

АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Лебедюк Эдуард Андреевич

аспирант кафедры математических методов в экономике РЭУ им. Г. В. Плеханова.

Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», 117997, Москва, Стремянный пер., д. 36.

E-mail: lebeduk93@gmail.com

В статье описано текущее состояние агентного моделирования – нового направления имитационного моделирования, которое имеет первостепенное значение в качестве инструмента исследования сложных гетерогенных децентрализованных социоэкономических систем. Выделены и исследованы основные области применения агентных моделей, приведены общепризнанные примеры моделей от первых попыток создания до современных достижений науки как зарубежных, так и отечественных исследователей в данной области. Автором на основе проведенного анализа текущего состояния предметной области агентного моделирования рассмотрены существующие сегодня проблемы и показаны дальнейшие перспективы развития агентного моделирования.

Ключевые слова: имитационное моделирование, агентное моделирование, экономические модели.

AGENT-BASED MODELLING: STATE AND PROSPECTS

Lebedyuk, Eduard A.

Post-Graduate Student of the Department for Mathematical Methods in Economics of the PRUE.

Address: Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow, 117997, Russian Federation.

E-mail: lebeduk93@gmail.com

The article describes the current condition of agent modeling – a new direction in imitation modeling, which is very important as a tool of researching complicated heterogeneous decentralized socio-economic systems. Key spheres of using agent models were identified and researched, examples of models starting from first attempts of building them to today's achievements of science both in Russian and abroad were provided. By analyzing the current condition of agent modeling the author discusses existing problems and shows further prospects of developing agent modeling.

Keywords: imitation modeling, agent modeling, economic models.

Агентное моделирование – относительно новое направление в имитационном моделировании, используемое для исследования децентрали-

зованных систем, динамика функционирования которых определяется не глобальными правилами и законами (как в других парадигмах имитационного моде-

лирования), а наоборот, когда эти глобальные правила и законы являются результатом индивидуальной активности членов группы. Агентная модель представляет реальный мир в виде многих отдельно специфицируемых активных подсистем, называемых агентами (автономных объектов, целенаправленно функционирующих в конкретной среде по определенному набору правил, взаимодействующих друг с другом и адаптирующихся в процессе функционирования). Обычно в таких системах не существует глобального централизованного управления, агенты функционируют по своим законам асинхронно. Поведение агентов регулируется их собственной схемой, т. е. когнитивной структурой, которая определяет, какое действие агент предпринимает в момент времени t с учетом его восприятия окружающей среды. Существует множество определений понятия агента. Общим во всех определениях этого понятия является то, что агент – это некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, которая может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением и другими агентами, а также может самостоятельно изменяться (эволюционировать). Основываясь на простых правилах поведения и взаимодействия агентов, естественные системы явно проявляют групповой интеллект.

Таким образом, с точки зрения практического применения агентное моделирование можно определить как метод имитационного моделирования, исследующий поведение децентрализованных агентов и то, как это поведение определяет поведение всей системы в целом.

Можно выделить следующие причины появления агентного моделирования:

- все большее повышение сложности изучаемых систем;
- дерегуляция и децентрализация процесса принятия решений в исследуемых системах (агентное моделирование позволяет любому агенту принимать решения);

- простота описания работы отдельного агента в сравнении со сложностью описания системы (моделирование снизу вверх);

- увеличение вычислительных возможностей.

Применение агентного моделирования позволяет выявлять, как значительные социальные последствия рождаются из небольших и на первый взгляд даже незначительных факторов, определяющих поведение и взаимодействие многих агентов.

Агентное моделирование является инструментом, при помощи которого возможно успешное моделирование сложных адаптивных систем. В основе модели лежит набор основных элементов, из взаимодействия которых рождается обобщенное поведение системы. Важно понимать, что в данном случае задача состоит не в том, чтобы найти оптимальное экономическое равновесие, а попытаться понять природу в основе сложных социальных явлений. Возникающее поведение (*emergent behavior*) представляет собой результат взаимодействия элементов системы. Соответственно, в рамках данного подхода к моделированию возникает необходимость корректно отобразить механизм поведения и взаимодействия элементов системы, так называемых агентов. Агентами, например, могут быть не только индивидуумы (продавцы, покупатели, избиратели и т. п.), но также и социальные группы – семьи, компании и т. п.

