

Научно-исследовательский журнал «Modern Economy Success»

<https://mes-journal.ru>

2025, № 2 / 2025, Iss. 2 <https://mes-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

Шифр научной специальности: 5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике (экономические науки)

УДК 330.47



¹ Бричев Т.Ю.,

¹ Московский финансово-промышленный университет Синергия

Агент-ориентированное моделирование как инновационный метод исследования социально-экономических процессов: методология и практика применения

Аннотация: в статье рассмотрен метод агент-ориентированного моделирования как инновационного инструмента исследования социально-экономических процессов. В исследовании использованы методы теоретического анализа, синтеза и систематизации научной литературы. Применены инструменты математического моделирования, включая теорию игр и статистический анализ. Представлена методология построения агентных моделей, включающая механизмы определения и классификации агентов, формализации их поведения через карты состояний, описания взаимодействий между агентами. Сформирована математическая модель рыночного взаимодействия с формализацией функций спроса, предложения и ценообразования. Систематизированы преимущества и ограничения метода агентного моделирования. Отмечено, что агент-ориентированное моделирование является эффективным инструментом исследования сложных социально-экономических систем, позволяющим учитывать гетерогенность агентов и моделировать эмерджентные явления. Практическая значимость метода подтверждается успешными примерами его применения в бизнесе, городском планировании и здравоохранении.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, имитационное моделирование, социально-экономические системы, карты состояний, теория игр, эмерджентность, поведенческие паттерны

Для цитирования: Бричев Т.Ю. Агент-ориентированное моделирование как инновационный метод исследования социально-экономических процессов: методология и практика применения // Modern Economy Success. 2025. № 2. С. 212 – 218.

Поступила в редакцию: 28 ноября 2024 г.; Одобрена после рецензирования: 30 января 2025 г.; Принята к публикации: 11 марта 2025 г.

¹ Brichev T.Yu.,

¹ Moscow Financial and Industrial University Synergy

Agent-based modelling as an innovative method of research of socio-economic processes: methodology and practice of application

Abstract: the article considers the agent-based modeling method as an innovative tool for studying socio-economic processes. The study uses methods of theoretical analysis, synthesis and systematization of scientific literature. The tools of mathematical modeling, including game theory and statistical analysis, are applied. The methodology for constructing agent-based models is presented, including mechanisms for defining and classifying agents, formalizing their behavior through state maps, and describing interactions between agents. A mathematical model of market interaction with formalization of the functions of demand, supply and pricing is formed. The advantages and limitations of the agent-based modeling method are systematized. It is noted that agent-based modeling is an effective tool for studying complex socio-economic systems, allowing one to take into account the heterogeneity of agents and model emergent phenomena. The practical significance of the method is confirmed by successful examples of its application in business, urban planning and healthcare.

Keywords: agent-based modelling, simulation modelling, socio-economic systems, state maps, game theory, emergent, behavioural patterns

For citation: Brichev T.Yu. Agent-based modelling as an innovative method of research of socio-economic processes: methodology and practice of application. Modern Economy Success. 2025. 2. P. 212 – 218.

The article was submitted: November 28, 2024; Approved after reviewing: January 30, 2025; Approved after reviewing: March 11, 2025

Введение

Актуальность исследования агент-ориентированного моделирования обусловлена возрастающей сложностью современных социально-экономических систем и необходимостью разработки более эффективных инструментов для их анализа и прогнозирования. Традиционные методы моделирования часто не способны учесть гетерогенность участников экономических процессов, их адаптивное поведение и сложные паттерны взаимодействия. В условиях цифровой трансформации экономики и общества, появления больших данных и развития вычислительных мощностей, агентное моделирование становится особенно востребованным, так как позволяет создавать детальные имитационные модели с учетом индивидуальных характеристик агентов и их взаимного влияния. Особую значимость данный метод приобретает при решении практических задач в различных сферах - от бизнес-планирования до государственного управления, где требуется прогнозирование поведения сложных систем и оценка последствий принимаемых решений. При этом систематизация методологических подходов и анализ практического опыта применения агентного моделирования представляют существенный научный и прикладной интерес.

