

ОПЫТ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В БОЛЬШОЙ ЭКОНОМИКЕ

В.И. Суслов, Д.А. Доможиров, В.С. Костин, Л.В. Мельникова

ИЭОПП СО РАН

Н.М. Ибрагимов, А.А. Цыплаков

*Новосибирский национальный исследовательский государственный
университет*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы
фундаментальных исследований Президиума РАН № 31 (проект 1.4)*

Аннотация

Показана ограниченность традиционных пространственных моделей в представлении динамики пространственной структуры современной экономики. Обоснована необходимость агент-ориентированного подхода к моделированию экономического пространства. Представлена пилотная версия агент-ориентированной межрегиональной модели «затраты – выпуск» для российской экономики. Особое внимание уделено способу учета в модели пространственного фактора. На условном примере показаны механизмы торговли с учетом транспортных издержек агентов. Определены дальнейшие перспективы развития модели.

Ключевые слова: агент-ориентированные модели, взаимодействие агентов, экономическое пространство

Abstract

The paper demonstrates some limitations of traditional spatial models in the representation of spatial dynamics of the modern economy. We substantiate the

necessity of agent-based approach to spatial economic modeling. The pilot version of an agent-based multiregional input-output model for Russian economy is presented. Special attention is paid to the method of accounting spatial factor in the model. A conventional example illustrates trade mechanisms with the account of agents' transportation costs. The article states future prospects to develop the model.

Keywords: agent-based models, interaction of agents, economic space

Пространственная структура российской экономики непрерывно меняется. И хотя этот процесс весьма инерционный, он имеет качественно иную основу по сравнению с плановой экономикой. Процесс выбора места размещения производства или места проживания стал в значительной степени децентрализованным, меняются степень взаимозависимости отдельных регионов и интенсивность их взаимодействий с внешним рынком. Для изучения новой реальности требуются новые аналитические инструменты, поэтому авторы поставили перед собой цель разработать модельно-программный комплекс, ядром которого является имитационная модель национальной экономики, отражающая ключевые стороны экономической деятельности: производство, потребление, товарные потоки, использование трудовых ресурсов.

В настоящее время исследователя уже не могут удовлетворять традиционные межрегиональные модели, в которых результат функционирования системы является не более чем суммой результатов ее взаимодействующих частей. Таким свойством обладают как модели вида «затраты – выпуск» [1], в том числе развиваемые в ИЭОПП СО РАН [2], так и вычислимые модели общего равновесия [3, 4]. Эти модели имеют ряд общих недостатков: они предполагают оптимизирующее поведение агентов, их рациональность и полную информированность; они не могут отразить неравновесную динамику и в целом любую достаточно сложную динамику. Вычислимые модели общего равновесия в отличие от моделей «затраты – выпуск» способны учитывать ценовые аспекты, но налагают условия уравниваемости всех рынков; они допускают возрастающую отдачу от масштаба, но это может приводить к несуществованию и неединственности равновесия [5–7].

Интересную и перспективную альтернативу представляют собой модели из класса агент-ориентированных моделей [8, 9]. Это очень

широкий класс разнообразных моделей (не ограничивающийся экономическими явлениями), отличительным свойством которых является эволюция всей системы как результат индивидуальных действий множества входящих в нее агентов. Агент-ориентированные модели (АО-модели) можно приложить к самым разным экономическим явлениям и сторонам экономической жизни: муниципалитетам и регионам [10], эколого-экономическим процессам [11], городской транспортной системе [12], финансовым рынкам [13, 14], землепользованию [15, 16], аукционам [17], отраслевым комплексам [18].

В данной статье мы делаем упор на отражение в агент-ориентированных моделях экономических процессов, происходящих в пространстве. Мы описываем разрабатываемую нами агент-ориентированную межрегиональную модель «затраты – выпуск» (АОМММ), делая акцент на ее пространственных аспектах. Пока что это только прототип модели, пример условного экономического пространства, в котором не отражены многие важные аспекты. Однако сконструировать большую модель сразу со всеми деталями малореально, и мы идем здесь от простого к сложному. На данном этапе ставится задача отработать ключевые элементы создаваемой системы: потребительский выбор, работу товарных рынков, назначение цен фирмами, учет транспортных тарифов и т.д. Разрабатываемый модельно-программный комплекс задуман как блочный и масштабируемый. Его программная архитектура позволит добавлять дополнительные блоки и усложнять систему. Первый этап разработки модельно-программного комплекса позволил выявить компоненты, которые могут сделать модель более адекватной и полезной. В последнем разделе статьи намечены дальнейшие перспективы развития АОМММ с точки зрения лучшего отражения пространственных процессов.

ПРОСТРАНСТВО В ЭКОНОМИЧЕСКИХ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МОДЕЛЯХ

Моделирование в явном виде пространственной структуры экономической системы особенно важно для таких экономик, как экономика России с ее огромной территорией. С тех пор как были построены

первые модели размещения – модели Тюнена и Вебера, прошло почти два века, но проблема включения пространства в экономическую теорию не утратила актуальности. Несмотря на все разнообразие существующих пространственных моделей, явный учет фактора пространства в макроэкономическом моделировании остается в значительной степени нерешенной задачей. Физически измеряемое расстояние как параметр или как переменная присутствует в теории размещения фирмы: в моделях пространственной конкуренции, в моделях потоков в двумерном пространстве, а также в моделях землепользования. В то же время в большинстве макроэкономических мультирегиональных моделей расстояние представляется неявно: через транспортные затраты, увеличивающие общие затраты на производство. Более того, в моделях новой экономической географии понятие «пространство» имеет не только физический, но также культурный, политический и социальный аспекты.

