

АКТУАЛЬНАЯ ТЕМА / ДИСКУССИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СТАТЬЯ

УДК: 330.47, 004.9

JEL: B41, C63, O32

EDN: UBTWOA

Аксиоматизация проектных решений при построении агентно-ориентированных моделей инновационно-технологических систем

М.А. Рыбачук^{1,2}¹ Центральный экономико-математический институт РАН, <https://ror.org/02n937p61>, Москва, Российская Федерация; e-mail: rybachuk@cemi.rssi.ru² Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, <https://ror.org/01hnrbb29>, Москва, Российская Федерация

Аннотация. В современных условиях стремительного технологического развития особенно актуально использование агентно-ориентированного моделирования (АОМ) для анализа и управления социально-экономическими и инновационно-технологическими системами. Целью данной работы является формализация методологии АОМ через аксиоматическое описание его структурных элементов для обеспечения теоретико-методологической основы изучения механизмов функционирования инновационно-технологической системы. Методы исследования включают в себя аналитический разбор структурных компонентов АОМ, а также их синтез на основе построения аксиоматической системы. Используются методы абстрагирования для выделения существенных признаков и сравнительного анализа подходов к построению агентно-ориентированных моделей. Такой методологический аппарат позволяет формализовать основные свойства АОМ и систематизировать знания в данной области.

Основным результатом исследования является аксиоматическое описание АОМ, отражающее его специфику как инструмента воспроизведения сложных и нелинейных процессов в реальных системах, а также выявление перспектив использования такого рода моделей в стратегическом планировании, цифровой трансформации и обеспечении технологического суверенитета страны через анализ уязвимостей национальных инновационных экосистем.

Показано, что аксиоматический подход способствует стандартизации и систематизации знаний о методологии АОМ, а также создает основу для разработки более гибких и интеллектуальных моделей. Это усиливает потенциал АОМ как универсального инструмента для анализа, прогнозирования и управления инновационно-технологическими системами в условиях глобальной нестабильности и технологической конкуренции.

Ключевые слова: агентно-ориентированное моделирование (АОМ), аксиоматический подход, методология моделирования, национальная инновационная экосистема, технологический суверенитет

Информация о финансировании: Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет бюджетных средств по государственному заданию Финансового университета.

Для цитирования: Рыбачук, М.А. (2025). Аксиоматизация проектных решений при построении агентно-ориентированных моделей инновационно-технологических систем. *Экономика науки*, 11(4), 38–51. EDN: UBTWOA

DISCUSSION

ORIGINAL RESEARCH ARTICLE

JEL: B41, C63, O32

EDN: UBTWOA

Axiomatization of project solutions in the construction of agent-based models of innovative technological systems

M.A. Rybachuk^{1,2}

¹ Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Science, <https://ror.org/02n937p61>, Moscow, Russian Federation; e-mail: rybachuk@cemi.rssi.ru

² Financial University under the Government of the Russian Federation, <https://ror.org/01hnrbb29>, Moscow, Russian Federation

Abstract. In the context of rapid technological development, the use of agent-based modeling (ABM) for analyzing and managing socio-economic and innovation-technological systems is especially relevant. The aim of this paper is to formalize the methodology of ABM through an axiomatic description of its structural elements to provide a theoretical and methodological foundation for studying the mechanisms of functioning of an innovation-technological system.

The research methods include the analysis and synthesis of the structural components of ABM, as well as abstraction and comparative analysis techniques. This methodological framework enables the formalization of the main properties of ABM and the systematization of knowledge in the field.

The main result of the study is an axiomatic description of ABM that reflects its nature as a tool for reproducing complex and nonlinear processes in real systems, as well as identifying the prospects for the use of such models in strategic planning, digital transformation, and ensuring technological sovereignty through the analysis of vulnerabilities in national innovation ecosystems.

Author demonstrated that the axiomatic approach contributes to the standardization and systematization of knowledge about ABM methodology and also creates a foundation for the development of more flexible and intelligent models. This enhances the potential of ABM as a universal tool for analysis, forecasting, and management of innovation-technological systems amid global instability and technological competition.

Keywords: agent-based modeling (ABM), axiomatic approach, modeling methodology, national innovation ecosystem, technological sovereignty

Funding: The article was prepared based on the results of research conducted with budgetary funds under a state assignment from the Financial University.

For citation: Rybachuk, M.A. (2025). Axiomatization of project solutions in the construction of agent-based models of innovative technological systems. *Economics of Science*, 11(4), 38–51. EDN: UBTWOA

ВВЕДЕНИЕ

Методология агентно-ориентированного моделирования (АОМ) развивается на протяжении последних двадцати пяти лет и применяется для анализа не только технических, но и социально-экономических систем (Bonabeau, 2002; Макаров & Бахтизин, 2009; Истратов, 2016). Данная методология, опирающаяся на компьютерное воспроизведение поведения автономных экономических агентов и их взаимодействия как между собой, так и с окружающей средой, обеспечивает возможность анализа эволюции сложных

динамических систем. Модели такого типа представляют собой виртуальные копии реальных процессов (цифровые двойники), где можно проводить вычислительные эксперименты, что позволяет не только прогнозировать возможные сценарии развития событий, но и снижать риски при стратегическом управлении, выявлять резервы повышения эффективности функционирования систем (Макаров и др., 2016).

АОМ находит применение в широком спектре экономических задач, связанных с анализом сложных систем, где ключевую роль играет поведение автономных субъектов

и их взаимодействие (например, Суслов и др., 2010; Ганюков и др., 2012; Макаров и др., 2017; Акбердина, 2018; Гулин и др., 2024).

Под инновационно-технологической системой будем понимать пространственно локализованный комплекс агентов (технологических компаний, инвестиционных фондов, научных организаций, потребителей инноваций и других), совокупность производственных и бизнес-процессов, проектных решений и инфраструктурных систем, взаимодействующих между собой с целью разработки, распространения и внедрения инновационных технологий в экономику и жизнь общества. Такой подход может быть применен на любом уровне экономической иерархии, однако для лучшей спецификации в этой статье мы будем рассматривать национальную инновационную экосистему – инновационно-технологическую систему на макроэкономическом уровне. Отметим, что представленное определение дано на базе системной экономической теории (например, Клейнер и др., 2020; Клейнер, 2023), согласно которой вся популяция систем, функционирующих в экономике, может быть разделена на четыре базовых типа: объектные, средовые, процессные и проектные.