Материалы и методы исследований

Исследование проведено на основе анализа и систематизации научной литературы в области агент-ориентированного моделирования, теории игр и имитационного моделирования. В работе использованы методы теоретического исследования: анализ, синтез, обобщение и систематизация существующих подходов к агентному моделированию социально-экономических процессов. В качестве иллюстративного материала разработана математическая модель рыночного взаимодействия продавцов и покупателей, включающая формализацию характеристик агентов, функций спроса, ценообразования и правил принятия решений. Методология исследования основана на междисциплинарном подходе, объединяющем экономическую теорию, математическое моделирование, теорию игр и компьютерные науки для ком-

плексного анализа возможностей и ограничений агент-ориентированного моделирования.

Результаты и обсуждения

В первую очередь, представляется необходимым раскрыть содержание термина «агент-ориентированное моделирование» (далее – агентное моделирование, АМ). Имитационное моделирование с использованием агентного подхода (ABM - Agent-Based Modeling) представляет собой инновационную методологию исследования сложных систем, где ключевой фокус направлен на изучение автономных единиц – агентов – и их влияния на макроуровневые процессы системы [6, р. 8-9]. Уникальность данного метода заключается в его способности анализировать широкий спектр агентов различной природы, включая человеческие (индивиды, общественные объединения, потребители), экономические структуры (государственные институты, территориальные субъекты, бизнес-единицы), технологические объекты (транспортные средства, автоматизированные системы) и природные явления (атмосферные образования, стихийные бедствия).

Ключевым элементом методологии является понятие агента – автономной сущности, способной принимать решения, взаимодействовать с другими агентами и окружающей средой, а также адаптироваться к изменяющимся условиям [11, р. 12-13]. Агенты могут представлять собой людей, организации, животных, транспортные средства или любые другие объекты, обладающие определенной степенью автономности в принятии решений.

Процесс создания агентной модели начинается с определения цели моделирования и выбора масштаба исследования [9, р. 1265-1266]. Затем происходит идентификация типов агентов, которые будут присутствовать в модели, и описание их ключевых характеристик. Для каждого типа агентов определяются правила поведения, включающие механизмы принятия решений, способы взаимодействия с другими агентами и окружающей средой, а также возможности для обучения и адаптации. Функционирование каждого агента в модели определяется специальным инструментом – картой состояний («statechart»), которая представ-

ляет собой индивидуальную программу поведения. Этот механизм позволяет детально моделировать специфические характеристики разнообразных элементов социально-экономических систем, включая как одушевленные объекты (человеческий фактор), так и неодушевленные (промышленные объекты, транспорт) и природные системы.

Карта состояний представляет собой усовершенствованную версию конечного автомата, дополненную инновационными элементами, разработанными Давидом Харелом [10, р. 390-392]. Эта концепция получила широкое признание в профессиональном сообществе и была интегрирована в унифицированный язык моделирования (UML). С помощью карт состояний можно визуально отображать все возможные состояния агента, механизмы перехода между ними, триггерные события, временные интервалы и последовательность действий на протяжении всего жизненного цикла агента. Особая структура вложенных состояний обеспечивает возможность моделирования различных режимов функционирования агента.

Современные технологии позволяют создавать агентов с множественными взаимосвязанными картами состояний, работающими параллельно и отвечающими за различные аспекты деятельности (например, производственные процессы, финансовые операции). Техническая реализация агентных моделей осуществляется через специализированные программные платформы, поддерживающие объектно-ориентированное программирование (ООП), такие как AnyLogic и NetLogo. Важно отметить, что агентное моделирование является эффективным инструментом для практического применения методологии теории активных систем.

Эффективное управление подобными системами требует предварительного моделирования поведенческих паттернов активных элементов, их взаимного влияния и реакции на внешнюю среду [3, с. 4-6]. Современные агентные модели часто интегрируют принципы теории игр – математического аппарата для анализа оптимальных стратегий в ситуациях состязательного взаимодействия. В игровых ситуациях несколько участников преследуют собственные цели, используя различные стратегии, успешность которых зависит от действий других игроков. Теория игр предоставляет инструмент для выбора оптимальных стратегий с учетом возможных действий и ресурсов других участников.

