидат экономических наук
 sushko_e@mail.ru

РЕФЕРАТ

В работе показано применение агент-ориентированного подхода при моделировании социо-эколого-экономических процессов, дан обзор наиболее характерных агент-ориентированных моделей (АОМ), разработанных за последние годы для решения практических задач территориального управления. Показана целесообразность использования АОМ как инструмента планирования развития территорий, в том числе стратегического.

Представлена конструкция разработанной авторами территориальной демографической модели, в которой на основе поведения отдельных членов искусственного общества имитируются процессы смертности, рождаемости и миграции. Так, создание новых агентов (рождение детей) в модели является результатом выбора агентов-женщин репродуктивного возраста, и выбор этот зависит от их внутренних установок. При этом популяция агентов в этом отношении неоднородна — часть агентов придерживается современной репродуктивной стратегии (с низкой рождаемостью), а часть — традиционной (с высокой рождаемостью). Миграция агентов обусловлена разницей в уровне среднедушевых доходов как между различными территориями внутри страны, так и между различными странами. При выборе цели миграции большое значение имеют социальные связи агентов.

Представленная конструкция послужила основой создания трех АОМ: 1) модели воспроизводства населения Санкт-Петербурга; 2) модели трудовой миграции из приграничных территорий Китая в Россию; 3) модели внутренней и внешней миграции в странах Европейского союза. Все модели были апробированы в ходе компьютерных экспериментов на реальных данных. Получены предварительные результаты, показавшие адекватную реакцию моделей на изменения управляемых параметров, связанных с экономическими и институциональными характеристиками среды агентов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

агент-ориентированное моделирование, демография, международная миграция, трудовая миграция, прогнозирование численности и структуры населения, территориальное планирование

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-18-10296).

Agent-Based Models as a Means of Testing of Management Solutions

Makarov Valery Leonidovich

The Central economic-mathematical institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)
 Director
 Academician of Russian Academy of Sciences
 Doctor of Physical and mathematical sciences, PhD in Economics, professor
 makarov@cemi.rssi.ru

Bakhtizin Albert Raufovich

The Central economic-mathematical institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)
 Deputy Director for science
 Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences
 Doctor of Science (Economics), Professor of the Russian Academy of Sciences
 albert.bakhtizin@gmail.com

Sushko Elena Davidovna

The Central economic-mathematical institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)
 Leading researcher
 PhD in Economics
 sushko_e@mail.ru

ABSTRACT

The paper shows the application of agent-based approach to modeling of social, ecological and economic processes. An overview of the most typical agent-based model (ABM), developed in recent years to solve practical problems of territorial administration is given. The expediency of using ABM as a development planning tool areas, including strategic, is shown.

A territory-population model developed by the authors is based on the behavior of individual members of artificial society and simulates the processes of mortality, fertility and migration. The creation of new agents (birth of children) in the model is the result of the choice of female agents of reproductive age, and this choice depends on their value system. At the same time the population of agents in this regard is not uniform — agents stick to different reproductive strategies: modern (low fertility), and traditional (high fertility). The migration of agents depends on the difference in the level of per capita income both between different areas within a country and between countries. The migration variants for individual agent depend on it's social ties.

The presented design served as the basis for creating three ABMs: 1) model of reproduction of the population of St. Petersburg; 2) labor migration model from the border areas of China into Russia; 3) model of internal and external migration in the European Union. All models have been tested in the course of computer experiments on real data. Preliminary results show an adequate response to changing patterns of controlled parameters related to the economic and institutional characteristics of the agents of the environment.

KEYWORDS

agent-based modeling, demography, international migration, labor migration, prediction of population size and structure, territory planning

Введение

Разработка стратегии развития того или иного территориального образования включает необходимый этап формирования плана различных мероприятий и проектов, направленных на реализацию этой стратегии. И здесь в первую очередь возникает задача оценки реалистичности достижения целевых показателей при различных вариантах этого плана и с учетом возможных изменений параметров внешней по отношению к этой территориальной единице среды. Второй важной задачей, которую нужно решить разработчикам стратегии, является выбор такого

плана, который бы обеспечивал эффективное (т. е. с наименьшими затратами ресурсов) достижение заявленных целевых показателей. И в том, и в другом случае разработчики стратегии нуждаются в модельном инструменте, который позволил бы проигрывать как различные сценарии изменения внешней среды, так и последствия реализации планируемых управленческих мер для выбора наиболее приемлемого варианта. С учетом того что все планируемые меры взаимосвязаны, а целей и критериев их достижения целое множество, к качеству используемого модельного инструмента предъявляются высокие требования в части его адекватности и гибкости.