Роль АОМ при проектировании, анализе и управлении инновационно-технологическими системами постепенно повышается (Маслобобов, 2010; Ma & Nakamori, 2005; Antonelli & Ferraris, 2011; Xiao & Han, 2016; Neves et al., 2019; Summad et al., 2023). В отличие от традиционных подходов, основанных на агрегированных показателях, эконометрических или равновесных моделях, АОМ позволяет исследовать микродинамику – динамику поведения и взаимодействия отдельных экономических агентов (предпринимателей, владельцев капитала, потребителей и иных), включая их адаптацию, принятие решений и реакции на изменения среды – и показать, как эти процессы, происходящие на микроуровне, порождают различные макроэффекты, например, такие как технологический прорыв, технологическая стагнация, успех нового продукта и другие.

В условиях глобальной технологической конкуренции и растущих рисков зависимости от иностранных программных решений

и технологий АОМ приобретает значение и в контексте технологического суверенитета. Причем в данном случае технологический суверенитет необходимо понимать не только как возможность производства высокотехнологичной продукции, собственных операционных систем или микроэлектронной элементной базы на национальном уровне, но и как способность страны формировать, развивать и контролировать собственную инновационную экосистему, способную производить новые прорывные технологии. АОМ можно использовать как средство оценки уязвимостей данной экосистемы – от чрезмерной зависимости от иностранных платформ до недостатка критически важных компетенций и высококвалифицированных специалистов. На базе агентно-ориентированных моделей могут разрабатываться меры по укреплению внутренних связей между подсистемами инновационно-технологической системы, стимулированию компаний к импортозамещающим разработкам и формированию устойчивых цепочек добавленной стоимости. В этом смысле можно говорить об АОМ не просто как об аналитическом инструменте, а как о части инфраструктуры технологического суверенитета – интеллектуальной основе поддержки и принятия решений относительно технологического будущего страны, позволяющей просчитать и оценить сценарии развития национальной инновационной экосистемы в условиях глобальной нестабильности, геополитических ограничений и усиления технологической конкуренции.

Цель данного исследования – формализовать методологию АОМ через аксиоматическое описание её структурных элементов, обеспечив теоретико-методологическую основу для изучения механизмов функционирования инновационно-технологической системы, а также для анализа влияния управленческих, институциональных и рыночных факторов на её динамику, устойчивость и траектории развития в стратегической перспективе. В работе уточняются этапы разработки агентно-ориентированных моделей для управления инновационно-технологической системой, выделяются её структурные элементы и даётся их аксиоматическое описание. Полученные

результаты в некотором смысле представляют собой попытку стандартизации процесса АОМ и упрощают процесс применения этого инструментария для формирования обоснованных проектных решений. В частности, разработанный подход может быть использован при определении приоритетов развития национальной инновационной экосистемы (Акбердина & Василенко, 2021; Данилина & Рыбачук, 2022; Езангина и др., 2023) и при разработке мер по укреплению технологического суверенитета страны (Дементьев, 2023; Клейнер, 2023, 2024; Сухарев, 2024; Чичканов & Сухарев, 2024).

Этапы разработки агентно-ориентированных моделей для управления инновационно-технологической системой

На базе анализа литературы, посвященной вопросам методологии АОМ (например, Gilbert & Bankes, 2002; Bruch & Atwell, 2015; Manson et al., 2020; Axtell & Farmer, 2025), можно определить последовательность восьми этапов, обеспечивающих целостность и результативность процесса моделирования.

Постановка цели и задач исследования. Начальным условием любой научно-исследовательской работы является формулирование цели и определение набора задач, которые стоят перед исследователем. Цель устанавливает требуемый уровень модельной детализации. Так, модель может быть в большей степени посвящена изучению процессов, происходящих на микроуровне, и фокусироваться, например, на индивидуальных характеристиках и поведении агентов; на мезоуровне – тогда приоритет получают связи агентов с другими членами сообщества, группы агентов, коалиции и другие; на макроуровне – глобальные результаты, возникающие как следствие взаимодействия агентов на других уровнях.

Несмотря на то, что агентно-ориентированные модели строятся, как правило, для исследования поведения конкретной системы в целом, необходимо отметить, что выбор уровня детализации – это определение того, какой уровень является основным объектом интереса, а какие, наоборот, необходимым

контекстом. Успешная модель будет больше детализирована на том уровне, где наилучшим образом раскрывается суть исследуемой проблемы, и достаточно абстрагирована на всех остальных уровнях.

Важной частью постановки задачи также является определение границ моделируемой системы. При построении моделей зачастую приходится прибегать к упрощениям и упускать второстепенные детали, с одной стороны, для облегчения восприятия пользователем, с другой стороны, для экономии ресурсов, направленных на разработку проектного решения.

Концептуализация модели. На этапе концептуализации модели формализуются ее ключевые компоненты, взаимодействия и процессы, которые считаются существенными для понимания и объяснения интересующего явления. Так, определяются действующие лица модели – агенты; пространство или контекст, в котором эти агенты действуют – среда; внутримодельные объекты, которые агенты могут потреблять, производить, обменивать или конкурировать за них – ресурсы; дискретные изменения в системе – события.

После того, как все сущности перечислены, описываются характеристики агентов, влияющие на их поведение. При этом важно, чтобы агенты не были перегружены избыточной сложностью, необходимо сосредоточиться на тех атрибутах, которые непосредственно влияют на исследуемую динамику. Затем проводится детальное описание взаимодействий агентов с друг другом и средой; также формулируются гипотезы о механизмах эмерджентности, то есть то, каким образом из локальных правил и взаимодействий агентов появляются глобальные изменения системы в целом.

В результате должна быть построена концептуальная схема модели, для чего широко используются графические и формальные средства (UML-диаграммы, концептуальные карты, причинно-следственные схемы).

Проектирование архитектуры модели. На этом этапе закладываются логические и вычислительные основы модели, от которых зависит как ее техническая реализуемость, так и способности по адекватному отражению динамики сложной системы. Изначально

требуется сделать выбор в пользу той или иной парадигмы моделирования – использовать АОМ в чистом виде или прибегнуть к гибридной архитектуре, комбинирующей АОМ, дискретно-событийное моделирование и системную динамику (Maidstone, 2012; Болсуновская и др., 2022).

Второй важный аспект проектирования архитектуры модели – определение временной шкалы. Исследователь решает, будет ли время в модели дискретным, разбитым на такты, или непрерывным, при котором события происходят в произвольные моменты времени. При дискретном времени дополнительно выбирается режим обновления состояний: синхронный – все агенты действуют соответствующим образом внутри каждого временного такта или асинхронный – агенты действуют независимо, по собственному расписанию или в ответ на события определенного типа.

Детализируется описание среды и выбирается ее топология, задается структура агентов, их иерархия и подклассы, разрабатываются механизмы принятия решений – от простых правил до сложных вложенных моделей, а также проектируется динамика ресурсов.