Агентные модели состоят из агентов, которые взаимодействуют в среде. Агенты – это либо отдельные компьютерные программы, либо части программы, которые используются для представления социально-экономических субъектов – отдельных людей, организаций, таких как фирмы или государственные органы, различные институты и государства. Они запрограммированы реагировать на окружающую среду, в которой они находятся, и эта среда является моделью реальной среды, в которой действуют социально-экономические субъекты. Ключевая особенность

агентных моделей заключается в том, что агенты могут взаимодействовать, т. е. они могут передавать информационные сообщения друг другу и действовать на основе информации, получаемой из этих сообщений. Сообщения могут представлять собой как непосредственный диалог между людьми, так и косвенные средства информационного взаимодействия, такие как наблюдение за взаимодействием других агентов или обнаружение последствий действий другого агента. Возможность моделирования таких взаимодействий между агентами является ключевым отличием агентного моделирования от других типов моделей.

Для экономических моделей основным элементом выступает некоторое количество взаимодействующих между собой агентов. Одно из наиболее полных определений агентов приводят Чарльз Макал и Михаэль Норт [10], согласно которому агент должен обладать следующими характеристиками:

- быть идентифицируемым, т. е. представлять собой конечного индивидуума с набором определенных характеристик и правил, определяющих его поведение и правила принятия решений. Агент автономен и может независимо действовать и принимать решения по взаимодействию с другими агентами;
- находиться в определенной среде, позволяющей ему взаимодействовать с другими агентами. Агент может взаимодействовать с другими агентами (контактировать при определенных условиях и отвечать на контакт);
- иметь определенную цель (но не обязательно целью является максимизация блага), влияющую на его поведение;
- обладать гибкостью и способностью самообучения с течением времени на основе собственного опыта. В ряде случаев агент может даже изменять правила поведения на основе полученного опыта.

Окружающая среда

Это виртуальный мир, в котором действуют агенты. Это может быть как полно-

стью нейтральная среда с небольшим или нулевым воздействием на агентов, либо тщательно детализированная окружающая среда, как и сами агенты. Обычно среда представляет собой географическое пространство. Например, в моделях сегрегации окружающая среда моделирует особенности города, в модели международных отношений границы между государствами являются одним из ключевых элементов модели [4].

Модели, в которых среда представляет собой географическое пространство, называются пространственно определенными (spatially explicit). В таких моделях среда может представлять собой не реальное географическое, а некоторое абстрактное пространство. Например, ученые могут быть смоделированы в пространстве знаний [7]. В любых пространственно определенных моделях агенты имеют координаты, и вне зависимости от типа пространства агенты определяют свое местоположение в нем. Альтернативным вариантом является отсутствие определенного пространства. Агенты связаны в сеть, в которой единственное отношение агента к другим – это список агентов, с которыми он соединен.

Ключевое свойство агентной модели – эмерджентность. Моделируя поведение агентов системы и взаимодействие агентов между собой и с внешней средой, исследователь получает информацию о поведении всей моделируемой системы.

Практически неограниченные возможности по программированию агентов позволяют исследователю создавать при необходимости очень сложные модели, в которых в деталях можно отразить процесс принятия решений. Особо следует подчеркнуть, что агентное моделирование позволяет моделировать иррациональные моменты принятия решений, на которых акцентирует внимание поведенческая экономика. В связи с этим агентное моделирование становится мощным инструментом поддержки принятия решений.

Рассмотрим наиболее известные направления применения агентных моделей: модели города; динамика мнений; поведение потребителей; цепочки поставок.

Модели города

В 1971 г. Шеллинг [11] предложил модель, объясняющую расовую сегрегацию в США. Эта модель достаточно общая и в настоящее время используется для анализа сегрегации по всему миру.