В настоящее время микро- и макроэкономические подходы к моделированию пространства, долгое время развивавшиеся независимо друг от друга, движутся в направлении синтеза, о чем свидетельствует резкий рост числа публикаций в области агент-ориентированного моделирования экономики. В рамках данного подхода поведение экономической системы оказывается результатом действий и взаимодействий агентов, составляющих систему, и внешней среды. АО-модели для нас замечательны тем, что воплощают смену парадигмы в экономическом мышлении. Старая неоклассическая парадигма основана на допущениях о рациональности экономических агентов, имеющих четкие цели и оптимизирующих свое поведение, о гомогенности агентов, их свойств и поведения, об убывающей отдаче от масштаба, убывающих предельной полезности и продуктивности. Она концентрируется на состоянии долгосрочного равновесия системы, что в условиях ограничений по вычислительным мощностям не позволяло исследователю идти дальше изучения поведения агента-представителя в рамках вычислимых и трактуемых моделей. Современная парадигма допускает адаптивное, а не рациональное поведение агентов, разнообразие их свойств, а также кумулятивные положительные обратные связи и возрастающую отдачу от масштаба, порождающие экспоненциаль-

ный самоподдерживаемый рост, так что экономическая система может не прийти к равновесию. Поэтому экономика определяется уже не как «наука об использовании редких ресурсов, которые можно по-разному использовать для удовлетворения потребностей людей» (известное определение Л. Роббинса), что сводит ее задачу к оптимизации при известных целях и ограничениях [19], а как «наука о намеренных и непреднамеренных последствиях индивидуальных действий во внешней среде, характеризующейся ограниченностью ресурсов, которая и требует, и принуждает к взаимодействию» [20]. Таким образом, отказ от старой парадигмы экономического мышления неизбежно приводит к дезагрегированному агент-ориентированному подходу, предполагающему ограниченную рациональность агентов в условиях несовершенной информации.

В отношении учета пространственного фактора АО-моделирование дает ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с традиционными подходами, и основное из них – это возможность представления асимметричного пространства любой конфигурации, поскольку агенты не взаимодействуют со всеми агентами сразу. Локальные правила, которым следуют агенты, распространяются только на их ближайшее окружение внутри пространства очень простой формы. Агенты связываются со своими контрагентами с помощью разных топологий социальных взаимодействий. Агенты могут двигаться в свободном непрерывном двухмерном или трехмерном евклидовом пространстве. Локальное окружение агентов может находиться в решетке, описываемой техникой «клеточного автомата». Агенты могут соединяться в сети различного типа, статические или динамические. Агенты могут перемещаться по ячейкам географических информационных систем (ГИС).

С помощью АО-моделей можно исследовать как свойства возникающих пространственных систем, так и пути их возникновения. Обзор проблем, появляющихся при интеграции пространства в АО-модели, дан К. Станиловым [21]. Пространство в АО-моделях выполняет следующие функции: это атрибут агентов и внешней среды; это составляющая взаимодействия агентов; это определяющий фактор масштаба; наконец, это средство коммуникации и проверки

результатов модели. Исторически развитие АО-моделей было связано с моделированием человеческого поведения. Гораздо меньше внимания уделялось реалистичному представлению пространства, поэтому такие модели редко применялись в целях прогнозирования с использованием реальных данных. По мере развития АО-моделирования пересматривались взгляды на роль внешней среды как условия взаимодействия агентов. Выяснилось, что даже малые изменения в пространственных системах могут значительно повлиять на динамические процессы, основанные на поведении агентов. Это определило дальнейшие усилия исследователей по интеграции пространства в АО-модели. Прежде всего, продолжается совершенствование моделей на базе клеточных автоматов, включая использование более детальных данных, расширенных пространственных ареалов и проведение экспериментов с альтернативными представлениями ячеистой структуры (решетки) пространства. Некоторые исследователи порвали с доминирующей традицией использования конструкторов клеточных автоматов и стали экспериментировать с представлением внешней среды посредством векторов и объектов. Наконец, усложняются пространственные характеристики внешней среды, в частности включается третье измерение пространства, что открывает новые возможности для исследования параметров моделей и визуализации симулируемых феноменов.

Что касается экономических АО-моделей, то пространство в них влияет на действия агентов различными путями. Во-первых, от расположения агентов в пространстве зависят издержки, связанные с транспортировкой товаров. Во-вторых, для агентов-людей важны стоимость их собственного перемещения в пространстве и затраты времени на такое перемещение. В-третьих, для агента может быть важным его расположение в пространстве из-за особенностей местности, таких как климат или рельеф. В-четвертых, пространственная удаленность уменьшает вероятность того, что та или иная информация оказывается доступной агенту. В-пятых, от расположения агента в пространстве может зависеть его административная принадлежность (например, от расположения в том или ином регионе могут зависеть ставки налогов).

АО-подходы могут много дать в области моделирования региональной и городской динамики (миграция жителей, демография фирм, жилищное строительство, поведение потребителя, транспорт и экология) [21]. Наиболее многочисленны работы, касающиеся городского и сельскохозяйственного землепользования [16]. При этом пространственные АО-модели макроэкономики единичны. Наиболее известные из них – мультирегиональные модели Eurase@UNIBI [22] и Lagom regIO [23].

Eurase@UNIBI – двухрегиональная АО-модель, включающая механизмы адаптации технологий фирмами и развитие специфических навыков у рабочих. Это одна из моделей семейства Eurase, разработанных европейским исследовательским консорциумом при координирующей роли Университета Генуи (Università degli Studi di Genova). Авторы используют модель для оценки воздействия региональной политики Евросоюза на процессы пространственной конвергенции. Пространственный фактор представлен в ней следующим образом: рынки инвестиционных товаров являются общедоступными в пределах всей системы; на рынках потребительских товаров общедоступно предложение. Эта доступность обеспечивается отсутствием транспортных затрат у фирм. В то же время спрос на потребительские товары локализован в том смысле, что потребители могут пользоваться только торговыми центрами своего региона. На рынках труда «сопротивление пространства» действует через затраты на поездки работников.