Программная реализация модели. Первоначально проводится выбор платформы и языка программирования, который, с одной стороны, определяется целями исследования и сложностью модели, а с другой стороны, требованиями к ее производительности и опытом разработчика. Так, для быстрого прототипирования и образовательных целей часто используются специализированные среды с визуальным интерфейсом, такие как NetLogo. Для масштабных научных экспериментов предпочтение отдают гибким фреймворкам на базе Python (фреймворк Mesa), Java (библиотеки Repast, MASON). В промышленных и прикладных задачах, особенно при необходимости гибридного моделирования, применяется платформа AnyLogic. Выбор инструмента влияет не только на скорость разработки, но и на возможности интеграции с внешними библиотеками, визуализацией и масштабированием.

Далее следует программная реализация ключевых компонентов модели: агентов, среды и механизмов их взаимодействий. При

необходимости проводится интеграция внешних данных (например, демографические показатели, экономические индикаторы, геопроцессуальные данные и иные). Такие данные используются для инициализации состояния агентов и среды, калибровки параметров или динамического обновления условий в ходе симуляции. Отметим, что интеграция требует тщательной предварительной обработки данных для корректного сопряжения с внутренними переменными модели.

Завершающий аспект реализации – создание механизмов сбора, анализа и представления выходных данных. Модель должна фиксировать ключевые метрики на всех уровнях: индивидуальное поведение агентов, характеристики взаимодействий, макроуровневые показатели системы. Для этого реализуются системы логирования, сбора агрегированных статистик и визуализации. Эти данные становятся основой для последующего анализа, интерпретации результатов и проверки гипотез.

Верификация модели. Центральным элементом верификации является сопоставление реализации с концептуальной моделью. Исследователь проверяет, правильно ли закодированы правила поведения агентов, корректно ли реализованы взаимодействия, точно ли отражена структура среды и соблюдена ли логика временной динамики.

Для проверки надежности модели применяется модульное тестирование. Расчетные значения, полученные, например, с помощью алгоритма распределения ресурсов, сравниваются с результатами работы этого алгоритма внутри модели. Отдельно проводится отладка и трассировка поведения агентов, которые помогают визуально проследить, как изменяются состояния агентов и среды такт за тактом с целью выявления логических ошибок. Число агентов для таких тестов, как правило, сокращается до минимально возможного для «ручного» контроля последовательности событий.

Также оценивается работа модели в экстремальных условиях – крайних и граничных случаях, ее устойчивость к пользовательским ошибкам.

Валидация модели. Если верификация обращена внутрь и оценивает, насколько корректно

работает модель по сравнению с исходным замыслом, то валидация, наоборот, направлена вовне. Основная задача данного этапа – убедиться, что модель и ее результаты соответствуют наблюдаемым или теоретически обоснованным характеристикам реального мира. Для этого результаты симуляций сравниваются с эмпирическими данными. При несовпадении проводится калибровка, то есть подбор таких значений параметров, при которых модель наилучшим образом воспроизводит реальные данные. В ситуациях, когда реальные данные недоступны, важную роль играет экспертная оценка, которая позволяет проверить правдоподобие поведения агентов и динамики системы на основе профессионального опыта. При отсутствии как данных, так и экспертов, проводится проверка внутренней согласованности модели и соответствие результатов теоретическим выводам (ожиданиям).

Дополнительно выполняется анализ чувствительности, который показывает, насколько устойчивы выводы модели к изменениям входных параметров.

Эксперименты и тестирование гипотез. На данном этапе проводится серия симуляций с варьированием параметров модели с целью выявления скрытых закономерностей и тестирования исследовательских гипотез в условиях, недоступных для натурного эксперимента.

Исследователь изменяет ключевые переменные – начальные условия, правила поведения агентов, структуру среды, силу взаимодействий или внешние воздействия для того, чтобы понять, как эти изменения влияют на динамику системы. Такие серии экспериментов позволяют выявить не только среднее поведение, но и диапазоны вариаций, границы устойчивости и критические точки, где система резко меняет свое состояние.

Для интерпретации полученных результатов используются статистические и визуальные методы. Статистический анализ включает расчет средних значений параметров и других показателей (например, дисперсии результатов, полученных в различных симуляциях), а также применение более сложных методов – кластеризации, анализа временных рядов или машинного обучения.

Документирование модели, распространение и репликация результатов исследования. С целью распространения результатов исследования и обеспечения его воспроизводимости требуется подготовка документации, охватывающей как концептуальные, так и технические аспекты модели. Наиболее признанным стандартом описания агентно-ориентированных моделей является протокол ODD (Overview, Design concepts, Details), предложенный в работе (Grimm et al., 2020). Отметим, что в отечественной литературе также имеются предложения по стандартизации описания экономико-математических моделей (например, Клейнер, 2001).

Второй шаг – публикация модели, ее кода и сопутствующих данных в открытых репозиториях (например, GitHub, GitLab, Zenodo, CoMSES Net), чтобы любой исследователь имел возможность запустить модель, повторить эксперименты и убедиться в корректности выводов.

Особое внимание уделяется поддержке модели для будущих исследований. Хорошо задокументированная и модульная реализация модели позволяет другим пользователям не просто воспроизвести результаты, но и расширять, адаптировать или интегрировать модель в новые контексты, например, добавлять новые типы агентов, изменять среду или комбинировать с другими моделями.

Структурные элементы агентно-ориентированных моделей

Для выполнения аксиоматического описания методов агентно-ориентированного моделирования рассмотрим структурные элементы такого рода моделей, которые можно выделить из методологии АОМ, описанной выше.

1. Агенты. Как было показано ранее, основным структурным элементом моделей являются агенты, каждый из которых обладает уникальными атрибутами (например, ресурсами, знаниями, целями, предпочтениями или другими индивидуальными характеристиками). Благодаря этому агентно-ориентированные модели могут с высокой степенью достоверности

передавать сложность и изменчивость реальных систем (Kaniyamattam, 2022; Marchi & Page, 2014; Jackson, 2016).

2. Среда (виртуальный мир). Среда задает контекст взаимодействия агентов. Пространство может быть представлено сеткой, графом или непрерывной плоскостью, где размещаются агенты и ресурсы – объекты, с которыми взаимодействуют агенты (товары, информация и другие). Фиксированные элементы среды, такие как дороги, серверы или законодательные нормы, формируют инфраструктуру, ограничивающую или направляющую поведение агентов.

