

Экономико-математические методы и модели Economic & mathematical methods and models

Научная статья

УДК 332.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.17610>



ОТКРЫТАЯ ПЛАТФОРМА АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКОНОМИКИ: КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Г.В. Бобылев  

Институт экономики и организации промышленного производства
Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Новосибирск, Российская Федерация

 georgiybobylev@gmail.com

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена потребностью в развитии агент-ориентированного моделирования (АОМ), особенно в контексте создания сложных моделей, охватывающих несколько отраслей и регионов. Ключевыми проблемами в этой области являются низкая скорость разработки моделей и недостаточная их связь с реальными процессами. Данная работа направлена на решение этих проблем, связанных с развитием агент-ориентированных моделей (АО моделей) пространственной экономики. Кроме того, исследование направлено на систематизацию опыта и знаний авторского коллектива в области платформ АОМ. Целью исследования является разработка концептуальной схемы открытой платформы для агент-ориентированного моделирования пространственной экономики (ОПАОМПЭ). Работа носит комплексный характер и основана на системном и структурном подходе и опирается, в том числе, на следующие направления научной литературы: вопросы развития цифровых и программных платформ, применение АОМ в системах поддержки и принятия решений, цифровой и пространственной экономике, применение агент-ориентированной многорегиональной модели «затраты–выпуск» для анализа российской экономики. В работе введено новое определение ОПАОМПЭ как инструментально-инфраструктурной цифровой платформы с открытой архитектурой, в основе которой находится программное обеспечение для разработки АО моделей. Платформа предназначена для совместной работы большого сообщества исследователей над крупными АО моделями экономики России и оказания услуг АОМ как сервиса. Предложена концептуальная схема ОПАОМПЭ, которая учитывает внешнюю среду, информационную инфраструктуру и пользователей из сфер индустрии, экономической науки и образования, а также органов власти. Описаны основные структурные элементы платформы. Применение ОПАОМПЭ очень перспективно благодаря ее потенциалу в решении широкого спектра научных и прикладных задач. Эту платформу можно использовать как часть системы поддержки и принятия решений в экономике. ОПАОМПЭ поможет органам власти и представителям индустрии анализировать возможные последствия принятия тех или иных решений. Экономическая наука и образование смогут использовать ОПАОМПЭ для решения различных задач в области пространственной экономики. Эта платформа может стать полезным инструментом для исследовательской работы при написании выпускных квалификационных работ по экономическим специальностям. Предложенная концептуальная схема ОПАОМПЭ обладает потенциалом применения для ее дальнейшей практической реализации.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, пространственная экономика, цифровая платформа, экономика региона

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках плана НИР ИЭОПП СО РАН, проект № 121040100262-7 (0260-2021-0007) «Инструменты, технологии и результаты анализа, моделирования и прогнозирования пространственного развития социально-экономической системы России и ее отдельных территорий».

Благодарности: Автор выражает большую признательность Александру Анатольевичу Цыплакову, канд. экон. наук, за ценные обсуждения и комментарии по вопросам этой работы.

Для цитирования: Бобылев Г.В. (2024) Открытая платформа агент-ориентированного моделирования пространственной экономики: концептуальные основы и практическое применение. *П-Economy*, 17 (6), 165–180. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.17610>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.17610>



AN OPEN PLATFORM FOR AGENT-BASED MODELING OF SPATIAL ECONOMICS: CONCEPTUAL FRAMEWORK AND PRACTICAL APPLICATION

G.V. Bobylev  

Institute of Economics and Industrial Engineering,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

 georgiybobylev@gmail.com

Abstract. The relevance of the study is due to the need to develop agent-based modeling (ABM), especially in the context of creating complex models covering several industries and regions. The key problems in this area include the low speed of model development and their insufficient connection with real-world processes. This work aims to address these problems related to the development of agent-based models (AB models) of spatial economics. Additionally, the study is aimed at systematizing the experience and knowledge of the author team in the field of ABM platforms. The goal of the research is to develop a conceptual framework for an open platform for agent-based modeling of spatial economics (OPABMSE). The work is comprehensive and is based on a systemic and structural approach and draws on, among others, the following areas of scientific literature: issues of development of digital and software platforms, application of ABM in decision support and decision-making systems, digital and spatial economics, application of agent-based multiregional input-output models for analyzing the Russian economy. The paper introduces a new definition of OPABMSE as an instrumental and infrastructural digital platform with an open architecture based on software for developing AB models. The platform is designed for joint work of a large community of researchers on large AB models of the Russian economy and the provision of ABM services. A conceptual framework for OPABMSE is proposed, which takes into account the external environment, information infrastructure, and users from industry, economic science and education, as well as government bodies. The main structural elements of the platform are described. The use of OPABMSE is very promising due to its potential in solving a wide range of scientific and applied problems. This platform can be used as part of a decision support and decision-making system in economy. OPABMSE will help government bodies and industry representatives analyze the possible consequences of making certain decisions. Economic science and education will be able to use OPABMSE to solve various problems in the field of spatial economics. This platform can become a useful tool for research work when writing graduate qualification papers in economic specialties. The proposed conceptual framework for OPABMSE has the potential for further practical implementation.