Lagom regIO – это межрегиональная агент-ориентированная макроэкономическая модель, нацеленная на изучение экологических проблем. Она принадлежит к группе моделей Lagom, построенных в Германии, в Потсдамском институте изучения изменений климата (Potsdam Institute for Climate Impact Research). Эта модель представляет экономический рост нескольких взаимодействующих регионов с накоплением разнородных капитальных товаров разными темпами и с эндогенными технологическими изменениями. Концептуально модель основана на представлении динамического равновесия, предложенном Г. Джинтисом [24], и в этом продолжает традиции равновесной модели Эрроу – Дебре, но вместо вычисления единственной

оптимальной траектории предлагает широкий набор возможных траекторий. Фактор пространства учтен в этой модели следующим образом: принадлежность к определенному региону является одним из параметров агента; при принятии решений агенту доступна информация об ограниченной выборке агентов, и вероятность того, что в эту выборку попадут агенты, принадлежащие к тому же самому региону, задается более высокой, чем вероятность попадания в выборку агентов из других регионов.

Таким образом, в этих моделях не используется явное представление пространства. В них также не используются реальные географические данные; пространственная структура экономики в них возникает как результат агрегации данных об агентах по признаку принадлежности к тому или иному региону. С другой стороны, известные модели городов неизбежно привязаны к реальной карте и учитывают транспортные издержки в зависимости от расстояния, но зачастую решают не общеэкономические, а инженерные, в частности логистические, проблемы, как, например, модель городской транспортной системы [25]. Наиболее близкой к нашей проблематике представляется мультирегиональная экономическая АО-модель, разработанная Т. Тсекерисом (Т. Tsekeris) и К. Войатзоглу (К. Vogiatzoglou), которая позволяет изучать размещение домохозяйств и фирм и транспортные решения в системе из нескольких городов (регионов) [26]. В этой модели решения о перемещении производства или смене места работы либо проживания основываются на учете транспортных издержек, связанных с перемещением как внутри города, так и между городами. Локационные решения зависят также от эффектов агломерации. Помимо принципов новой экономической географии используется линейная модель Тюнена, так что агенты располагаются в концентрических зонах вокруг городов. Имеются центральное и региональные правительства, которые через инвестиции и налоги могут способствовать изменению транспортных издержек и таким образом оказывать влияние на локационные решения агентов. Эта АО-модель наряду с пространственным компонентом содержит полноценные модели домохозяйств и фирм, но в ней не моделируются товарные рынки и торговые потоки.

На данный момент можно констатировать, что, с одной стороны, существующие макроэкономические модели большой экономики не учитывают пространственный фактор явным образом, а с другой стороны, наиболее проработанные в пространственном аспекте модели городских систем сосредоточиваются на отдельных фрагментах функционирования экономической системы. Авторы настоящей статьи полагают совершенно необходимым развитие макроэкономических АО-моделей, которые бы включали в себя пространство в явном виде.

АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ МЕЖОТРАСЛЕВАЯ МОДЕЛЬ

Экономическая структура модели, виды агентов. Рассмотрим сначала экономические аспекты модели в чистом виде, не уделяя внимания географическим и пространственным особенностям. Экономическая деятельность в модели осуществляется агентами, и ее описание можно дать, рассматривая функции агентов.

В экономике имеются агенты четырех типов: фирмы, домохозяйства, внешние рынки и товарные рынки. Фирмы производят продукцию четырех отраслей: добычи, обработки, строительства и услуг. Каждая фирма работает только в одной отрасли. Фирмы выходят на товарные рынки в качестве продавцов своей продукции, а также в качестве покупателей необходимых производственных факторов. Домохозяйства получают дивидендный доход от работы фирм, потребляют продукты в соответствии со своей функцией полезности и доходами. Домохозяйства выходят на товарные рынки в качестве покупателей, закупаая потребляемые блага. Товарных рынков столько же, сколько отраслей. Они выполняют координационные функции, помогая агентам, являющимся продавцами и покупателями, осуществлять торговлю. Внешние рынки выходят на товарные рынки в качестве покупателей и продавцов, причем цены покупки и продажи фиксированы и существенно отличаются друг от друга. В текущей реализации модели нет такого агента, как правительство. Некоторые функции правительства – перераспределение денежных средств (трансферты

домохозяйствам, сбор налогов, уравнивание внешней торговли), сбор статистической информации осуществляет экономическая система в целом.

Последовательность событий в модели упрощена и не учитывает внешние рынки. В пределах одного периода работы модели происходят следующие события:

- объявляется начало периода. Соответствующие переменные устанавливаются на нужных уровнях;
- бюджет производит трансферты;
- домохозяйства строят планы (выбирают доли потребления по секторам);
- фирмы строят планы (определяют цены и объемы производства продукции);
- фирмы выставляют пакеты (цена, количество) на соответствующие рынки;
- домохозяйства сравнивают цены (с учетом транспортных тарифов) разных пакетов и делают заказы по пакетам в пределах доступных количеств;
- рынки удовлетворяют заказы. Если заказов на пакет с избытком, удовлетворяют пропорционально;
- фирмам сообщают, реализован ли их пакет и какой был на него спрос. Фирмы меняют прибыль;
- фирмы корректируют свою информацию по спросу;
- домохозяйствам сообщают о приобретенных ими товарах. Они меняют свой доход и количество товаров;
- домохозяйства корректируют свою информацию о ценах;
- если есть нераспроданное на рынке и были проданы товары, то возвращаемся на этап заказов;
- остатки дохода изымаются в бюджет;
- распределяются дивиденды по долям собственности;
- объявляется конец периода;
- агенты заполняют статистическую отчетность;
- система обрабатывает отчетность и выдает пользователю свои отчеты;
- начинается новый период.