3. Правила взаимодействия (как между агентами, так и агентов с окружающей средой). В моделях заранее устанавливаются правила поведения, которые определяют логику принятия решений агентами. Сюда относятся механизмы коммуникации (обмен сообщениями, сигналами, использование сетевых протоколов), а также алгоритмы разрешения конфликтов и достижения кооперации между агентами. Транзакции, такие как покупка или обмен ресурсами, служат инструментами реализации этих взаимодействий. Последние достижения позволяют использовать машинное обучение, обучение с подкреплением и нейронные сети для выведения или адаптации поведенческих правил непосредственно из данных, делая поведение агентов более реалистичным и динамичным (An et al., 2021; Kavak et al., 2018).

4. Временная динамика. В модели заранее устанавливаются временные интервалы, в рамках которых происходят изменения. Многие агентно-ориентированные модели работают в дискретном времени, и агенты, соответственно, обновляют свои состояния через регулярные интервалы. Такой подход, несмотря на свою простоту, может привести к избыточным вычислениям, если между временными тактами не происходит значимых событий (Mishra & Ishii, 2021). Дополнительно могут включаться различные события – триггеры, инициирующие те или иные действия агентов.

5. Механизмы обратной связи. Неотъемлемой частью системы являются механизмы обратных связей. Положительные обратные

связи усиливают системные тенденции, например, эффект «сарафанного радио» в маркетинге, когда популярность продукта растет экспоненциально. Отрицательные обратные связи, напротив, стабилизируют систему, как это происходит при регулировании спроса и предложения.

6. Целевые и варьируемые параметры. Целевые показатели (например, уровень прибыли или загрязнения окружающей среды) служат критериями для оценки эффективности системы. Варьируемые параметры, такие как налоги, цены или правила поведения, позволяют анализировать чувствительность модели к изменениям внешних условий и проводить симуляции и тесты различных исследовательских гипотез.

Отправной точкой построения семейства агентно-ориентированных моделей инновационно-технологической системы в целом является описание и характеристика ее структурных элементов. Результаты такого описания представлены в *таблице 1*.

Аксиоматическое описание агентно-ориентированных моделей и его применение для управления развитием инновационно-технологической системы

На основе представленных структурных элементов агентно-ориентированных моделей можно сформулировать систему аксиом, определяющих фундаментальные принципы и отличительные особенности АОМ и формирующих логическую основу для построения и анализа моделей инновационно-технологических систем.

Аксиома автономности агентов. Каждый агент обладает автономией – способностью принимать решения и действовать независимо на основе собственных правил и состояния окружения. Автономность подразумевает, что агенты не являются пассивными элементами системы, а представляют собой активных субъектов, способных принимать решения и совершать в виртуальном мире действия с опорой на внутреннюю логику. По этой причине с помощью агентно-ориентированных моделей возможно моделирование реалистичных сценариев, в которых участники системы (например, потребители, фирмы

Таблица 1. Структурные элементы семейства агентно-ориентированных моделей инновационно-технологической системы

Table 1. Structural elements of the family of agent-based models of the innovation-technological system

№ п/п	Структурный элемент	Характеристика
1	Агенты	Гетерогенные субъекты инновационно-технологической системы: исследовательские организации, университеты, технологические компании (стартапы, корпорации), инвесторы (венчурные фонды, бизнес-ангелы), государственные органы, операторы инфраструктуры, потребители инноваций (инновационных продуктов). Каждый тип агента характеризуется целями, ресурсами (знания, капитал, компетенции, имеющиеся технологии), стратегиями поведения (инвестирование, проведение НИОКР, внедрение, регулирование) и уровнем адаптивности.
2	Среда	Многоуровневая среда, включающая: (а) институциональную подсистему (нормы, законы, стандарты); (б) рыночную подсистему (спрос, конкуренция, стоимость технологий); (в) инфраструктурную подсистему (технопарки, лаборатории, цифровые платформы); (г) когнитивную подсистему (базы знаний, патентные фонды, научные сети). Среда задает ограничения и возможности агентов и может эволюционировать под их влиянием.
3	Правила взаимодействия	Правила взаимодействия определяют формы кооперации, конкуренции и обмена между агентами: заключение партнерств (научно-производственные кооперации), передача знаний (лицензирование, патентование, публикации), привлечение финансирования (гранты, инвестиции), формирование кластеров, участие в государственных программах. Взаимодействия могут быть как прямые (двусторонние), так и опосредованные через среду (например, через патентную систему или рынок технологий).
4	Временная динамика	Моделирование осуществляется в дискретном или непрерывном времени, и при этом необходимо учитывать существенные различия в темпах протекания различных процессов внутри инновационно-технологической системы. Некоторые явления происходят почти мгновенно, например, принятие решения инвестором о финансировании стартапа или реакция компании на изменение рыночной цены ресурса. Другие процессы имеют среднюю длительность (разработка прототипа нового продукта, подача заявки на патент или набор команды для исследовательского проекта) или долгую длительность (проведение фундаментальных исследований, вывод нового лекарства на рынок, регистрация и масштабирование производства). Также возможна синхронизация действий агентов по событиям (например, завершение НИОКР) или по временным шагам/тактам.
5	Механизмы обратной связи	Положительные контуры, усиливающие инновационную активность – сетевые эффекты, рост компетенций, накопление репутационного капитала или реинвестирование прибыли в НИОКР, а также отрицательные контуры, стабилизирующие систему – насыщение рынка инновационными продуктами, антимонопольные ограничения со стороны регулятора или ресурсные барьеры. Механизмы обратной связи реализуются через изменение состояния среды или адаптацию стратегий агентов.
6	Целевые параметры развития	Количественные и качественные индикаторы эффективности инновационно-технологической системы в целом: объем внутренних затрат на НИОКР, число патентов и патентных цитирований, доля высокотехнологичной продукции в ВВП, темпы технологического обновления, создание новых рабочих мест в технологических секторах и иные. Эти показатели служат для оценки сценариев развития инновационно-технологической системы и валидации построенных моделей.

Источник: составлено автором

Source: compiled by the author

и другие) действуют по собственным мотивам, а не по единому сценарию.

Аксиома гетерогенности. Агенты могут различаться по типам, атрибутам, целям и поведению, что отражает разнообразие, которым характеризуются реальные социально-экономические системы. Гетерогенность

позволяет учитывать индивидуальные особенности участников системы. Так, например, одни агенты могут быть склонны к экономии, другие, наоборот, к импульсивным покупкам; одни фирмы могут быть ориентированы на инновации, другие – на стабильность и минимизацию рисков.