Среди современных инструментов моделирования сложных социально-экономических систем наиболее адекватным, т. е. позволяющим добиться максимального правдоподобия, признается активно развивающееся агент-ориентированное моделирование [1–2]. Агент-ориентированная модель (АОМ) представляет собой искусственное общество и способна имитировать поведение большой системы на основе реконструкции ее внутренней структуры, а также структуры и поведения включенных в нее более мелких экономических и социальных акторов. Таким образом, модель демонстрирует динамику социально-экономических характеристик этой системы как результат действий и взаимодействий множества самостоятельных агентов-акторов с учетом их разнообразия. Гибкость такого вычислительного инструмента достигается за счет возможности варьирования большого числа управляемых параметров модели, что позволяет проводить с использованием АОМ самые разнообразные эксперименты, воспроизводя возможные сценарии развития социально-экономической системы и оценивая ее реакцию на те или иные управленческие воздействия.

1. Примеры применения агент-ориентированных моделей для решения практических задач

Агент-ориентированные модели успешно применяются для имитации самых разнообразных процессов, происходящих в социальной жизни, начиная от широкого спектра демографических процессов, таких как образование семейных пар, влияние социальных норм на рождаемость, миграция людей в поисках лучших условий труда и жизни (например [3]), и заканчивая функционированием налоговой системы и влиянием на нее уклонения недобросовестных граждан от уплаты налогов [4; 6].

Для нас важно, что большинство моделей создавалось не только для анализа имитируемых процессов и прогнозирования их изменения при возможных сценариях развития социально-экономической среды, но и для отработки мер, направленных на корректировку возможных состояний среды. То есть эти модели создавались как инструмент, позволяющий в компьютерных экспериментах оценивать влияние имитируемых процессов на изменение общих параметров моделируемой социально-экономической системы для сопоставления последствий различных управляющих воздействий и выбора наиболее приемлемого их сочетания с точки зрения поставленных целей и располагаемых ресурсов.

Рассмотрим типичные примеры применения этого подхода для решения управленческих задач в различных областях.

В работе [17] представлена АОМ экономической жизни нескольких соседних регионов, которая позволяет в комплексе имитировать эволюцию сложных взаимодействий домохозяйств и фирм с учетом их расположения на моделируемой территории и возможных транспортных решений при выборе людьми места жительства или локализации производства фирмами. В модели присутствуют несколько базовых производственных секторов, районы, включенные в более широкие регионы, а также агенты нескольких типов, такие как 1) агенты-домохозяйства;

2) агенты-фирмы; 3) агенты-местные органы власти и 4) агенты-центральные правительства.

Регионы различаются по таким экономическим характеристикам, как стоимость земли, рабочей силы и производственных затрат, а также размеры рынка и спроса. Кроме того, существует явное пространственное представление транспортных связей между регионами, чьи характеристики зависят от конкретной топологии и конфигурации транспортной сети. Отрасли производства отличаются друг от друга значимостью фактора труда и капиталоемкостью, требованиями к квалификации работников и отдачей от масштаба производства.

Поведение агентов направлено на максимизацию собственной функции полезности. Так, агенты-люди максимизируют свой доход, для чего могут выбирать регион-место жительства, регион-место работы и конкретный вид деятельности. А агенты-фирмы максимизируют прибыль, для чего могут выбирать локализацию производства (как распределение инвестиций между регионами) и способ распространения своей продукции (регионы — рынки сбыта).

Агенты-власти разного уровня в пределах своих полномочий могут управлять такими переменными, как ставки различных налогов, а также осуществлять государственные инвестиции, включая инвестиции в развитие транспортной инфраструктуры системы регионов, что, в свою очередь, влияет на решения агентов-людей, касающихся выбора места работы и миграции, а также на решения агентов-фирм. Эти параметры модели являются управляемыми, т. е. меняя в ходе компьютерных экспериментов значения таких показателей, как ставки различных налогов, а также размеры государственных инвестиций, можно апробировать различные варианты налоговой и инвестиционной политики.