Географическая структура модели привязана к условной карте России. Структура в определенном смысле является иерархической. Верхний уровень иерархии образуют три макрорегиона: Запад, Центр и Восток с границами, заданными географическими границами сгруппированных федеральных округов. Каждый макрорегион состоит из обычных регионов, которых в текущей реализации модели 77. Каждый регион содержит города. Наконец, на нижнем уровне находятся фирмы и домохозяйства. Уровень городов используется в модели только на этапе инициализации для размещения (назначения координат) фирм и домохозяйств. Уровни макрорегионов и регионов используются на этапе инициализации, а также при составлении статистической отчетности, отражающей работу модели. Внешние рынки выпадают из этой иерархической структуры: они обладают только координатами и не привязаны к регионам. Всего используется три внешних рынка. Условно их можно назвать «Китай», «Центральная Азия» и «Европа». Координаты соответствуют городам Мюнхен, Алма-Ата и Пекин.

Размеры России сопоставимы с размерами земного шара, поэтому использование в модели плоской карты привело бы к слишком большим искажениям (например, непропорционально большим расстояниям на карте для местностей вблизи полярного круга). В связи с этим координаты в модели выражаются в градусах широты и долготы. При необходимости расчета расстояния между двумя точками Земля рассматривается как шар радиуса 6371 км и в качестве расстояния берется длина соответствующей кратчайшей дуги.

Инициализация. В модели применены элементы геоинформационного подхода. Для размещения агентов были использованы следующие данные: 1) географические координаты городов Российской Федерации; 2) численность населения городов; 3) статистические данные о количестве предприятий и об отгрузке продукции в разрезе видов экономической деятельности и субъектов РФ.

Домохозяйства размещаются вокруг точки, задаваемой координатами города. Вероятность того, что создаваемое на этапе инициализации домохозяйство попадет в данный город, пропорциональна населению города. Домохозяйства размещаются согласно двумерно-

му нормальному распределению в координатах (широта, долгота) с вершиной в точке, соответствующей координатам города, и с коэффициентом масштаба, пропорциональным квадратному корню из численности населения данного города.

Фирмы также размещаются по двумерному нормальному распределению вокруг точки, задаваемой координатами города. Вероятность попадания создаваемой фирмы в регион пропорциональна количеству фирм данной отрасли в данном регионе, а вероятность попадания фирмы в город данного региона пропорциональна населению города.

Для инициализации модели привлекаются также данные из мало-размерного условного примера ОМММ, разработанного в ИЭОПП СО РАН [27]. Эти данные используются для задания технологических коэффициентов (материалоемкости, капиталоемкости), величины капитала фирм, коэффициентов функций потребления и транспортных тарифов. Материалоемкость и капиталоемкость берутся из соответствующих матриц для трех макрорегионов (коэффициентов текущих материальных затрат и коэффициентов ресурсоемкости для оборудования). Величина капитала берется из матрицы ограничений на базовые объемы производства. Ограничение на объем производства в данной отрасли данного макрорегиона умножается на капиталоемкость, и полученный капитал делится поровну между фирмами данной отрасли, принадлежащими к данному макрорегиону. Структура конечного потребления из примера ОМММ взята в качестве коэффициентов в функции полезности Кобба – Дугласа. Коэффициенты текущих материальных затрат для транспорта использованы как коэффициенты транспортных тарифов для компоненты, не зависящей от расстояния.

Для отображения работы модели на экране компьютера используются анимированное изображение на карте и графики собранных статистических показателей. Мы взяли подробную физическую карту России в обратной равнопромежуточной конической проекции. Координаты модели (широта и долгота) перед отображением на экране переводятся в координаты карты. На экран могут выводиться также многоугольники с границами для регионов. За счет полупрозрачности

эти два изображения могут смешиваться. Размещение агентов на карте отображается в виде пиктограмм. Для фирмы это пиктограмма одной из четырех отраслей, а для домохозяйства – круг. Динамика потоков товарного обмена между всеми участниками торговли визуализируется линиями со стрелками, соответствующими разным отраслям (рис. 1). При этом на экране отражаются не все сделки, а только некоторая выборка.

Если выбрать одного из агентов, то можно получить информацию о его функционировании. Объемы производства и производственных затрат для фирм, объемы потребления для домохозяйств, объемы экспорта и импорта для внешних рынков изображаются столбчатой диаграммой, на которой столбцы раскрашены цветом, соответствующим отрасли.