Аксиома взаимодействия. Эволюция системы определяется локальными и глобальными взаимодействиями агентов между собой и с окружающей средой. В данном случае под взаимодействием понимается не просто обмен информацией, но и обмен ресурсами, конкуренция, кооперация, влияние агентами на общее состояние окружающей среды. При этом взаимодействия могут быть как прямыми (например, сделка между покупателем и продавцом), так и косвенными (например, изменение цен на рынке из-за поведения множества участников).

Аксиома эмерджентности. Сложные макроскопические свойства системы возникают как результат микровзаимодействий агентов. Эмерджентность является центральным понятием агентно-ориентированного моделирования. Агенты, действуя согласно некоторым правилам, порождают эффекты, затрагивающие всю систему в целом (например, паника в толпе или рыночное равновесие).

Аксиома адаптивности. Агенты способны изменять свое поведение в ответ на изменения среды или результаты взаимодействий. Адаптивность делает модели более динамичными и устойчивыми к изменяющимся условиям. Агент может «учиться»: например, стартап может оптимизировать свою технологическую стратегию – перейти с импортных программных решений на отечественные аналоги, скорректировать бизнес-модель в ответ на изменения спроса или наладить кооперацию с другими участниками экосистемы для совместной разработки критически важных решений. Современные подходы включают использование методов машинного обучения и обучения с подкреплением для моделирования такого поведения (например, Turgut & Bozdog, 2023).

Аксиома пространственно-временной динамики. Модель включает временную шкалу и пространственную структуру, где агенты перемещаются, взаимодействуют и влияют на модельное пространство. Аксиома подчеркивает, что расположение агентов и временные задержки играют ключевую роль в динамике системы. Например, технологическое отставание в такой критически значимой области, как разработка микросхем, не возникает внезапно, а формируется постепенно, в зависимости

от объема инвестиций, научно-технической инфраструктуры страны, а также от временных лагов между утратой доступа к иностранным технологиям и появлением отечественных аналогов.

Аксиома обратных связей. Система включает механизмы положительных и отрицательных обратных связей, которые усиливают или стабилизируют ее динамику. Обратные связи связывают результаты поведения агентов с их будущими действиями. Такого рода механизмы позволяют моделировать нелинейность и сложность поведения системы.

Аксиоматический подход к агентно-ориентированному моделированию не только формализует его методологию, но и закладывает основу для решения современных задач в условиях сложности, нестабильности и быстро меняющейся среды. Сочетание теоретической обоснованности и практической гибкости внутри агентно-ориентированных моделей делает их перспективным инструментом для анализа, прогнозирования и управления инновационно-технологическими системами.

Применим разработанную аксиоматику для описания семейства агентно-ориентированных моделей инновационно-технологической системы в двух разрезах: экономики инноваций и обеспечения технологического суверенитета страны. Результаты этого описания представлены в *таблице 2*.

Результаты, представленные в *таблице 2*, демонстрируют, что единая аксиоматическая основа АОМ позволяет, с одной стороны, гибко адаптироваться к различным исследовательским задачам – от моделирования экономики инноваций до обеспечения технологического суверенитета страны, с другой стороны, сохранить методологическое единство семейства агентно-ориентированных моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье выполнено аксиоматическое описание методов АОМ, что позволило формализовать его методологическую основу и выделить ключевые принципы, отличающие данный подход от других парадигм моделирования. На основе анализа структурных элементов АОМ (агентов, среды, правил взаимодействия,

Таблица 2. Описание семейства агентно-ориентированных моделей инновационно-технологической системы с позиции разработанной аксиоматики

Table 2. Description of a family of agent-based models of an innovation-technological system from the standpoint of the developed axiomatics

№ п/п	Аксиома	Экономика инноваций	Технологический суверенитет
1	Автономности агентов	Агенты (предприниматели, исследователи, инвесторы) самостоятельно принимают решения о направлениях НИОКР, инвестициях, партнерстве и стратегиях выхода на рынок, руководствуясь собственными целями максимизации прибыли, репутации или научных результатов.	Агенты (государственные корпорации, национальные регуляторы, критически важные предприятия) действуют в соответствии с приоритетом обеспечения технологической независимости, безопасности цепочек поставок и защиты национальных интересов, даже в ущерб краткосрочной экономической эффективности.
2	Гетерогенности	Существенная неоднородность агентов по ресурсам, компетенциям, доступу к знаниям и позиции на рынке: от стартапов с высокой гибкостью до крупных корпораций со сложной структурой и бюрократизацией процесса принятия решений; от частных венчурных фондов до государственных грантодателей.	Гетерогенность обусловлена степенью зависимости от внешних технологий: одни агенты (например, отечественные разработчики ПО) обладают высокой автономией, другие (производители микроэлектроники) – критической уязвимостью. Агенты также различаются по роли в обеспечении национальной технологической безопасности.
3	Взаимодействия	Кооперация осуществляется в рамках научно-производственных связей, процессов патентования, создания совместных предприятий. Агенты также могут конкурировать за долю рынка или высококвалифицированных сотрудников. Взаимодействия преимущественно носят рыночный характер.	Взаимодействия включают государственное регулирование, импортозамещение, создание замкнутых технологических цепочек как внутри страны, так и с дружественными странами, определение приоритетов распределения средств между оборонным и гражданским секторами, а также ограничение доступа иностранных агентов к критическим технологиям. Необходим акцент на координации действий агентов и контроле со стороны регулятора.
4	Эмерджентности	Возникновение макроуровневых явлений, таких как технологические кластеры, накопление и диффузия знаний, технологические прорывы, которые определяются результатами локальных решений и взаимодействий множества независимых агентов.	Формирование системной устойчивости или, напротив, уязвимостей на уровне национальной экономики. Так, например, зависимость производственных возможностей агентов от импортных микросхем может повлечь за собой кризис при наложении зарубежных санкций.
5	Адаптивности	Агенты обучаются на основе опыта – корректируют стратегии НИОКР, перераспределяют прибыль, меняют партнеров в ответ на рыночные сигналы, успехи или неудачи конкурентов. Адаптация направлена на повышение конкурентоспособности каждого агента по отдельности.	Агенты адаптируются к внешним шокам, таким как санкции или экспортные ограничения, перестраивая цепочки поставок, развивая дублирующие технологии и переходя на отечественные аналоги зарубежных комплектующих. Адаптация агентов направлена на снижение уязвимости и восстановление функциональной автономии системы в целом.
6	Пространственно-временной динамики	Инновации распространяются неравномерно во времени в привязке технологическим циклам и пространству, концентрируясь в технопарках и особых экономических зонах. Временные лаги между фундаментальными исследованиями и их коммерциализацией занимают длительное время.	Критические технологии требуют долгосрочного планирования, в то же самое время пространственная динамика связана с локализацией предприятий и критических технологий, созданием производственно-технологических анклавов с целью защиты от геополитических рисков. Стратегическая перспектива в данном случае преобладает над тактической.
7	Обратных связей	Обратные связи формируют цикличность и нелинейность инновационного процесса. Так, положительный контур обратной связи может быть следующим: «успех инновационного продукта → повышение репутации агента → рост объема инвестиций в производство → ...». Или, наоборот, отрицательный контур: «насыщение рынка → снижение прибыли агента → сокращение вложений в НИОКР → ...».	Обратные связи определяют устойчивость национальной технологической базы. Пример положительного контура обратной связи может быть следующим: «развитие компетенций отечественных производителей → снижение зависимости агентов от импортных комплектующих → рост суверенитета инновационно-технологической системы в целом → увеличение объема господдержки → ...». Пример отрицательного контура: «технологическое отставание компаний → рост уязвимости инновационно-технологической системы в целом → необходимость импорта иностранных решений → дальнейшее технологическое отставание → ...».