В контексте мультиагентных систем стратегическое поведение каждого агента неразрывно связано с действиями других участников. Агенты, обладающие искусственным интеллектом или

подчиняющиеся внешнему управлению, могут формировать коалиции для координации действий. Одновременно между агентами может возникать конкурентное взаимодействие даже в рамках единой организационной структуры. Характерным примером служит соперничество дочерних компаний холдинга за доступ к ограниченным инвестиционным ресурсам.

В процессе управления активными системами критически важно идентифицировать характер взаимодействия между агентами, определяя их склонность к кооперативному или конкурентному поведению [5, с. 200-204]. При этом следует учитывать динамический характер стратегий агентов, допускающий переключение между различными моделями поведения во времени. Функционирование агентов происходит в контексте определенного окружения, модель которого может включать разнообразные параметры, такие как общие макроэкономические показатели или характеристики рынков ресурсов и готовой продукции. Формирование адекватного описания этой среды является ключевым элементом моделирования. Особого внимания заслуживает наличие реципрокных связей между агентами и их окружением. Коллективная активность агентов способна существенно трансформировать параметры среды их функционирования. Показательным примером такого влияния является ситуация, когда массовое повышение цен производителями (при отсутствии регуляторных ограничений) провоцирует инфляционные процессы и девальвацию национальной валюты.

Взаимное влияние между агентами также носит двусторонний характер, что проявляется в зависимости индивидуальных решений от поведения других участников системы. Характерной иллюстрацией служит феномен социального доказательства в потребительском поведении, когда выбор покупателей определяется предпочтениями большинства.

Моделирование индивидуального поведения агентов представляет значительную сложность в силу многообразия их характеристик [4, с. 115-117]. Для преодоления этой проблемы применяется методология группировки агентов по поведенческим паттернам с последующим усреднением характеристик внутри каждой группы. Примером такой классификации может служить отраслевая структуризация экономики, где предприятия одной отрасли рассматриваются как гомогенная группа. При обнаружении существенной гетерогенности внутри группы производится ее дальнейшая декомпозиция на подгруппы (например, разделение отрасли на более узкие сегменты) до

достижения приемлемого уровня поведенческой однородности участников.

В процессе сегментации агентов могут применяться различные аналитические инструменты, среди которых особое место занимает кластерный анализ – комплексный статистический метод, позволяющий систематизировать и группировать объекты на основе их характеристик. Данный метод, относящийся к категории алгоритмов машинного обучения без учителя, обеспечивает формирование относительно однородных групп путем обработки многомерных данных об исследуемых объектах.

Альтернативным подходом к классификации агентов является использование экспертных знаний о структуре моделируемой системы. Например, при анализе национальной экономики можно опираться на существующую отраслевую классификацию, отраженную в официальной статистике Росстата, которая выделяет такие секторы как электроэнергетика, нефтедобыча, нефтепереработка, металлургия и другие. Однако важно учитывать, что даже внутри одной отрасли могут существовать качественно различные типы экономических агентов.

Показательным примером служит нефтедобывающая промышленность, где функционируют компании различной специализации – добывающие предприятия, геологоразведочные организации, нефтесервисные компании [1, с. 126-127]. Каждый из этих типов компаний характеризуется специфическими стратегиями поведения, что исключает возможность их унифицированного моделирования. В то же время, внутри каждого типа наблюдается значительное сходство поведенческих паттернов независимо от масштаба деятельности компаний. Это позволяет при моделировании национальной экономики рассматривать в качестве отдельных агентов группы компаний, объединенных как отраслевой принадлежностью, так и функциональной спецификой.

Особое внимание уделяется верификации и валидации модели [2, с. 40-42]. Верификация подразумевает проверку корректности реализации заложенных в модель механизмов и правил. Валидация направлена на подтверждение соответствия результатов моделирования реальной системе. Процесс калибровки модели включает настройку параметров для достижения наилучшего соответствия результатов моделирования имеющимся эмпирическим данным. При этом важно учитывать возможную чувствительность модели к изменению параметров. Анализ результатов моделирования может включать различные методы, такие как статистический анализ, визуализация данных, ис-

следование «emerging patterns» (возникающих паттернов), анализ чувствительности и сценарный анализ. Важным аспектом методологии является документирование всех этапов создания и использования модели, включая описание предположений, ограничений и неопределенностей. Это необходимо для обеспечения воспроизводимости результатов и возможности дальнейшего развития модели.