Модель представляет собой квадратную сетку ячеек – город, в котором агенты-домохозяйства размещаются случайным образом. Агенты бывают двух видов: «красные» и «зеленые». В каждой ячейке может быть только один агент либо ячейка может быть пустой. На каждом шаге симуляции каждое домохозяйство обзвоняет своих непосредственных соседей (восемь окружающих его клеток) и подсчитывает долю домашних хозяйств, которые имеют другой цвет. Если доля больше некоторого постоянного значения «терпимости», то домашнее хозяйство считает себя «недовольным» и решает переехать. Оно делает это, переходя на некоторую свободную ячейку на сетке. На следующем шаге новое домохозяйство может изменить баланс «терпимости» своих соседей, в результате чего некоторые из них станут «несчастливыми», что приводит к каскаду переселений. Для уровней порога «терпимости» (равного или превышающего 0,3) любое первоначальное распределение домашних хозяйств с течением времени становится сегрегированным (выделяются кластеры «красных» и «зеленых» домохозяйств). Кластеризация происходит даже тогда, когда домохозяйства довольны проживанием рядом с большинством соседей другого цвета. Шеллинг интерпретирует полученные данные как указывающие на то, что даже довольно низкие степени расовых предрассудков могут привести к сильной сегрегации, что объясняет типичную картину для городов США в 1970-х гг. Модель Шеллинга имеет ряд преимуществ: во-первых, она корректно предсказывает появление кластеров до-

машних хозяйств одного цвета на основе одного только правила движения отдельных агентов; во-вторых, модель очень проста и имеет только один параметр – порог «терпимости»; в-третьих, появление кластеров довольно стабильно вне зависимости от изменения порога «терпимости», функции выбора места переезда или функции оценки удовлетворенности домохозяйства текущими соседями.

Динамика мнений

Эта группа моделей [3; 5] связана с исследованием политических, социальных и культурных трендов, например, распространения экстремистских идеологий. Рассмотрим одно такое исследование, хотя есть и ряд других, которые исследуют последствия различных предположений о механизмах распространения мнений [5]. В исследовании Дефюэнта одним из ключевых является вопрос: каким образом мнения, которые изначально считаются крайними и маргинальными, могут стать социальной нормой? Несколько примеров в мировой истории показывают, что крупные сообщества могут более или менее внезапно радикализироваться из-за влияния первоначально небольшого меньшинства. Германия в 1930-е гг. является особенно ярким примером такого процесса. В последние десятилетия первоначальное меньшинство радикальных исламистов сумело радикализировать существенный процент населения в странах Ближнего Востока. Но можно говорить и о менее драматических процессах, таких как мода. С другой стороны, можно также найти множество примеров, когда происходит сильная биполяризация населения, например, период холодной войны в Европе. В этих случаях все население становится экстремистским (выбирая одну или другую сторону). В модели Дефюэнта у агентов есть мнение (число между -1 и 1) и степень сомнения относительно их мнения, называемого неопределенностью. Диапазон мнения агента определяется как мнение $\pm$ неопределенность. Агенты взаимодействуют случайным образом. Когда они встре-

чаются, один агент может влиять на другого, если их диапазоны мнений пересекаются. Если сегменты мнений не пересекаются, считается, что агенты настолько отличаются друг от друга в своих мнениях, что у них нет шансов повлиять друг на друга. Если сегменты мнений агентов i и j пересекаются, то агент j зависит от мнения агента i на сумму, пропорциональную разнице между их мнениями, умноженную на сумму пересечения и деленную на неопределенность агента i минус 1. Смысл этой формулы заключается в том, что неопределившиеся агенты влияют на других агентов меньше, чем агенты, уверенные в своем мнении. Каждый агент начинает со случайного мнения и среднего уровня неопределенности, за исключением нескольких экстремистов, тех, кто имеет самые положительные или отрицательные мнения и очень низкий уровень неопределенности. В этих условиях экстремизм распространяется, и в конечном итоге симуляция достигает устойчивого состояния, когда все агенты присоединяются к экстремистам на том или другом конце континуума мнений. Без определенных экстремистов агенты приходят к среднему мнению. Таким образом, модель показывает, что несколько экстремистов с ярко выраженными мнениями могут оказать существенное влияние на мнение большинства.