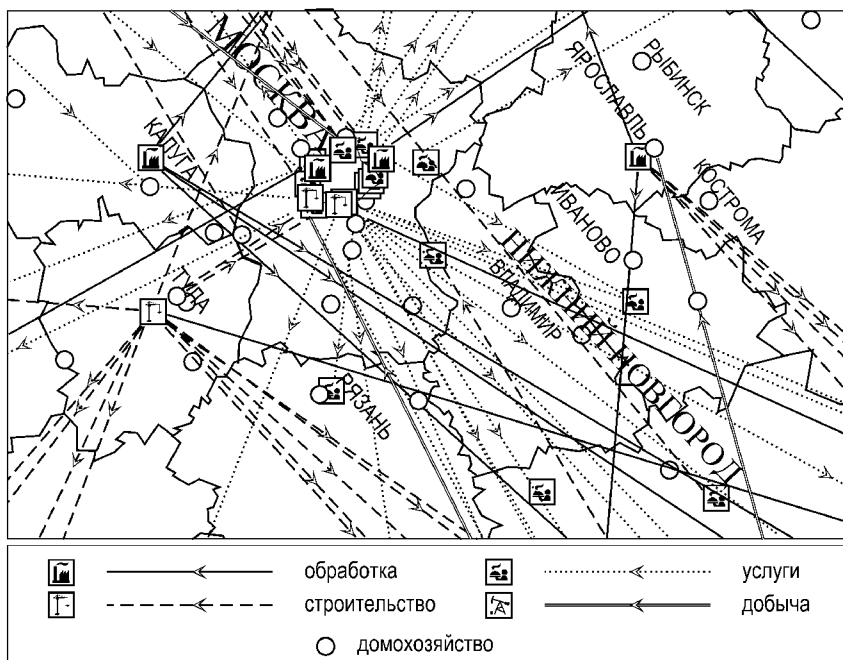


Рис. 1. Размещение агентов и отображение сделок на фрагменте карты

Результаты функционирования модели анализируются по статистике, собираемой в разрезе макрорегионов и по экономике в целом: рассматриваются физические объемы производства, объемы производства в стоимостном выражении, прибыль, рентабельность, потребление (физические объемы), среднедушевое потребление, потребительские доходы, среднедушевые потребительские доходы.

Все физические и стоимостные показатели, кроме потребительских доходов, собираются в разрезе отраслей. Производные показатели вычисляются также в разрезе отраслей. Работа модели визуализируется графиками собранных статистических показателей, которые могут обновляться по мере поступления новых данных (рис. 2).

Учет пространства и механизм торговли. От моделей того же класса (агент-ориентированных моделей экономики в целом) нашу модель отличает явное описание пространственного фактора. Все агенты имеют географическую локацию в непрерывном пространстве и учитывают свои координаты и координаты тех агентов, с которыми взаимодействуют. Поскольку нас интересуют в первую очередь экономические проблемы, мы делаем упор на экономические аспекты пространства, а не на географические.

В текущей реализации модели АОМММ структура взаимоотношений в пространстве создается транспортными издержками. Транспортные издержки состоят из двух компонент. Первая пропорциональна расстоянию между парой агентов и количеству перевозимых товаров. Вторая компонента не зависит от расстояния и пропорциональна перевозимому количеству. В модели отсутствует дезагрегация по типу перевозимого груза, но издержки разные для разных отраслей. В текущей реализации модели расстояние считается по длине кратчайшей дуги без учета транспортных сетей. Транспорт не выделяется как отдельная отрасль, и транспортные тарифы фиксированы и задаются экзогенно. По сути, они имеют вид налогов, собираемых в бюджет.

Вся торговля в отдельной отрасли осуществляется через соответствующий товарный рынок. Механизм торговли реализован с помощью обмена сообщениями между товарным рынком, продавцами и покупателями. В каждый период происходит некоторая последовательность событий, связанных с торговлей: а) выставление продавцами

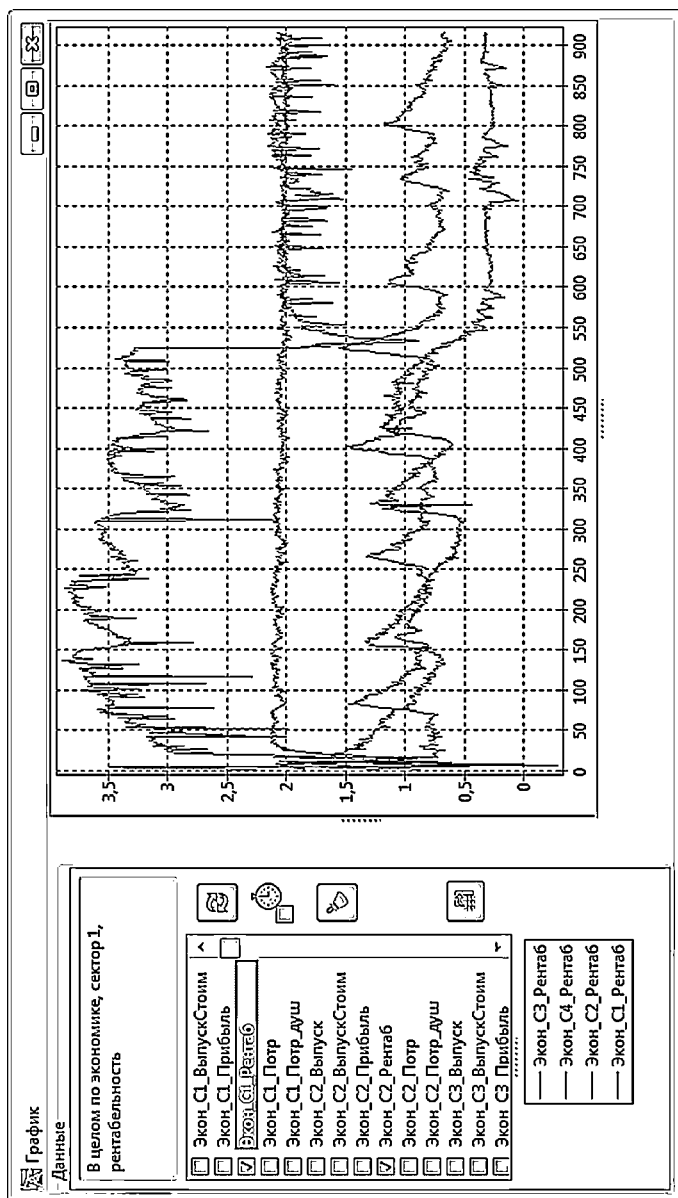


Рис. 2. Отображение собираемой статистики в виде графиков

По горизонтальной оси – номер периода, по вертикальной – отображаемый показатель в соответствующих единицах

пакетов (т.е. информации о цене и объеме предлагаемого товара) на товарный рынок; б) обработка информации о пакетах покупателями; в) выставление покупателями заявок на пакеты; г) принятие товарным рынком решения о продаже пакетов и удовлетворении заявок покупателей; д) рассылка сообщений о совершенных сделках; е) принятие товарным рынком решения о начале новой итерации или об остановке торговли. Рассмотрим этот процесс более подробно.