При использовании агентного моделирования следует учитывать его особенности и ограничения. К преимуществам метода относятся возможность учета гетерогенности агентов, естественное представление пространственных аспектов, способность моделировать эмерджентные явления. Ограничения включают высокие требования к вычислительным ресурсам, сложность валидации моделей и необходимость большого количества данных для калибровки.

Акцентируем особое внимание на то, каким образом применяется АМ. В экономике и бизнесе агентное моделирование активно используется для анализа потребительского поведения и рыночной динамики. Например, компания «Procter & Gamble» применяет агентные модели для прогнозирования реакции потребителей на новые продукты и маркетинговые кампании [7, р. 26]. Модели помогают симулировать процессы распространения информации о товаре через социальные сети и оценивать эффективность различных стратегий продвижения. В финансовой сфере агентные модели используются для анализа фондовых рынков, где трейдеры представлены как отдельные агенты с различными стратегиями торговли. В городском планировании и транспортной логистике агентное моделирование помогает оптимизировать транспортные потоки и инфраструктуру. Например, в Сингапуре используется система «SimMobility», основанная на агентном моделировании, для планирования развития городской транспортной сети [8, р. 12-14].

Так, например, может выглядеть агентная модель взаимодействия продавцов и покупателей на рынке с учетом ценовой динамики:

1. Определение агентов: Покупатели ($i = 1, \dots, n$); Продавцы ($j = 1, \dots, m$);

2. Характеристики покупателей: $B_i(t)$ – бюджет i -го покупателя в момент времени t ; $W_i(t)$ – готовность платить (максимальная приемлемая цена) i -го покупателя; $D_i(t)$ – желаемое количество товара i -го покупателя; $S_i(t)$ – удовлетворенность i -го покупателя;

3. Характеристики продавцов: $P_j(t)$ – цена j -го продавца в момент времени t ; $Q_j(t)$ – доступное количество товара у j -го продавца; $R_j(t)$ – выручка

j -го продавца; C_j – издержки j -го продавца; $M_j(t)$ – маржинальность j -го продавца;

4. Функция спроса для каждого покупателя:

$$D_i(t) = f(B_i(t), W_i(t), P_j(t)) \quad ;$$

$$S_i(t) = \beta_1 * (W_i(t) - P_j(t))/W_i(t) + \beta_2 * \min(D_i(t), Q_j(t))/D_i(t),$$

где β_1, β_2 – весовые коэффициенты;

5. Функция ценообразования продавца:

$$P_j(t+1) = P_j(t) * (1 + \gamma_j * (\sum D_i(t) - Q_j(t))/Q_j(t))$$

где γ_j – коэффициент корректировки цены;

6. Функция прибыли продавца:

$$\pi_j(t) = P_j(t) * \min(\sum D_i(t), Q_j(t)) - C_j * Q_j(t);$$

7. Правила принятия решений:

Для покупателей:

IF $P_j(t) \leq W_i(t)$ AND $P_j(t) \leq B_i(t)$ THEN

Покупка = $\min(D_i(t), Q_j(t))$

ELSE

Покупка = 0;

Для продавцов:

IF $\sum D_i(t) > Q_j(t)$ THEN

$$D_i(t) = a_i * (W_i(t) - P_j(t)) / W_i(t),$$

где a_i – коэффициент эластичности спроса;

5. Функция удовлетворенности покупателя:

$$P_j(t+1) = P_j(t) * (1 + \gamma_j) \\ \text{ELSE IF } \sum D_i(t) < Q_j(t) * \theta_j \text{ THEN} \\ P_j(t+1) = P_j(t) * (1 - \gamma_j),$$

где θ_j – пороговый коэффициент загрузки;