Поведение потребителей

Компании стремятся понять, что влияет на решение клиентов о покупке их продуктов. И хотя качество продуктов важно, но также важно влияние друзей и семьи, рекламы, моды и ряда других социальных факторов. Чтобы исследовать сложные взаимодействия между ними, некоторые исследователи начали использовать агентные модели, в которых действуют агенты-потребители. Например, в модели Янссена и Ягера [9] исследуются процессы, ведущие к ситуации барьера смены на потребительских рынках. Барьер смены возникает в случае, когда один из нескольких конкурирующих продуктов достигает такой степе-

ни доминирования на рынке, что потребителям сложно переключиться на конкурирующие продукты. Обычно цитируются примеры QWERTY-раскладки (доминирующей над другими раскладками) операционными системами Windows (доминирующими над Apple и Linux). Янссен и Ягер сосредотачиваются на поведенческих процессах, которые приводят к блокировке, поэтому они дают своим агентам правила принятия решений, которые психологически правдоподобны и тщательно оправданы с точки зрения поведенческих теорий, например, социальное сравнение и подражание.

Другим примером моделирования потребителей является исследование рынка поддержанных автомобилей, где есть качественная изменчивость (различное качество для разных товаров) и неопределенность качества (трудно понять качество товара перед фактом покупки и началом использования) [8]. В исследовании рассматривается, как изменчивость качества может повредить рынок и повлиять на доверие потребителей. Есть два типа агентов: покупатель и продавец. Продавцы продают продукты путем расчета минимальной цены, за которую они готовы продать продукт, а покупатели покупают товары, предлагая цену, основанную на ожидаемом качестве продукта. Ожидаемое качество либо основывается на опыте самого агента, либо накапливается у агентов его социальной сети. Социальная сеть создается путем случайного соединения пар агентов с параметрами количества связей и силы связи. Было обнаружено, что без социальной сети потребительское доверие упало до такой степени, что рынок стал нежизнеспособным, тогда как с социальной сетью агрегирование собственного опыта агента и коллективного опыта других агентов помогает сохранить стабильность рынка.

Цепочки поставок

Производители товаров часто покупают компоненты, материалы и полуфабрикаты у других организаций и продают свою

продукцию дистрибьюторам. В конечном итоге продукт достигает пользователя путем сложных межорганизационных отношений, необходимых для доставки продукта. Максимизация эффективности цепочек поставок, связывающих предприятия, становится все более важной и все более сложной, поскольку продукты состоят из большого числа частей широкой географии, при этом предприятие стремится сократить запасы и увеличить доступность товаров. Моделирование цепочек поставок – хороший способ изучения процессов выполнения заказов и эффективности политики управления предприятием. Для этой цели все чаще используются агентные модели, которые хорошо сочетаются с задачей моделирования цепочек поставок, поскольку задействованные предприятия могут быть смоделированы как агенты, каждый из которых имеет свои собственные правила инвентаризации. Также легко моделировать поток продуктов по цепочке и поток информации (объемы заказов и время выполнения) от одной организации к другой.

Штрадер сравнивал три политики выполнения заказов [12]:

- изготовление по заказу, когда производство инициируется заказами клиентов;
- сборка по заказу, когда компоненты производятся и хранятся на складе, а окончательная сборка осуществляется под заказ;
- изготовление на склад, когда производство зависит от уровня запасов.

Он экспериментировал с разным объемом обмена информацией между организациями и обнаружил, что в цепочках поставок, которые они смоделировали, стратегия сборки по заказу, а также расширение обмена информацией о спросе между организациями в цепочке поставок наиболее эффективны. Штрадер также отметил, что его результаты подкрепляют общий вывод о том, что информация может уменьшить запасы: если у кого-то есть хорошая информация, неопределенность в отношении спроса может быть уменьшена и, как следствие, может быть уменьшен

необходимый уровень запасов для удовлетворения заказов.