После того как продавцы-фирмы сформировали планы по объемам производства и ценам продукции, они готовы выставить свои заявки, т.е. пакеты «цена, объем», на соответствующий их отрасли рынок. Внешние рынки в роли продавца выставляют пакет с фиксированной ценой (ценой импорта) и неограниченным количеством товара на каждый из товарных рынков. Выставление пакетов происходит после получения сообщения от товарного рынка.

Цена пакета не меняется в процессе торговли (если не произошло распродажи), меняются только объемы. В начале торговли на рынке присутствуют пакеты, предложенные всеми продавцами, но в дальнейшем часть пакетов может быть раскуплена.

После того как товарный рынок соберет все пакеты, он посылает сообщение покупателям, чтобы те обновили свою информационную базу. Покупатель из представленного множества пакетов может произвести свою выборку. Ему становятся известны цены (и объемы) в пределах сделанной выборки. Размер выборки в модели можно регулировать, тем самым регулируя степень информированности агентов-покупателей. Если покупатель в первый раз видит данного продавца, то он добавляет в свое информационное множество новый элемент. Если он уже знал этого продавца, то соответствующий элемент обновляется. Остальные элементы информационного множества остаются неизменными. По информационному множеству покупатель формирует представление о среднерыночной цене в настоящий момент (как среднее взвешенное).

Процесс торговли происходит в несколько итераций. На каждой итерации покупатель в рамках своего информационного множества выбирает один пакет из не раскупленных к текущей итерации пакетов. К цене, указанной для пакета, покупатель добавляет издержки на

перевозку единицы товара от данного продавца. Вероятность выбора пакета зависит от этой суммы, т.е. от цены, включающей транспортные издержки. Чем ниже цена, тем больше вероятность выбора данного пакета.

Имеется параметр, определяющий степень рациональности покупателя при выборе цены. Когда параметр очень большой, покупатель выбирает пакет с самой выгодной ценой с вероятностью, равной единице. Если параметр нулевой, то покупатель может выбрать любой рассматриваемый пакет с одинаковой вероятностью.

Если фактическая цена для выбранного пакета слишком расходится с представлением о среднерыночной цене, то агент отвергает этот пакет и переходит к новой торговой итерации, корректируя информационное множество информацией о продавце. Если же пакет устраивает агента, то он делает заявку на покупку.

Размер заявки зависит от величины неудовлетворенного спроса при данной цене (включающей транспортные издержки). Исходная функция спроса у продавцов разных типов имеет разный вид. Для домохозяйств общая сумма денег, затрачиваемых на товары данного сектора, фиксирована, так что функция спроса имеет вид обычной гиперболы. У фирм функция спроса неэластичная, они покупают запланированное количество. У внешних рынков, наоборот, функция спроса бесконечно эластичная при бесконечной емкости. Они покупают любое доступное количество товара, цена которого ниже данной фиксированной цены экспорта (с учетом транспортных издержек).

После сбора заявок от покупателей дальнейшие решения в рамках одной итерации механизма торговли принимает товарный рынок (более подробное описание этих решений и условный пример приведены ниже). Далее товарный рынок извещает участников торговли о принятых решениях и заключенных сделках. Если на текущей итерации не удалось удовлетворить весь покупательский спрос и остались не полностью распроданные пакеты, то происходит новая итерация.

В модели предусмотрена возможность для продавцов устраивать распродажу своего товара, т.е. выставлять нераспроданное количество на товарный рынок заново по более низкой цене. В конце концов

при достаточно низкой цене продукция будет куплена одним из внешних рынков.

Внутренний механизм функционирования товарного рынка.

В рамках одного временного периода модели может быть несколько торговых итераций. Рассмотрим одну такую итерацию.

Имеются некоторый набор нераспроданных пакетов и набор заявок на эти пакеты со стороны покупателей. Если общий спрос (общий объем заявок) для данного пакета превышает его размер, то товар распределяется пропорционально между покупателями и пакет не рассматривается на последующих итерациях торговли. Если общий спрос меньше размера пакета, то пакет переходит на следующую итерацию торговли с оставшимся нереализованным количеством. Если спроса на оставшиеся пакеты нет или если все предложенные на рынке пакеты были раскуплены полностью, то торговля заканчивается, в противном же случае осуществляется следующая итерация.

На рисунках 3 и 4 показан условный пример торговли с учетом транспортных издержек. На рынке исходно имеется три пакета с ценами 2, 4, 6 и количествами 12, 24, 12, выставленных тремя продавцами-фирмами. Также один пакет бесконечного объема с ценой 10 выставлен внешним рынком. Имеется два покупателя: домохозяйства *A* и *B*. Домохозяйство *A* выделило на покупки на данном рынке сумму 81, а домохозяйство *B* – 152. Для каждой пары «продавец – домохо-