9. Динамика рыночного равновесия:
 $\Delta P(t) = \lambda * (\sum D_i(t) - \sum Q_j(t))$, где λ – коэффициент скорости адаптации цен;

10. Функция адаптации покупателей:

$$W_i(t+1) = W_i(t) * (1 + \delta_i * (P_j(t) - W_i(t))/W_i(t)),$$

где δ_i – коэффициент адаптации готовности платить;

11. Агрегированные показатели рынка: Общий спрос: $D(t) = \sum D_i(t)$; Общее предложение:

$Q(t) = \sum Q_j(t)$; Средняя рыночная цена:

$$P(t) = \sum (P_j(t) * Q_j(t)) / \sum Q_j(t);$$

12. Метрики эффективности рынка:

Коэффициент рыночного равновесия:

$$E(t) = |D(t) - Q(t)| / Q(t);$$

13. Динамика маржинальности:

$$M_j(t) = (P_j(t) - C_j) / P_j(t);$$

14. Условия долгосрочного равновесия:

$$\lim(t \rightarrow \infty) |D(t) - Q(t)| \leq \varepsilon,$$

где ε – допустимое отклонение;

15. Функция обновления бюджета покупателей:

$$B_i(t+1) = B_i(t) + I_i - P_j(t) * D_i(t),$$

где I_i – периодический доход;

15. Оценка рыночной концентрации:

$$HHI(t) = \sum (Q_j(t) / Q(t))^2,$$

где HHI – индекс Херфиндала-Хиршмана;

17. Функция рыночной доли продавца:

$$MS_j(t) = Q_j(t) / Q(t).$$

Для эффективной практической реализации агентной модели рыночного взаимодействия оптимальным решением является использование системы имитационного моделирования «AnyLogic», которая предоставляет широкие возможности для создания и анализа сложных многоагентных систем.

Выводы

Методология агентного моделирования базируется на нескольких ключевых принципах. Во-первых, это определение и детальное описание характеристик агентов через карты состояний («statecharts»), позволяющие моделировать их поведение, механизмы принятия решений и способы взаимодействия. Во-вторых, важным аспектом является учет взаимосвязей между агентами, которые могут носить как кооперативный, так и конкурентный характер. В-третьих, существенное значение имеет моделирование среды функционирования агентов и их взаимного влияния на неё.

Практическое применение агентного моделирования демонстрирует широкий спектр возможностей в различных сферах. В бизнесе оно используется для анализа потребительского поведения и рыночной динамики (например, опыт «Procter &

Gamble»). В финансовой сфере – для моделирования поведения участников фондового рынка. В городском планировании – для оптимизации транспортных потоков (система SimMobility в Сингапуре).

Для эффективной реализации агентных моделей используются специализированные программные платформы, такие как AnyLogic и NetLogo, поддерживающие объектно-ориентированное программирование. Важными этапами разработки модели являются верификация и валидация, направленные на проверку корректности реализации механизмов и подтверждение соответствия результатов реальной системе.

Особое внимание уделяется проблеме классификации агентов, где применяются как методы кластерного анализа, так и экспертные подходы к

группировке. При этом учитывается необходимость достижения баланса между детализацией модели и её практической реализуемостью. Например, в экономическом моделировании используется отраслевая структуризация с учетом функциональной специфики предприятий.

Таким образом, агент-ориентированное моделирование представляет собой мощный инструмент исследования сложных социально-экономических систем, позволяющий учитывать индивидуальные характеристики участников, их взаимодействие и влияние на макроуровневые процессы. Практика применения демонстрирует эффективность данного подхода в решении широкого спектра практических задач в различных сферах деятельности.