В книге «Моделирование и мультиагентные системы для комплексного управления природными ресурсами в Азии» под редакцией Ф. Боскуе, Г. Требуль и Б. Харди [5] отдельная глава посвящена агент-ориентированным моделям, разработанным для имитации и анализа различных процессов, связанных с природопользованием. В частности, в книге представлены:

- Модель *G. Trébuil, F. Bousquet, B. Ekasingh, C. Baron, C. Le Page* для изучения взаимосвязи между диверсификацией сельскохозяйственных культур и риском деградации земель в северном Таиланде [5, р. 167–190].
- Модель *G. Lacombe и W. Naivinit* для анализа зависимости биофизических условий выращивания риса от различных стратегий фермеров в вопросе водопользования [5, р. 191–210].
- Модель *Le Canh Dung, Nguyen Nhi Gia Vinh, Le Anh Tuan и F. Bousquet* для анализа экономических эффектов и рисков при различных пропорциях двух видов сельскохозяйственной деятельности в дельте реки Меконг — выращивании риса и разведения креветок [5, р. 211–236].
- Модель *Sk. Morshed Anwar и F. Borne* для анализа влияния изменений в методах землепользования на ландшафтную эволюцию пригородных сельскохозяйственных систем [5, р. 237–254].
- Модель лесопользования *Ph. Guizol и H. Purnomo*, в которой заинтересованными сторонами являются те, кто выращивает лес на плантации в штате Сабах, и те, кто занимается лесозаготовками и обработкой древесины [5, р. 275–294].

Во всех этих моделях агентами являются люди-жители данных территорий, которые в стремлении максимизировать свои доходы выбирают тот или иной вид (или способ) деятельности, каждый из которых в свою очередь характеризуется определенным уровнем использования основных природных ресурсов. Все модели разработаны на примере конкретных территорий, для экономики которых именно моделируемые процессы являются ключевыми, оказывая в то же время критическое давление на экологию.

Представленные модели позволяют анализировать взаимное влияние социальных процессов и динамики экологических параметров территорий и предназначены для поиска рациональных компромиссов между интересами различных видов деятельности для предотвращения как деградации земель, так и конфликтов между занятыми этими видами деятельности людьми.

Пожалуй, одной из наиболее широко представленных областей применения агент-ориентированного подхода можно назвать моделирование естественного движения населения.

В книге «Агент-ориентированная компьютерная демография: использование моделирования для улучшения понимания демографического поведения» под редакцией Ф. Биллари и А. Прскавец [3] представлены АОМ, посвященные имитации самых различных демографических процессов, начиная от образования семейных пар и влияния социальных норм на рождаемость, и до принятия людьми решений о перемене места жительства.

В работах Сильверман и соавторов [14–15] показана конструкция, а также результаты апробации демографической АОМ, в которой агенты-люди имеют сложную структуру с большим числом состояний, а прогноз демографической динамики, именно благодаря детализации до отдельных членов общества, возможен на различных уровнях — от домашних хозяйств до всего населения Великобритании.

В работе Б. Диаз [7] представлены три АОМ, рассматривающие различные составляющие демографической системы, в частности, процесс создания браков, изменение рождаемости и др. В работе также исследуются различия в поведении людей, связанные с их принадлежностью к разным типам культуры, которые вызваны неравномерностью процессов демографического перехода в разных странах.

Кроме того, многие представленные в литературе АОМ посвящены моделированию различных видов миграционных процессов, таких как миграция внутрирегиональная, межстрановая, трудовая и т. д. При этом в большинстве подобных моделей в качестве побудительных мотивов миграции агентов рассматриваются экономические причины, а факторами, ограничивающими перемещения агентов, становятся параметры рынка труда на той территории, куда агенты стремятся мигрировать.

Примером АОМ миграции из села в город под влиянием экономических факторов может служить работа [10], в которой на примере Китая рассматриваются последствия неравномерного регионального развития страны, отток сельского населения в города, увеличение нелегальных городских работников и рост безработицы в городах. В работе созданы модели городского и сельского рынков труда, а также популяция агентов, находящихся в поиске работы. Результаты проведенных с использованием модели экспериментов показали, что меры, направленные на ужесточение исполнения закона о прописке (в том числе, путем введения штрафов для нелегальных работников и фирм-нанимателей), в конечном счете будут способствовать сдерживанию потока сельских мигрантов.