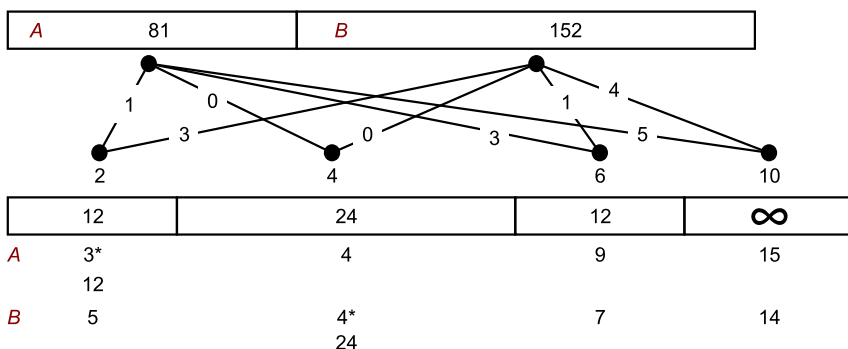


Рис. 3. Пример торговли: первая итерация

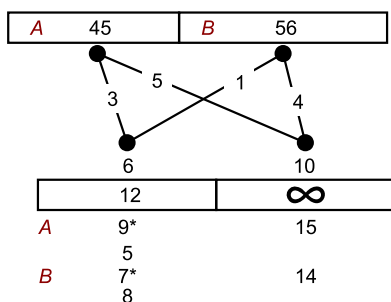


Рис. 4. Пример торговли: вторая итерация

зайство» имеются некоторые транспортные издержки. Способ их расчета в данном случае неважен. Транспортные издержки указаны на схеме для каждой из линий, соединяющих домохозяйства и пакеты. Для простоты предполагаем, что домохозяйства «видят» все представленные на рынке пакеты и что они полностью рациональны при выборе цены (выбирают самую выгодную цену с учетом транспортных издержек).

Из представленных пакетов первый является самым выгодным для домохозяйства A (цена – 2, транспортные издержки – 1), а второй – самым выгодным для домохозяйства B (цена – 4 при нулевых транспортных издержках). Домохозяйства предъявляют спрос, равный размеру понравившихся им пакетов (на рис. 3 и 4 они отмечены звездочками), поскольку выделенные средства позволяют полностью купить их. Таким образом, два пакета исчезают с рынка, и начинается следующая итерация. На этой итерации спрос домохозяйства A ограничен суммой $81 - 3 \cdot 12 = 45$, а спрос домохозяйства B – суммой $152 - 4 \cdot 24 = 56$.

Теперь денег домохозяйств не хватает на покупку всего объема самого выгодного пакета. Домохозяйство A делает заявку на 5 единиц товара, а домохозяйство B – на 8 единиц. При этом оказывается, что спрос (13) превышает размер пакета (12) и оставшийся товар делится пропорционально заявкам. Домохозяйство A получает $5 \cdot 12/13$ единиц, а домохозяйство B – $8 \cdot 12/13$ единиц товара.

Все обычные пакеты оказываются распроданными. Оставшийся неудовлетворенным спрос (суммы $45 - 9 \cdot 5 \cdot 12/13 = 45/13$ и $56 - 7 \cdot 8 \cdot 12/13 = 56/13$ для домохозяйств *A* и *B* соответственно) удовлетворяется бесконечно емким пакетом, выставленным внешним рынком. Домохозяйства приобретают на внешнем рынке $3/13$ и $4/13$ единиц товара соответственно. На этом торговля заканчивается.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ АОМММ

Дальнейшее развитие модели в пространственном аспекте может быть связано с добавлением новых типов агентов с новой функциональностью или с наделением имеющихся типов агентов дополнительной функциональностью. Одним из важных аспектов пространственного развития являются миграция экономических агентов и их размещение в пространстве. Предполагается наделить агентов возможностью изменения местоположения. Изменение размещения экономической активности в пространстве может быть связано также с расширением имеющегося производства, появлением новых фирм или банкротством существующих. Соответственно, мы планируем ввести в модель возможность увеличивать капитал фирм за счет инвестиций. Это требует введения нового типа агента – финансовой системы, а также введения для фирм и домохозяйств дополнительной функциональности – возможности брать и давать денежные средства в долг.

В текущем варианте модели агенты не появляются и не исчезают. Требуется разработать механизмы появления новых фирм в рентабельных отраслях и банкротства существующих фирм, имеющих стойкие финансовые проблемы. Можно ввести транспорт как отдельную отрасль, добавив в модель транспортные фирмы. Такое расширение модели может потребовать модификации механизма торговли, поскольку цена услуг транспорта определяет транспортные издержки, которые агенты принимают во внимание в процессе торговли.

Можно ввести агентов-правительства (центральное и региональные). Правительство может назначать ставки тех или иных налогов.

Центральное правительство может перераспределять денежные средства между региональными правительствами. Различие налоговой нагрузки по регионам может влиять на размещение экономической активности и т.п.

В модель также планируется добавить агента типа «рынок труда» и наделить домохозяйства и фирмы соответствующей функциональностью. При этом выбор домохозяйством места работы, т.е. фирмы, во многом должен определяться их взаимным расположением в пространстве, необходимостью пользоваться транспортом для перемещения между жильем и местом работы и величиной соответствующих издержек в денежном и временном выражении. Кроме того, мобильность домохозяйств должна быть увязана с ситуацией на рынке труда.

Как уже говорилось, на данный момент транспортные издержки в модели вычисляются по единому транспортному тарифу, умноженному на расстояние между агентами по геодезической дуге. Планируется в сотрудничестве с DATA EAST использовать элементы геоинформационного подхода и модифицировать расчет транспортных издержек с учетом существующей транспортной инфраструктуры. Матрицы расстояний для вычисления транспортных издержек предполагается рассчитывать на основе информации о реальной дорожной сети Российской Федерации. Здесь может понадобиться введение в модель логистических решений агентов по выбору наилучшего маршрута перевозки.

В перспективе в модели могут появиться географические объекты и объекты инфраструктуры, местоположение которых в пространстве фиксировано. Если местоположение географических объектов по определению фиксируется экзогенно, то выбор местоположения объектов инфраструктуры, например дорог, может быть реализован как принятие решения соответствующими агентами.

Литература

1. **Miller R.E., Blair P.D.** Input-Output Analysis: Foundations and Extension. – Cambridge University Press, 2009. – 784 p.