Список источников

1. Арский А.А. Агентное моделирование в управлении отраслевыми логистическими системами // Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА. 2023. № 4. С. 125 – 129.
2. Бекларян Г.Л. Агентное моделирование и оптимизация характеристик научно-производственных кластеров // Бизнес-информатика. 2024. № 1. С. 36 – 51.
3. Исраилова С.Т. Основные аспекты имитационного моделирования бизнес-процессов предприятия с помощью сетей Петри и агентного моделирования // Новости науки Казахстана. 2021. № 1 (148). С. 1 – 8.
4. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л. и др. Агентное моделирование социально-экономических последствий миграции при государственном регулировании занятости // Экономика и математические методы. 2022. № 1. С. 113 – 130.
5. Суслов В.И., Доможиров Д.А., Ибрагимов Н.М. и др. Агентно-ориентированное моделирование на базе моделей Затраты-Выпуск // Модели, анализ и прогнозирование пространственной экономики / Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук. Новосибирск: Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, 2022. С. 196 – 225.
6. Agent-Based Modeling in the Philosophy of Science. Stanford Encyclopedia of Philosophy. [Электронный ресурс] // Доступ: <https://plato.stanford.edu/entries/agent-modeling-philsience/> (дата обращения: 30.09.2024)
7. Anthes G. Procter & Gamble and Others: Using Agent-Based Modeling for Supply Chain Management. 2003. P. 26 – 27. [Электронный ресурс] // Доступ: <https://higherred.mheducation.com/olc/dl/255639/10rwc3.pdf> (дата обращения: 30.09.2024)
8. Azevedo C.L. and other. SimMobility Short-Term: An Integrated Microscopic Mobility Simulator. Submitted to the 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington. 2016. 18 p.
9. Fischbach K., Marx J. Weitzel T. Agent-based modeling in social sciences // J Bus Econ. 2021. № 91. P. 1263 – 1270.
10. Jackson J.C., Rand D., Lewis K., Norton M.I., Gray K. Agent-Based Modeling: A Guide for Social Psychologists // Social Psychological and Personality Science. 2017. Vol. 8 (4). P. 387 – 395.
11. Monti C., Pangallo M., De Francisci Morales G. et al. On learning agent-based models from data // Sci Rep. 2023. № 13. 30 p.

References

1. Arskiy A.A. Agent-based modeling in the management of industry logistics systems. Bulletin of the Moscow Finance and Law University MFUA. 2023. No. 4. P. 125 – 129.
2. Beklaryan G.L. Agent-based modeling and optimization of the characteristics of research and production clusters. Business Informatics. 2024. No. 1. P. 36 – 51.
3. Israilova S.T. Key aspects of simulation modeling of enterprise business processes using Petri nets and agent-based modeling. Science News of Kazakhstan. 2021. No. 1 (148). P. 1 – 8.

4. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L. et al. Agent-based modeling of the socio-economic consequences of migration under state regulation of employment. *Economics and mathematical methods*. 2022. No. 1. P. 113 – 130.
5. Suslov V.I., Domozhirov D.A., Ibragimov N.M., et al. Agent-Based Modeling Based on Input-Output Models. *Models, Analysis, and Forecasting of Spatial Economics*. Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Novosibirsk: Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2022. P. 196 – 225.
6. Agent-Based Modeling in the Philosophy of Science. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. [Electronic resource]. Access: <https://plato.stanford.edu/entries/agent-modeling-philsience/> (accessed: 30.09.2024)
7. Anthes G. Procter & Gamble and Others: Using Agent-Based Modeling for Supply Chain Management. 2003. P. 26 – 27. [Electronic resource]. Access: <https://highered.mheducation.com/olc/dl/255639/10rwc3.pdf> (access date: 09/30/2024)
8. Azevedo C.L. and others. SimMobility Short-Term: An Integrated Microscopic Mobility Simulator. Submitted to the 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington. 2016. 18 p.
9. Fischbach K., Marx J. Weitzel T. Agent-based modeling in social sciences. *J Bus Econ*. 2021. No. 91. P. 1263 – 1270.
10. Jackson J.C., Rand D., Lewis K., Norton M.I., Gray K. Agent-Based Modeling: A Guide for Social Psychologists. *Social Psychological and Personality Science*. 2017. Vol. 8 (4). P. 387 – 395.
11. Monti C., Pangallo M., De Francisci Morales G. et al. On learning agent-based models from data. *Sci Rep*. 2023. No. 13. 30 p.

Информация об авторе

Бричев Т.Ю., аспирант, Московский финансово-промышленный университет Синергия, t.brichev@yandex.ru

© Бричев Т.Ю., 2025