Источник: составлено автором

Source: compiled by the author

временной динамики, обратных связей и параметров моделирования) сформулировано семь фундаментальных аксиом: автономности, гетерогенности, взаимодействия, эмерджентности, адаптивности, пространственно-временной динамики и обратных связей. Данные аксиомы отражают суть АОМ как инструмента, способного воспроизводить поведение реальных социально-экономических и технических систем, зачастую характеризующихся сложностью и нелинейностью.

Аксиоматический подход обеспечил систематизацию знания о методологии АОМ, что облегчает стандартизацию и повышает воспроизводимость моделей. Это создает предпосылки для более широкого и успешного внедрения АОМ в практику анализа и управления сложными инновационно-технологическими системами.

АОМ позволяет не только описывать, но и прогнозировать поведение инновационно-технологических систем под воздействием различных факторов – от рыночной конкуренции до государственной политики. С помощью АОМ можно выявить как «точки роста», так и «узкие места» в технологических цепочках, оценить последствия инвестиционных решений и эффективность мер поддержки НИОКР. Построенные семейства агентно-ориентированных моделей могут стать инструментом оценки достижения страной технологического суверенитета и оценки рисков внешних шоков, например, в случае введения дополнительных санкций, а также тестирования сценариев импортозамещения. Таким образом применение АОМ способствует повышению управляемости инновационно-технологическими системами.

Перспективы развития АОМ связаны с дальнейшей интеграцией методов искусственного интеллекта для повышения реалистичности поведения агентов, а также с расширением применения АОМ в стратегическом планировании, устойчивом развитии и цифровой трансформации экономики. Особое значение приобретает использование АОМ в контексте технологического суверенитета, где модели помогают оценить уязвимости национальных инновационных экосистем и разрабатывать меры по их укреплению.

Предложенная аксиоматика не только систематизирует существующие знания, но и закладывает основу для создания более сложных, гибких и интеллектуальных моделей будущего, способных эффективно поддерживать принятие решений в условиях глобальной нестабильности, геополитических ограничений и усиления технологической конкуренции.

Благодарности/ Acknowledgements

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет бюджетных средств по государственному заданию Финансового университета.

The article was prepared based on the results of research conducted with budgetary funds under a state assignment from the Financial University.

Конкурирующие интересы/ Competing Interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflict of interest.

Список источников / References

1. Акбердина, В.В. (2018). Трансформация промышленного комплекса России в условиях цифровизации экономики. *Journal of New Economy*, 19(3), 82–99. EDN: XUEHAD, <https://doi.org/10.29141/2073-1019-2018-19-3-8>
Akberdina, V.V. (2018). The Transformation of the Russian Industrial Complex Under Digitalisation. *Journal of New Economy*, 19(3), 82–99. EDN: XUEHAD, <https://doi.org/10.29141/2073-1019-2018-19-3-8> (in Russian)
2. Акбердина, В.В., & Василенко, Е.В. (2021). Инновационная экосистема: теоретический обзор предметной области. *Журнал экономической теории*, 18(3), 462–473. EDN: DYGEEV, <https://doi.org/10.31063/2073-6517/2021.18-3.10>