2. **Ершов Ю.С., Ибрагимов Н.М., Мельникова Л.В.** Современные постановки прикладных межрегиональных межотраслевых моделей // Исследования многорегиональных экономических систем: опыт применения оптимизационных межрегиональных межотраслевых систем / Под ред. В.И. Суслова. – Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2007. – С. 29–59.

3. **Haddad E.** Interregional computable general equilibrium models // Tool Kits in Regional Science: Theory, Models, and Estimation / Eds. M. Sonis and G.J.D. Hewings. – Berlin: Springer, 2009. – P. 119–154.

4. **Giesecke J.A., Madden J.R.** Regional computable general equilibrium modeling // Handbook of Computable General Equilibrium Modeling. – 2013. – V. 1. – P. 379–475.

5. **Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сулакшин С.С.** Применение вычислимых моделей в государственном управлении. – М.: Научный эксперт, 2007. – 304 с.

6. **Грассини М.** Проблемы применения вычислимых моделей общего равновесия для прогнозирования экономической динамики // Проблемы прогнозирования. – 2009. – № 2. – С. 30–48.

7. **Donaghy K.P.** CGE modeling in space: A survey // Handbook of Regional Growth and Development Theories / Eds. R.Capello, P. Nijkamp. – Cheltenham: P. Edward Elgar, 2009. – P. 389–422.

8. **Handbook of Computational Economics** / Eds. L. Tesfatsion, K.L. Judd. – Amsterdam, etc: North-Holland, 2006. – V. 2. – 904 p.

9. **Бахтизин А.Р., Макаров В.Л.** Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). – М.: Экономика, 2013. – 295 с.

10. **Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.** Компьютерное моделирование взаимодействия между муниципалитетами, регионами, органами государственного управления // Проблемы управления. – 2013. – № 6. – С. 31–40.

11. **Janssen M., Vries B., de.** The battle of perspectives: A multi-agent model with adaptive responses to climate change // Ecological Economics. – 1998. – No. 26. – P. 43–65.

12. **Макаров В.Л., Житков В.А., Бахтизин А.Р.** Регулирование транспортных потоков в городе – проблемы и решения // Экономика мегаполисов и регионов. – 2009. – № 3. – С. 2–7.

13. **Chen S.H., Yeh C.H.** Evolving traders and the business school with genetic programming: A new architecture of the agent-based artificial stock market // Journal of Economic Dynamics & Control. – 2001. – V. 25 (3). – P. 363–393.

14. **Noe T., Rebello M., Wang J.** Corporate financing: An artificial agent-based analysis // Journal of Finance. – 2003. – V. 58 (3). – P. 943–973.

15. **Parker D.C., Manson S.M., Janssen M.A., et al.** Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review // Annals of the Association of American Geographers. – 2003. – V. 93 (2) – P. 314–337.

16. **Matthews R.B., Gilbert N.G., Roach A., et al.** Agent-based land-use models: A review of applications // *Landscape Ecology*. – 2007. – V. 22 (10). – P. 1447–1459.
17. **Andreoni J., Miller J.H.** Auctions with artificial adaptive agents // *Games and Economic Behaviour*. – 1995. – V.10 (1). – P. 39–64.
18. **Марков Л.С., Маркова В.М., Котёлкин Д.Д.** Агент-ориентированный подход к моделированию отраслевой эволюции: угольная промышленность России // *Регион: экономика и социология*. – 2013. – № 4 (80). – С. 242–265.
19. **Уэрта де Сото Х.** Социально-экономическая теория динамической эффективности / Пер. с англ. В. Кошкина под ред. А. Куряева. – Челябинск: Социум, 2011. – 409 с.
20. **Gallegati M., Richiardi M.G.** Agent based models in economics and complexity // *Complex Systems in Finance and Econometrics* / Eds. E. Meyers, A. Robert. – N.Y.: Springer, 2011. – P. 30–53.
21. **Stanilov K.** Space in agent-based models // *Agent-Based Models of Geographical Systems* / Eds. A.J. Heppenstall et al. – Springer Science; Business Media B.V., 2012. – 760 p.
22. **Dawid H., Harting P., Neugart M.** Cohesion Policy and Inequality Dynamics: Insights from a Heterogeneous Agents Macroeconomic Model (December 2013). Bielefeld Working Papers in Economics and Management No. 26-2013. – URL: <http://ssrn.com/abstract=2369187> (дата обращения 17.03.2014).
23. **Wolf S., Fürst St., Mandel A., et al.** A multi-agent model of several economic regions // *Environmental Modelling & Software*. – V. 44. – P. 25–43.
24. **Gintis H.** The dynamics of general equilibrium // *Economic Journal*. – 2007. – V. 117. – P. 1280–1309.
25. **Фаттахов М.Р.** Агент-ориентированная модель социально-экономического развития мегаполисов (на примере г. Москвы): Автореф. дисс. ... канд. экон. наук / ЦЭМИ РАН. – М., 2011.
26. **Tsekeris T., Vogiatzoglou K.** Spatial agent-based modeling of household and firm location with endogenous transport costs // *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking*. – 2011. – V. 12 (2). – P. 77–98.
27. **Гамидов Т.Г., Доможиров Д.А., Ибрагимов Н.М.** Равновесные состояния открытой межрегиональной системы, порожденной оптимизационной межрегиональной межотраслевой моделью // *Вестник Новосибирского государственного университета. Сер.: Социально-экономические науки*. – 2013. – Т. 13, вып. 3. – С. 81–94.

Рукопись статьи поступила в редколлегию 19.06.2014 г.

© Суслов В.И., Доможиров Д.А., Костин В.С.,
Мельникова Л.В., Ибрагимов Н.М., Цыплаков А.А., 2014