Достаточно многочисленным классом АОМ являются такие, в которых причина миграции агентов-людей из села в город выступают природные экологические или климатические условия. В качестве примера можно привести работы [12] и [8]. Эти модели разрабатывались как инструменты апробации специальной политики поддержки населения, занятого в аграрном секторе, для сдерживания оттока населения из села, уменьшения показателей сезонной миграции и нагрузки на городской рынок труда.

Рассмотрению межстрановой трудовой миграции посвящена модель, представленная в работе [13]. В этой АОМ имитируются миграционные потоки внутри европейских стран, вплоть до локальных территориально-административных единиц

(уровень областной и локальной миграции), а также региональные рынки труда с особой детализацией их специфики (типы вакансий, предпочтения работодателей и т. п.). Решение о переезде принимается агентами в модели под влиянием неудовлетворенности своим трудовым статусом и уровнем доходов, а также с учетом расстояний между различными регионами.

Также в литературе широко представлены АОМ миграции, в которых большую роль играют неэкономические факторы. Например, в работе [16] показана компьютерная имитация военного конфликта в Сирии, в результате которого часть агентов, представляющих гражданское население города, становятся беженцами. Массовая миграция, вызванная социальными шоками, имитируется и в модели [11]. Агенты в последней модели могут принадлежать к различным этническим группам, что влияет на процессы формирования их социальных связей, так же, как и районы проживания. Таким образом, миграция и образование этнических кластеров в модели — результат местоположения вызвавшего кризис события и его обширности, этнической напряженности, демографических факторов и величины социальных сетей. Компьютерные эксперименты с моделью показали, что формирование межэтнических социальных сетей значительно влияет на способность сообщества восстанавливаться после социальных шоков, а значит, и на будущую стабильность в регионе.

А в модели, описанной в работе [9], имитируется процесс трудовой циклической миграции, причем одним из важнейших факторов, влияющих на миграционный выбор агентов и способствующих его осуществлению, являются социальные связи. Опыт и навыки, полученные во время каждого переезда, облегчают последующие, так как в каждый новый приезд мигранты увеличивают количество социальных контактов, что в будущем упрощает поиск работы и пр., и мигранту, однажды выехавшему за пределы своей страны, гораздо проще принять решение о новом переезде. В модели были использованы реальные данные масштабного исследования о трудовой миграции из Мексики в США, проводившегося с 1982 по 2008 гг. и охватившего более миллиона человек за каждый год наблюдений¹. В ходе компьютерных экспериментов модель продемонстрировала, каким образом ужесточение пограничного контроля и миграционного режима влияет на миграционный поток. Когда параметр пограничного контроля увеличивали, одновременно увеличивалось и количество мигрантов в принимающей стране за счет уменьшения возможности их возвращения.

Подводя итог нашего краткого обзора, отметим, что, несмотря на специфические особенности отмеченных АОМ, связанные с конкретными задачами, для решения которых эти модели создавались, в их конструкциях можно выделить основные элементы, призванные обеспечивать адекватную имитацию демографических процессов. Для описания среды — это показатели, характеризующие экономические, экологические, институциональные, а также связанные с безопасностью факторы, которые влияют на показатели смертности населения, на репродуктивные стратегии агентов, а также побуждают агентов к перемещению места жительства и способствуют (или препятствуют) осуществлению миграционных решений агентов.

Агенты же, в свою очередь, наделяются свойствами, позволяющими дифференцировать их относительно целевых групп, на которые влияют различные факторы среды. Агенты также должны обладать внутренними процедурами, которые позволяют им выводить необходимость и возможность совершения таких действий, как рождение ребенка, смену места работы и/или места жительства исходя из собственных характеристик и свойств среды.

¹ Mexican Migration Project (MMP) — Мексиканское миграционное исследование.

2. Социо-эколого-экономическая агент-ориентированная модель и этапы ее реализации

Целью разрабатываемой в ЦЭМИ РАН большой территориальной агент-ориентированной модели является воссоздание в рамках одной комплексной модели нескольких частных моделей природной среды территории, социально-демографической структуры ее населения, а также структуры экономики соответствующих стран/регионов таким образом, чтобы имитировать взаимосвязи происходящих в этих сферах процессов. Действующими агентами в модели являются люди и организации, способные принимать сигналы из внешней среды и действовать в соответствии со своими интересами, а более крупные акторы, такие как страны/регионы как административные единицы и территория в целом как часть экосистемы служат для агентов этой внешней средой. Модель разрабатывается в качестве инструмента территориального планирования и должна служить полигоном для постановки различных компьютерных экспериментов, позволяющих оценить динамику параметров управляемой социально-экономической системы при возможных изменениях внешней среды, а также вследствие планируемых управляющих воздействий.