- Akberdina, V.V., & Vasilenko, E.V. (2021). Innovation Ecosystem: Review of the Research Field. *Russian Journal of Economic Theory*, 18(3), 462–473. EDN: DYGEEV, <https://doi.org/10.31063/2073-6517/2021.18-3.10> (in Russian)
3. Болсуновская, М.В., Гинцьяк, А.М., Бурлуцкая, Ж.В., Петряева, А.А., Зубкова, Д.А., Успенский, М.Б., & Се-ледцова, И.А. (2022). Возможности применения гибридного подхода в моделировании социально-экономи-ческих и социотехнических систем. *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, (3), 73–86. EDN: MUIQUU, <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/3/73-86> (in Russian)
Bolsunovskaya, M.V., Gintciak, A.M., Burlutskaya, Z.V., Petryeva, A.A., Zubkova, D.A., Uspenskiy, M.B., & Seledtsova, I.A. (2022). The opportunities of using a hybrid approach for modeling socio-economic and socio-technical systems. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technolo-gies*, (3), 73–86. EDN: MUIQUU, <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/3/73-86> (in Russian)
 4. Ганюков, В.Ю., Ханова, А.А., & Сульдина, Н.В. (2012). Интеллектуальная система управления цепями по-ставок логистического предприятия на основе дискретно-событийной, агентной и системно-динамической имитационных моделей. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*, (2), 143–149. EDN: PAJWZN
Ganyukov, V.Yu., Khanova, A.A., & Suldina, N.V. (2012). Intelligence system of supply chain management of logistic company based on the discrete event, agent and system dynamic simulation models. *Vestnik of Astra-khan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, (2), 143–149. EDN: PAJWZN (in Russian)
 5. Гулин, К.А., Дианов, С.В., Алферьев, Д.А., & Дианов, Д.С. (2024). Методология агентного моделирова-ния развития территориальных систем лесозаготовительного производства. *Экономические и социаль-ные перемены: факты, тенденции, прогноз*, 17(6), 184–203. EDN: PPTUWK, <https://doi.org/10.15838/esc.2024.6.96.10>
Gulin, K.A., Dianov, S.V., Alfer'ev, D.A., & Dianov, D.S. (2024). Agent-based modeling methodology for the development of territorial logging systems. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 17(6), 184–203. EDN: TRJAUk, <https://doi.org/10.15838/esc.2024.6.96.10> (in Russian)
 6. Данилина, Я.В., & Рыбачук, М.А. (2022). Национальная инновационная экосистема как платформа социально-экономического развития страны. *Russian Journal of Economics and Law*, 16(2), 245–257. EDN: SNTDWP, <https://doi.org/10.21202/2782-2923.2022.2.245-257>
Danilina, Ya.V., & Rybachuk, M.A. (2022). National innovative ecosystem as a platform for the country's social-economic development. *Russian Journal of Economics and Law*, 16(2), 245–257. EDN: SNTDWP, <https://doi.org/10.21202/2782-2923.2022.2.245-257> (in Russian)
 7. Дементьев, В.Е. (2023). Технологический суверенитет и приоритеты локализации производства. *Terra Economicus*, 21(1), 6–18. EDN: COKINW, <https://doi.org/10.18522/2073-6606-2023-21-1-6-18>
Dementiev, V.E. (2023). Technological sovereignty and priorities of localization of production. *Terra Economicus*, 21(1), 6–18. EDN: COKINW, <https://doi.org/10.18522/2073-6606-2023-21-1-6-18> (in Russian)
 8. Езангина, И.А., Маловичко, А.Е., & Хрысева, А.А. (2023). Инновационная экосистема как новая форма организационной целостности и механизм финансирования и воспроизводства инноваций. *Финансы: теория и практика*, 27(3), 17–32. EDN: VPTIRR, <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-3-17-32>
Ezangina, I.A., Malovichko, A.E., & Khryseva, A.A. (2023). Innovation ecosystem as a new form of organizational integrity and a mechanism for financing and reproducing innovations. *Finance: Theory and Practice*, 27(3), 17–32. EDN: VPTIRR, <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-3-17-32> (in Russian)
 9. Истратов, В.А. (2016). Моделирование формирования социальных норм в общественных науках. *Эконо-мика и математические методы*, 52(4), 47–73. EDN: XEUGID
Istratov, V.A. (2016). Modelling norm emergence in social sciences. *Economics and the Mathematical Methods*, 52(4), 47–73. (in Russian)
 10. Клейнер, Г.Б. (2001). Экономико-математическое моделирование и экономическая теория. *Экономика и математические методы*, 37(3), 111–127. EDN: VUPJQD
Kleiner, G.B. (2001). Economic-mathematical modeling and economic theory. *Economics and the Mathematical Methods*, 37(3), 111–127. (in Russian)
 11. Клейнер, Г.Б., Рыбачук, М.А., & Карпинская, В.А. (2020). Развитие экосистем в финансовом секторе России. *Управленец*, 11(4), 2–17. EDN: QKJHHC, <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2020-11-4-1>
Kleiner, G.B., Rybachuk, M.A., & Karpinskaya, V.A. (2020). Development of ecosystems in the financial sector of Russia. *Upravlenets – The Manager*, 11(4), 2–17. EDN: QKJHHC, <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2020-11-4-1> (in Russian)
 12. Клейнер, Г.Б. (2023). Системная парадигма как теоретическая основа стратегического управления экономикой в современных условиях. *Управленческие науки*, 13(1), 6–19. EDN: DKKPBT, <https://doi.org/10.26794/2304-022X-2023-13-1-6-19>

- Kleiner, G.B. (2023). System paradigm as a theoretical basis for strategic economic management in modern conditions. *Management Sciences*, 13(1), 6–19. EDN: DKKPBT, <https://doi.org/10.26794/2304-022X-2023-13-1-6-19> (in Russian)
- 13.** Клейнер, Г.Б. (2024). Системная парадигма и теория технологий. *Terra Economicus*, 22(4), 6–18. EDN: BOVNWJ, <https://doi.org/10.18522/2073-6606-2024-22-4-6-18>
Kleiner, G.B. (2024). The systems paradigm and the theory of technology. *Terra Economicus*, 22(4), 6–18. EDN: BOVNWJ, <https://doi.org/10.18522/2073-6606-2024-22-4-6-18> (in Russian)
- 14.** Макаров, В.Л., & Бахтизин, А.Р. (2009). Новый инструментарий в общественных науках – агент-ориентированные модели: общее описание и конкретные примеры. *Экономика и управление*, (12), 13–25. EDN: LAAFXZ
Makarov, V.L., & Bakhtizin, A.R. (2009). New instruments in social sciences – agent-oriented models: general description and specific examples. *Economics and Management*, (12), 13–25. EDN: LAAFXZ (in Russian)
- 15.** Макаров, В.Л., Бахтизин, А.Р., & Сушко, Е.Д. (2016). Агент-ориентированные модели как инструмент апробации управленческих решений. *Управленческое консультирование*, 12(96), 16–25. EDN: XEAUXJ
Makarov, V.L., Bakhtizin, A.R., & Sushko, E.D. (2016). Agent-Based Models as a Means of Testing of Management Solutions. *Administrative Consulting*, 12(96), 16–25. EDN: XEAUXJ (in Russian)
- 16.** Макаров, В.Л., Бахтизин, А.Р., & Сушко, Е.Д. (2017). Регулирование промышленных выбросов на основе агент-ориентированного подхода. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*, 10(6), 42–58. EDN: YMWXFP, <https://doi.org/10.15838/esc/2017.6.54.3>
Makarov, V.L., Bakhtizin, A.R., & Sushko, E.D. (2017). Regulation of industrial emissions based on the agent-based approach. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 10(6), 42–58. EDN: YMWXFP, <https://doi.org/10.15838/esc/2017.6.54.3> (in Russian)
- 17.** Маслобоев, А.В. (2010). Формальные спецификации активных программных компонентов мультиагентной виртуальной бизнес-среды развития инноваций. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 3(67), 96–102. EDN: MBDYHH
Masloboev, A.V. (2010). Formal specifications of pro-active software components in the multi-agent virtual business environment of innovations development. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 3(67), 96–102. EDN: MBDYHH (in Russian)
- 18.** Суслов, С.А., Кондратьев, М.А., & Сергеев, К.В. (2010). Агентное моделирование как средство анализа и прогноза спроса на энергоресурсы. *Проблемы управления*, (2), 46–52. EDN: MQHUHR
Suslov, S.A., Kondratyev, M.A., & Sergeev, K.V. (2010). Agent-based modeling as a tool for analyzing and forecasting energy demand. *Control Sciences*, (2), 46–52. EDN: MQHUHR (in Russian)
- 19.** Сухарев, О.С. (2024). Технологический суверенитет России: формирование на базе развития сектора “экономика знаний”. *Вестник Института экономики Российской академии наук*, (1), 47–64. EDN: GBHZQW, https://doi.org/10.52180/2073-6487_2024_1_47_64
Sukharev, O.S. (2024). Technological sovereignty of Russia: formation on the basis of the development of the “knowledge economy” sector. *The Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, (1), 47–64. EDN: GBHZQW, https://doi.org/10.52180/2073-6487_2024_1_47_64 (in Russian)
- 20.** Чичканов, В.П., & Сухарев, О.С. (2024). Технологический суверенитет: способ измерения. *Экономические стратегии*, 26(1)193, 62–69. EDN: QEZUGZ, <https://doi.org/10.33917/es-1.193.2024.62-69>
Chichkanov, V.P., & Sukharev, O.S. (2024). Technological Sovereignty: Measurement Method. *Economic Strategies*, 26(1)193, 62–69. EDN: QEZUGZ, <https://doi.org/10.33917/es-1.193.2024.62-69> (in Russian)
- 21.** An, L., Grimm, V., Sullivan, A., Turner, B., Malleson, N., Heppenstall, A., Vincenot, C., Robinson, D., Ye, X., Liu, J., Lindkvist, E., & Tang, W. (2021). Challenges, tasks, and opportunities in modeling agent-based complex systems. *Ecological Modelling*, 457, 109685. EDN: MZCZSX, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109685>
- 22.** Antonelli, C., & Ferraris, G. (2011). Innovation as an emerging system property: an agent based simulation model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 14(2), 1. <https://doi.org/10.18564/jasss.1741>
- 23.** Axtell, R.L., & Farmer, J.D. (2025). Agent-based modeling in economics and finance: Past, present, and future. *Journal of Economic Literature*, 63(1), 197–287. EDN: BBYYLW, <https://doi.org/10.1257/jel.20221319>
- 24.** Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(3), 7280–7287. <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- 25.** Bruch, E., & Atwell, J. (2015). Agent-Based Models in Empirical Social Research. *Sociological Methods & Research*, 44(2), 186–221. <https://doi.org/10.1177/0049124113506405>
- 26.** Gilbert, N., & Banks, S. (2002). Platforms and methods for agent-based modeling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(3), 7197–7198. <https://doi.org/10.1073/pnas.072079499>