Keywords: agent-based modeling, spatial economics, digital platform, regional economy

Funding: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the research plan of the Institute of Economics and



Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project No. 121040100262-7 “Tools, technologies and results of analysis, modeling and forecasting of the spatial development of the socio-economic system of Russia and its individual territories” (0260-2021-0007).

Acknowledgements: The author expresses his deep gratitude to Alexander Anatolyevich Tsyplakov, Ph.D. in Economics, for valuable discussions and comments on the issues of this paper.

Citation: Bobylev G.V. (2024) An open platform for agent-based modeling of spatial economics: conceptual framework and practical application. *П-Economy*, 17 (6), 165–180. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.17610>

Введение

На первом этапе полезно разобраться, что такое агентные модели. В работе В.Л. Макарова, А.Р. Бахтизина и Дж.М. Эпштейна [1] говорится: «Классическая агентная модель представляет собой искусственное общество программных агентов. Они непосредственно взаимодействуют друг с другом в некоторой искусственной среде, которая может быть географическим ландшафтом, организацией или социальной сетью».

В работе А.А. Цыплакова и Л.В. Мельниковой [2] отмечается: «Агент-ориентированные модели состоят из компьютерных агентов и институциональной среды, в которой они взаимодействуют по определенным правилам. Суть агент-ориентированного подхода – проведение вычислительных экспериментов с такими моделями».

На данный момент экономическое агент-ориентированное моделирование (АОМ) достигло значительного прогресса. Однако не существует агент-ориентированной модели (АО модели), которая бы полностью (а не частично) представляла экономику, а также автоматически инициализировалась и калибровалась по реальным данным.

Во многом это объясняется тем, что разработка экономических моделей – сложный и трудоемкий процесс, требующий больших затрат рабочего времени исследователей. Он связан с тем, что в экономике задействовано множество видов различных агентов, каждый из которых действует по-своему. По этой причине разработка масштабных экономических АО моделей продвигается медленно, а их связь с реальными процессами остается слабой. Одним из ограничений разработки крупномасштабных АО моделей выступает также доступность вычислительных ресурсов. Так, в работе [3] подчеркивается важность эффективных подходов к разработке программного обеспечения и отдается предпочтение библиотекам и фреймворкам с открытым исходным кодом.

В Институте экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук (ИЭОПП СО РАН) проводятся работы по АОМ под руководством В.И. Сулова. Основное направление исследований – разработка агент-ориентированной межотраслевой многорегиональной модели «затраты–выпуск» (АОМММ) [4–8]. Эта модель описывает многорегиональное экономическое пространство России с учетом взаимодействия с другими странами и государственной политики. Ключевая особенность модели заключается в учете пространственного размещения агентов и транспортных расходов. По своей структуре АОМММ схожа с моделями общего равновесия, поскольку она представляет экономику в целом. В этой модели различные агенты, такие как фирмы, домохозяйства и государственные предприятия, взаимодействуют через товарные рынки, покупая и продавая товары. Цель модели – использовать ее для анализа влияния вариантов региональной промышленной и пространственной политики на развитие экономики [5].

Несмотря на значительный прогресс в этой области и усилия исследовательской группы, продвижение работ сталкивается с определенными проблемами, такими как медленная разработка модели и ее недостаточная связь с реальными процессами.

Мы предложили открытую платформу для агент-ориентированного моделирования пространственной экономики (ОПАОМПЭ) как инструмент для преодоления ограничений, с которыми

сталкиваются АО модели экономики. Открытая архитектура ОПАОМПЭ будет содействовать привлечению к разработке пространственной АО модели экономики России большого количества независимых исследовательских групп. Это, в свою очередь, ускоряет процесс создания модели, делает ее более детализированной и лучше отражающей реальность.