Ядром такой комплексной модели служит территориальная демографическая модель, в искусственной среде которой максимально правдоподобно воссоздана внутренняя структура населения, а также максимально правдоподобно имитируется поведение агентов, связанное с образованием семьи, рождением детей и переменой места жительства. Демографическая модель позволяет имитировать процессы движения населения, которое, в свою очередь, является составной частью модели экологической системы, а также ресурсом для модели экономической деятельности. Именно в такой последовательности предполагается разработка соответствующих блоков модели и подключение их к ядру.

В настоящее время уже разработана демографическая АОМ, в которой имитируется поведение людей исходя из их внутренних установок, обуславливающих как репродуктивные стратегии агентов-людей в модели, так и выбор ими места жительства. В модели имитируются следующие процессы:

- смертность и рождаемость постоянного населения;
- внутренняя миграция;
- межстрановая трудовая миграция;
- межстрановая миграция, вызванная чрезвычайными обстоятельствами.

Смертность населения имитируется на основе использования вероятностных механизмов и метода передвижки возрастов, в то время как рождаемость — более сложный процесс. Так, агенты в модели разделены на две группы (типа), различающиеся репродуктивными стратегиями, — агенты первого типа придерживаются традиционной стратегии, для которой характерна высокая рождаемость, а агенты второго типа — современной, при которой рождаемость существенно ниже. В модели используется суммарный коэффициент рождаемости, т. е. среднее число детей, рождаемых женщиной в течение репродуктивного периода, что и позволяет перенести фокус моделирования на уровень отдельных агентов. Кроме суммарного коэффициента рождаемости, типы воспроизводства различаются также распределением рождений детей на протяжении репродуктивного периода женщин.

Механизм имитации в модели внутренней и межстрановой трудовой миграции аналогичны: стимулом к переезду агента становится существенная разница между странами или различными территориальными образованиями в уровне экономического благополучия и уровне социальной поддержки, а сдерживающим фактором — степень доступности вакансий, соответствующих уровню притязаний агента. Под уровнем притязаний понимается набор желательных для агента значений

следующих параметров: а) гражданский статус; б) статус работника; в) размер заработка; г) размеры полагающейся социальной поддержки.

В случае внешней миграции, вызванной природными или социальными катаклизмами, механизм имитации следующий: задаются параметры миграционного потока в каждый момент времени, а затем уже в нужном количестве создаются агенты с заданными возрастными и социальными характеристиками. При этом мигранту присваивается категория беженца, и он вправе рассчитывать на социальное пособие. Поэтому он выбирает страну, в которой пособие выше, и путь в которую ему открыт, а рынок труда при этом агентом в расчет не принимается.

Представленная конструкция демографической АОМ послужила основой создания трех моделей:

- 1) модели воспроизводства населения Санкт-Петербурга, в которой не учитывается миграция, а управляемым параметром служит индекс изменения суммарного коэффициента рождаемости;
- 2) модели трудовой миграции из приграничных территорий Китая в Россию, в которой к имитации естественного движения населения соседних регионов добавлена имитация смены агентами-жителями КНР места работы как внутри своей страны, так и за рубежом в поисках лучших экономических условий. Управляемыми параметрами модели являются курс юаня по отношению к рублю, а также доступность объективной информации о рынке труда в России, необходимой агентам для принятия миграционных решений;
- 3) модели миграции в странах Европейского союза, в которой имитируется как внутренняя трудовая миграция внутри стран ЕС, так и миграционный поток извне, вызванный внешними причинами. Управляемыми параметрами модели являются:
 - на уровне Евросоюза в целом — суммарный коэффициент рождаемости, дифференцированный по типам воспроизводства; мощность миграционного потока, его возрастно-половой состав, а также распределение предпочтений агентов при выборе страны-цели миграции для двух маршрутов, по которым попадает в Евросоюз основная масса внешних мигрантов — восточный и центральный средиземноморский маршруты;
 - на уровне отдельных стран: открытость границ; срок пребывания иммигрантов.