27. Grimm, V., Railsback, S.F., Vincenot, C.E., Berger, U., Gallagher, C., DeAngelis, D.L., Edmonds, B., Ge, J., Giske, J., Groeneveld, J., Johnston, A.S.A., Milles, A., Nabe-Nielsen, J., Polhill, J.G., Radchuk, V., Rohwäder, M.-S., Stillman, R.A., Thiele, J.C., & Ayllyn, D. (2020). The ODD protocol for describing agent-based and other simulation models: A second update to improve clarity, replication, and structural realism. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23(2), 7. EDN: JLOGU, <https://doi.org/10.18564/jasss.4259>
28. Jackson, J., Rand, D., Lewis, K., Norton, M., & Gray, K. (2016). Agent-Based Modeling. *Social Psychological and Personality Science*, 8(4), 387–395. <https://doi.org/10.1177/1948550617691100>
29. Kaniyamattam, K. (2022). 71 Agent-Based Modeling: A Historical Perspective and Comparison to Other Modeling Techniques. *Journal of Animal Science*, 100(Suppl. 3), 32–33. <https://doi.org/10.1093/jas/skac247.062>
30. Kavak, H., Padilla, J.J., Lynch, C.J., & Diallo, S.Y. (2018). Big data, agents, and machine learning: towards a data-driven agent-based modeling approach. In *Proceedings of the 2018 Annual Simulation Conference*. Article 12, 1–12. <https://doi.org/10.22360/springsim.2018.anss.021>
31. Ma, T., & Nakamori, Y. (2005). Agent-based modeling on technological innovation as an evolutionary process. *European Journal of Operational Research*, 166(3), 741–755. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.01.055>
32. Maidstone, R. (2012). *Discrete event simulation, system dynamics and agent based simulation: Discussion and comparison*. [White paper]. The University of Manchester. Retrieved October 20, 2025, from <https://personalpages.manchester.ac.uk/staff/robert.maidstone/pdf/MresSimulation.pdf>
33. Manson, S., An, L., Clarke, K.C., Heppenstall, A., Koch, J., Krzyzanowski, B., ... & Tesfatsion, L. (2020). Methodological issues of spatial agent-based models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23(1), 6. EDN: HWDYYL, <https://doi.org/10.18564/jasss.4174>
34. Marchi, S., & Page, S. E. (2014). Agent-Based Models. *Annual Review of Political Science*, 17, 1–20. <https://doi.org/10.1146/annurev-polisci-080812-191558>
35. Mishra, R., & Ishii, H. (2021). Event-triggered control for discrete-time multi-agent average consensus. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 33(1), 159–176. EDN: JPUYZE, <https://doi.org/10.1002/rnc.5815>
36. Neves, F., Campos, P., & Silva, S. (2019). Innovation and employment: an agent-based approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22(1), 8. <https://doi.org/10.18564/jasss.3933>
37. Summad, E., Al-Kindi, M., Al-Hinai, N., Shamsuzzoha, A., & Piya, S. (2023). The application of agent-based modelling for the diffusion of innovation research: a case study. *International Journal of Business Innovation and Research*, 30(4), 542–564. EDN: YHQHLE, <https://doi.org/10.1504/IJBIR.2023.130077>
38. Turgut, Y., & Bozdog, C.E. (2023). A framework proposal for machine learning-driven agent-based models through a case study analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 123, 102707. EDN: VHPAQX, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102707>
39. Xiao, Y., & Han, J. (2016). Forecasting new product diffusion with agent-based models. *Technological Forecasting and Social Change*, 105, 167–178. EDN: WVQAIH, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.01.019>

Информация об авторе

Рыбачук Максим Александрович – кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микроэкономического анализа и моделирования, Центральный экономико-математический институт РАН; ведущий научный сотрудник Института цифровых технологий, Финансовый университет при Правительстве РФ; SPIN-код: 9480–6850, Scopus Author ID: 57192371303, ResearcherID Web of Science: E-4002–2016, ORCID: 0000-0003-0788-5350 (Российская Федерация, 117418, Москва, Нахимовский пр-т, д.47; e-mail: rybachuk@cemi.rssi.ru).

Author

Maksim A. Rybachuk – Candidate of Economic Sciences, Leading Researcher of the Laboratory for Microeconomic Analysis and Modeling, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Science; Leading Researcher of the Institute for Digital Finance, Financial University under the Government of the Russian Federation; Scopus Author ID: 57192371303, ResearcherID Web of Science: E-4002–2016, ORCID: 0000-0003-0788-5350 (47, Nakhimovsky Pr., Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: rybachuk@cemi.rssi.ru).

Поступила в редакцию (Received) 31.10.2025

Поступила после рецензирования (Revised) 01.12.2025

Принята к публикации (Accepted) 11.12.2025