В предыдущих работах авторского коллектива ИЭОПП СО РАН, посвященных разработке систем поддержки и принятия решений на основе АОМ, уже упоминалась платформа АОМ, а также были описаны некоторые ее элементы [9]. Тем не менее не было представлено исчерпывающее определение платформы АОМ, а также ее структурная схема. Кроме того, не были определены потребители и заказчики платформы АОМ, а также задачи, которые они могут решать с ее помощью. Это стало препятствием для дальнейшего развития исследований в этом направлении.

Актуальность рассмотрения платформы в связи с ее потребителями обусловлена тем, что задачи, которые можно решать на ОПАОМПЭ, во многом определяются потребителями сервисов платформы и, как следствие, влияют на ее архитектуру и предоставляемые сервисы. Мы считаем, что именно спрос на сервисы ОПАОМПЭ и их потенциальные возможности могут стать главным стимулом для ее развития.

В нашем исследовании мы хотим рассмотреть следующие основные группы потребителей и заказчиков платформы:

а) Органы власти на федеральном, региональном и муниципальном уровнях. Они могут применять сервисы платформы для моделирования миграционных процессов, поддержки транспортных инвестиционных решений, прогнозирования и анализа развития городских агломераций, оценки влияния налоговой политики и других задач. Учитывая, что в России 89 регионов и более 20 тыс. муниципальных образований, можно говорить о большом количестве потенциальных потребителей, входящих в эту группу¹.

б) Наука и образование. В России насчитывается более 500 вузов, которые предлагают экономическое образование². При этом численность принятых за год только в бакалавриат по направлению «экономика» составляет, по некоторым оценкам, более 31 тыс. человек [10]. Кроме того, в России существует более десяти научно-исследовательских институтов, которые занимаются изучением экономики и управления³. Высшие учебные заведения и научно-исследовательские институты найдут в ОПАОМПЭ ценный инструмент для решения широкого спектра научных и образовательных задач. В дальнейшем в этой работе мы подробнее рассмотрим некоторые из них. Благодаря своей открытой архитектуре платформа предлагает гибкость и удобство в использовании.

в) Индустрия. С применением ОПАОМПЭ могут решаться такие задачи, как анализ пространственного распределения спроса и моделирование поведения потребителей, прогнозирование стоимости продукта, объема продаж и др. Данные задачи актуальны для компаний различных отраслей.

Широкий спектр задач, которые могут решать вышеупомянутые группы потребителей, рассматриваемые в работе, демонстрирует, что применение ОПАОМПЭ может быть весьма полезным, учитывая масштаб потенциальных эффектов от ее использования.

Таким образом, необходимость введения определения и разработки концептуальной схемы ОПАОМПЭ обусловлена стремлением преодолеть барьеры, связанные с развитием АО моделей пространственной экономики.

Цель настоящей работы – создание концептуальной схемы ОПАОМПЭ. Для достижения этой цели мы ставим перед собой следующие задачи:

¹ Число муниципальных образований по субъектам Российской Федерации на 1 января 2023 года (2022) *Росстат*. [online] Available at: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/1-adm-2023.xlsx> [Accessed 12.04. 2024]. (in Russian)

² Вузы России с экономическим факультетом. *Синергия*. [online] Available at: <https://proverili.ru/catalog/ekonomicheskie-vuzy?page=2> [Accessed 12.10.2024]. (in Russian)

³ Все научно-исследовательские институты. [online] Available at: <https://scientific.ru/instit/instrus4.html> [Accessed 10.10.2024]. (in Russian)



а) провести обзор научной литературы по теме исследования и ввести новое определение ОПАОМПЭ;

б) разработать концептуальную схему ОПАОМПЭ и описать ее ключевые элементы;

в) определить группы пользователей и научно-прикладные задачи, которые они могут решить с помощью имитационных моделей ОПАОМПЭ, доступных в виде сервисов.

Теоретическая значимость этой работы заключается в том, что мы предложили новое определение для ОПАОМПЭ. Мы определили ее как инструментально-инфраструктурную цифровую платформу с открытой архитектурой, в основе которой находится программное обеспечение для разработки АО моделей. Разработана концептуальная схема ОПАОМПЭ и дано описание ее элементов. В этой схеме учтено взаимодействие ядра платформы с внешней средой, информационной инфраструктурой и потенциальными потребителями услуг АОМ как сервиса. Применение в рамках данной платформы АОМММ рассматривается нами как один из возможных путей дальнейшего развития ОПАОМПЭ.