Перспективы агентного моделирования впечатляют. Однако, несмотря на его колоссальный потенциал, существуют и проблемы агентного моделирования [6].

Агентные модели сложны для понимания. Результаты моделирования, которые могут быть получены при использовании модели, не могут быть спрогнозированы априори. Причиной этого является как высокая сложность и связность информационной системы, так и использование эмерджентных свойств модели для осуществления прогноза. Поэтому при разработке моделей важно грамотно сформулировать проблему и исходя из этого поставить задачу, что требует высокой экспертизы и опыта. В противном случае «мусорные» данные на входе дадут такой же результат и на выходе. Для того чтобы этого не произошло, модель необходимо разрабатывать, опираясь на полученные эмпирическими методами данные об агентах, их ценовых предпочтениях, мотивах выбора и т. п.

Кроме того, из-за относительной новизны данного подхода имитационного моделирования существует однообразие основного подхода: исследователи представляют в общем виде агентное моделирование как взаимодействие агентов друг с другом по определенным законам в рамках определенной внешней среды, однако отсутствуют более специфичные и углубленные направления. Фактически существующая литература описывает либо конкретные реализации агентных моделей, либо наиболее общие принципы построения агентных моделей. Но если мы говорим об агенте-человеке, то вне зависимости от сферы применения агентной модели можно говорить о его психоэмоциональном состоянии [1; 2], влияющем на его социально-экономическое взаимодействие с другими агентами. Тем не менее не существует общепризнанных в агентном моделировании обобщенных теорий, описывающих агента с данной стороны. Поэтому задача создания теории психоэмоционального состоя-

ния социально-экономического агента является первостепенной для развития агентного моделирования.

Выводы

Агентное моделирование – относительно новый метод, получивший широкое практическое распространение только после 2000 г. Системная динамика и дискретно-событийное моделирование рассматривают систему сверху вниз, работая на так называемом системном уровне. Агентное моделирование – это подход снизу вверх: создатель модели фокусируется на поведении индивидуальных объектов. Системная динамика предполагает высокий уровень абстракции и используется в основном для задач стратегического уровня. Процессно-ориентированный (дискретно-событийный) подход используется в основном на операционном и тактическом уровне. Спектр применения агентных моделей включает задачи любого уровня абстракции. В основе моделирования лежат абстрагирование и упрощение, которые должны зависеть от решаемой задачи. Например, использование системной динамики для моделирования поведения автономных сущностей нецелесообразно, так

как лучше не вводить дополнительный уровень абстракции и соответствующих предположений, если возможно использование агентного моделирования. И наоборот, незачем использовать дискретно-событийное моделирование для непрерывных закономерностей, если есть системная динамика.

В настоящее время успешная деятельность практически во всех сферах экономики невозможна без моделирования поведения и динамики развития процессов, изучения особенностей развития экономических объектов, рассмотрения их функционирования в различных условиях, а программные и технические средства должны стать здесь первыми помощниками.

На основе проведенного анализа сущности и содержания метода агентного моделирования можно сделать ряд выводов:

- 1) это сравнительно новый класс моделей, основанный на программировании;
- 2) используя агентное моделирование, можно решать задачи высокого уровня сложности;
- 3) требуется развитие аппарата агентного моделирования в области описания социально-экономического агента.

Список литературы

1. Картвелишвили В. М., Лебедюк Э. А. Стимулы и математическая модель взаимосвязи эмоций экономических субъектов // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. – 2016. – № 4 (88). – С. 113–126.
2. Картвелишвили В. М., Лебедюк Э. А. Программные средства моделирования эмоционального тона социально-экономического взаимодействия субъектов // Менеджмент и бизнес-администрирование. – 2015. – № 3. – С. 132–136.
3. Клаус Н. Г. Применение агентного моделирования в анализе социальных конфликтов. Модель «Две этнические группировки. Предотвращение геноцида» // Методология, теория и история социологии : сборник научных статей : в 3 т. / под ред. В. И. Филоненко. – Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2012. – Т. 2. – С. 57–65.
4. Cederman L. Emergent Actors in World Politics: How States and Nations Develop and Dissolve. – Princeton University Press, 1997.
5. Deffuant G., Amblard F., Weisbuch G., Faure T. How Can Extremism Prevail? A Study Based on the Relative Agreement Interaction Model // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2002. – Vol. 5. – N 4.
6. Galan J. Errors and Artefacts in Agent-Based Modelling // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2008. – Vol. 12. – N 1.