Все модели были апробированы в ходе компьютерных экспериментов на реальных данных. Например, на АОМ ЕС были поставлены эксперименты по прогнозированию численности и структуры постоянного населения стран Евросоюза при разных значениях суммарного коэффициента рождаемости для агентов современного типа, что влияло на скорость депопуляции и старения населения. А на модели приграничных территорий Китая и России были поставлены эксперименты по оценке мощности миграционного потока при изменении курса юаня по отношению к рублю и при повышении информированности населения Китая об условиях рынка труда в России.

Литература

1. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р. Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М. : Экономика, 2013.
2. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М. : Эдиториал УРСС, 2002.
3. *Agent-Based Computational Demography: Using Simulation to Improve Our Understanding of Demographic Behaviour* / ed. by F. C. Billari and A. Prskawetz. Heidelberg : Springer-Verlag, 2003.
4. Bloomquist K. M. A comparison of agent-based models of income tax evasion / Social Science Computer Review, 2006. 24, 4. P. 411–425.

5. *Companion Modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia* Los Baños (Philippines) / ed. by F. Bousquet, G. Trébuil, B. Hardy. International Rice Research Institute, 2005.
6. Davis J. S., Hecht G., Perkins J. D. Social Behaviors, Enforcement and Tax Compliance Dynamics // *Accounting Rev.* 2003. P. 39–69.
7. Diaz B. A. Agent-Based Models on Social Interaction and Demographic Behaviour (Ph. D. Thesis). Wien : Technische Universität, 2010.
8. Janmaat J., Lapp S., Wannop T., Bharati L., Sugden F. Demonstrating Complexity with a Role-playing Simulation: Investing in Water in the Indrawati Subbasin, Nepal. International Water Management Institute, Sri Lanka. 2015. Research Report 163 [Электронный ресурс]. URL: http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/pub163/rr163.pdf (дата обращения: 14.11.16).
9. Klabunde A., Zinn S., Leuchter M., Willekens F. An agent-based decision model embedded in the life course. Max Planck Institute for Demographic Research. Working Paper (WP 2015-002) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.demogr.mpg.de/papers/working/wp-2015-002.pdf> (дата обращения: 14.11.16).
10. Laing D., Park C., Wang P. A Modified Harris-Todaro Model of Rural-Urban Migration for China [Электронный ресурс]. URL: http://pages.wustl.edu/files/pages/imce/pingwang/harris-todaro-china_2005.pdf (дата обращения: 14.11.16).
11. Makowsky M., Tavares J., Makany T., Meier P. An Agent-based Model of Crisis-Driven Migration. Santa Fe Institute, New Mexico : 2006 [Электронный ресурс]. URL: <https://irevolution.files.wordpress.com/2012/07/sfi-migration-model-aug2006.pdf> (дата обращения: 14.11.16).
12. Naivinit W., Le Page C., Trébuil G., Gajaseeni N. Participatory agent-based modeling and simulation of rice production and labor migrations in Northeast Thailand // *Environmental Modelling & Software*. 25 (11). 1345–1358. DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.01.012.
13. Pablo-Marti F., Santos J. S., Kaszowska J. An agent-based model of population dynamics for the European regions. Emergence: Complexity and Organization. 2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://journal.emergentpublications.com/article/an-agent-based-model-of-population-dynamics-for-the-european-regions/> (дата обращения: 14.11.16).
14. Silverman E., Bijak J., Hilton J., Cao V. D., Noble J. When Demography Met Social Simulation: A Tale of Two Modelling Approaches // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (JASSS). 2013. Vol. 16 (4) Art. 9 [Электронный ресурс]. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/9.html> (дата обращения: 14.11.16).
15. Silverman E., Bijak J., Noble J., Cao V., Hilton J. Semi-Artificial Models of Populations: Connecting Demography with Agent-Based Modelling. In: Chen, S.-H. et al (eds.), *Advances in Computational Social Science: The Fourth World Congress, Agent-Based Social Systems*. 2014. Vol. 11. P. 177–189. Springer Japan. DOI: 10.1007/978-4-431-54847-8_12.
16. Sokolowski J. A., Banks C. M., Hayes R. L. Modeling population displacement in the Syrian city of Aleppo. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. IEEE. 2014. P. 252–263 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/023.pdf> (дата обращения: 14.11.16).
17. Tsekeris T., Vogiatzoglou K. Multi-Regional Agent-Based Economic Model of Household and Firm Location and Transport Decisions // *Proc. of the 10th STRC Swiss Transport Research Conference*. Monte Verità, 2010 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.strc.ch/conferences/2010/Tsekeris.pdf> (дата обращения: 14.11.16).