7. Gilbert N., Pyka A., Ahrweiler P. Innovation Networks – A Simulation Approach // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2001. – Vol. 4. – N 3.
8. Izquierdo S., Izquierdo R. The Impact of Quality Uncertainty without Asymmetric Information on Market Efficiency // *Journal of Business Research*. – 2007. – Vol. 60. – P. 858–867.
9. Janssen M., Jager W. An Integrated Approach to Simulating Behavioural Processes: A Case Study of the Lock-In of Consumption Patterns // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 1999. – Vol. 2. – N 2.
10. Macal C., North M. Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation // *Journal of Simulation*. – 2010. – Vol. 4. – P. 151–162.
11. Schelling T. *Micromotives and Macrobehavior*. – WW Norton and Company, 1978.
12. Strader T. Simulation of Order Fulfillment in Divergent Assembly Supply Chains // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 1998. – Vol. 1. – N 2.

References

1. Kartvelishvili V. M., Lebedyuk E. A. Stimuly i matematicheskaya model' vzaimosvyazi emotsiy ekonomicheskikh sub'ektov [Incentives and Mathematic Model of Emotion Interrelation of Economic Entities]. *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plekhanova* [Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics], 2016, No. 4 (88), pp. 113–126. (In Russ.).
2. Kartvelishvili V. M., Lebedyuk E. A. Programmnye sredstva modelirovaniya emotsional'nogo tona sotsial'no-ekonomicheskogo vzaimodeystviya sub'ektov [Software of Modeling Emotional Tone of Social and Economic Interaction of Entities]. *Menedzhment i biznes-administrirovanie* [Management and Business Administration], 2015, No. 3, pp. 132–136. (In Russ.).
3. Klaus N. G. Primenenie agentnogo modelirovaniya v analize sotsial'nykh konfliktov. Model' «Dve etnicheskie gruppirovki. Predotvrashchenie genotsida» [Applying Agent Modeling in Analyzing Social Conflicts. The Model “Two Ethnic Groups. Preventing Genocide”]. *Metodologiya, teoriya i istoriya sotsiologii, sbornik nauchnykh statey* [Methodology, Theory and History of Sociology, collection of articles], in 3 vol., edited by V. I. Filonenko. Rostov na Donu, Publishing House YuFU, 2012, Vol. 2, pp. 57–65. (In Russ.).
4. Cederman L. *Emergent Actors in World Politics: How States and Nations Develop and Dissolve*. Princeton University Press, 1997.
5. Deffuant G., Amblard F., Weisbuch G., Faure T. How Can Extremism Prevail? A Study Based on the Relative Agreement Interaction Model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2002, Vol. 5, No. 4.
6. Galan J. Errors and Artefacts in Agent-Based Modelling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2008, Vol. 12, No. 1.
7. Gilbert N., Pyka A., Ahrweiler P. Innovation Networks – A Simulation Approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2001, Vol. 4, No. 3.
8. Izquierdo S., Izquierdo R. The Impact of Quality Uncertainty without Asymmetric Information on Market Efficiency. *Journal of Business Research*, 2007, Vol. 60, pp. 858–867.
9. Janssen M., Jager W. An Integrated Approach to Simulating Behavioural Processes: A Case Study of the Lock-In of Consumption Patterns. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 1999, Vol. 2, No. 2.
10. Macal C., North M. Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation. *Journal of Simulation*, 2010, Vol. 4, pp. 151–162.
11. Schelling T. *Micromotives and Macrobehavior*. WW Norton and Company, 1978.
12. Strader T. Simulation of Order Fulfillment in Divergent Assembly Supply Chains. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 1998, Vol. 1, No. 2.