References

1. Makarov V. L., Bakhtizin A. R. *Social simulation is a new computer breakthrough. Agent-based models* [Sotsialnoye modelirovanie — novyy kompyuternyy proryv. Agent-orientirovannyye modeli]. M. : Economy [Ekonomika], 2013. (rus)
2. Tarasov V. B. *From Multi-Agent Systems to Intellectual Organizations: Philosophy, Psychology, Computer Science* [Ot mnogoagentnyh sistem k intellektual'nym organizacijam: filosofija, psihologija, informatika]. M. : Editorial URSS, 2002. (rus)
3. *Agent-Based Computational Demography: Using Simulation to Improve Our Understanding of Demographic Behaviour* / ed. by F. C. Billari and A. Prskawetz. Heidelberg : Springer-Verlag, 2003.
4. Bloomquist K. M. *A comparison of agent-based models of income tax evasion* / *Social Science Computer Review*, 2006. 24, 4. P. 411–425.

5. *Companion Modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia Los Baños (Philippines)* / ed. by F. Bousquet, G. Trébuil, B. Hardy. International Rice Research Institute, 2005.
6. Davis J. S., Hecht G., Perkins J. D. *Social Behaviors, Enforcement and Tax Compliance Dynamics* // Accounting Rev. 2003. P. 39–69.
7. Diaz B. A. *Agent-Based Models on Social Interaction and Demographic Behaviour* (Ph. D. Thesis). Wien : Technische Universität, 2010.
8. Janmaat J., Lapp S., Wannop T., Bharati L., Sugden F. *Demonstrating Complexity with a Role-playing Simulation: Investing in Water in the Indrawati Subbasin, Nepal*. International Water Management Institute, Sri Lanka. 2015. Research Report 163. URL: http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/pub163/rr163.pdf.
9. Klabunde A., Zinn S., Leuchter M., Willekens F. *An agent-based decision model embedded in the life course*. Max Planck Institute for Demographic Research. Working Paper (WP 2015-002). URL: <http://www.demogr.mpg.de/papers/working/wp-2015-002.pdf>.
10. Laing D., Park C., Wang P. *A Modified Harris-Todaro Model of Rural-Urban Migration for China*. URL: http://pages.wustl.edu/files/pages/imce/pingwang/harris-todaro-china_2005.pdf.
11. Makowsky M., Tavares J., Makany T., Meier P. *An Agent-based Model of Crisis-Driven Migration*. Santa Fe Institute, New Mexico : 2006. URL: <https://irevolution.files.wordpress.com/2012/07/sfi-migration-model-aug2006.pdf>.
12. Naivinit W., Le Page C., Trébuil G., Gajaseneni N. *Participatory agent-based modeling and simulation of rice production and labor migrations in Northeast Thailand* // Environmental Modelling & Software. 25 (11). 1345–1358. DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.01.012.
13. Pablo-Marti F., Santos J. S., Kaszowska J. *An agent-based model of population dynamics for the European regions. Emergence: Complexity and Organization*. 2015 URL: <https://journal.emergentpublications.com/article/an-agent-based-model-of-population-dynamics-for-the-european-regions/>.
14. Silverman E., Bijak J., Hilton J., Cao V. D., Noble J. *When Demography Met Social Simulation: A Tale of Two Modelling Approaches* // Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS). 2013. Vol. 16 (4) Art. 9. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/9.html>.
15. Silverman E., Bijak J., Noble J., Cao V., Hilton J. *Semi-Artificial Models of Populations: Connecting Demography with Agent-Based Modelling*. In: Chen S.-H. et al (eds.), *Advances in Computational Social Science: The Fourth World Congress, Agent-Based Social Systems*. 2014. Vol. 11. P. 177–189. Springer Japan. DOI: 10.1007/978-4-431-54847-8_12.
16. Sokolowski J. A., Banks C. M., Hayes R. L. *Modeling population displacement in the Syrian city of Aleppo*. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. IEEE. 2014. P. 252–263. URL: <http://www.informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/023.pdf>.
17. Tsekeris T., Vogiatzoglou K. *Multi-Regional Agent-Based Economic Model of Household and Firm Location and Transport Decisions* // Proc. of the 10th STRC Swiss Transport Research Conference. Monte Verità, 2010. URL: <http://www.strc.ch/conferences/2010/Tsekeris.pdf>.