Практическая значимость данного исследования состоит в том, что мы создали концептуальную схему ОПАОМПЭ, которую можно использовать для дальнейшей прикладной реализации данной платформы.

В исследовании мы также представляем обзор литературы по проблематике нашей работы и рассматриваем научно-прикладные задачи, которые можно решать с применением ОПАОМПЭ. Мы описываем методы, которые мы использовали, и материалы, которые мы применили. В завершении исследования мы обсуждаем полученные результаты и делаем общие выводы относительно проделанной работы.

Обзор литературы

Работа носит синтетический характер и опирается на следующие направления научной литературы:

а) АОМММ российской экономики [4–8],

б) вопросы развития цифровых и программных платформ [11–15],

в) аналитические обзоры мультиагентных платформ (МАП) [16–19],

г) применение АОМ в системах поддержки и принятия решений, цифровой и пространственной экономике [2, 9, 20, 21],

д) отраслевые задачи применения МАП – программного обеспечения для создания АО моделей [20–25].

Далее проведем анализ ключевых направлений литературы в контексте задач, поставленных в работе.

Поскольку ОПАОМПЭ предназначена для организации совместной работы над АО моделями и предоставления услуг АОМ как сервиса, можно утверждать, что она обладает признаками цифровой платформы. В связи с этим целесообразно более подробно рассмотреть особенности цифровых платформ. В работе [11] цифровые платформы рассматриваются как институт, выступающий посредником в процессе заключения сделок. Их основное преимущество заключается в значительном снижении транзакционных, организационных, операционных и других видов издержек.

В исследовании [12] подробно описаны сущностные характеристики и уникальные особенности цифровых платформ. В работе [13] представлена подробная классификация цифровых платформ. В рамках этой классификации, в том числе, рассматриваются инструментальная и инфраструктурная цифровые платформы.

Под инструментальной цифровой платформой понимается: «Цифровая платформа, в основе которой находится программный или программно-аппаратный комплекс (продукт), предназначенный для создания программных или программно-аппаратных решений прикладного назначения. Позволяет ускорить разработку программных или программно-аппаратных решений для

обработки информации путем предоставления predefined типовых функций и интерфейсов для обработки информации на основе сквозной технологии работы с данными, а также инструментарий разработки и отладки» [13].

Инфраструктурная цифровая платформа определяется как: «Цифровая платформа, в основе которой находится экосистема участников рынка информатизации, целью функционирования которой является ускоренный вывод на рынок и предоставление потребителям в секторах экономики решений по автоматизации их деятельности (ИТ-сервисов), использующих сквозные цифровые технологии работы с данными и доступ к источникам данных, реализованные в инфраструктуре данной экосистемы» [13].

В общем случае цифровые платформы определяются авторами в [13] как «гибридные структуры, ориентированные на формирование взаимовыгодных взаимоотношений значительного количества независимых экономических агентов, осуществляемых в едином информационном пространстве и направленных на создание ценности путем обеспечения прямого взаимодействия и осуществления транзакций между несколькими группами сторонних пользователей». В статье [14] рассматриваются процессы появления платформ на основе программного обеспечения и отмечается, что конкуренция смещается в сторону экосистем, основанных на программных платформах.

Перспективы развития вокруг ОПАОМПЭ экосистемы участников, а также ее направленность на предоставление решений внешним пользователям характеризуют ОПАОМПЭ как инфраструктурную цифровую платформу. Отметим, что наличие в платформе программного комплекса для создания решений прикладного значения, predefined типовых функций и интерфейсов, позволяющих ускорить работу инструментария разработки и отладки, говорит о свойствах ОПАОМПЭ как инструментальной цифровой платформы.

Таким образом, ОПАОМПЭ обладает свойствами как инструментальной, так и инфраструктурной цифровых платформ и выступает средством организации взаимодействия для коллективной работы над крупными АО моделями большого сообщества исследователей.

Далее в контексте анализа понятия «платформа АОМ» на первом этапе рассмотрим, что такое программная платформа. Программная платформа представляет собой комплексную систему, созданную для запуска, разработки и управления различными программными приложениями. Она объединяет как аппаратные, так и программные ресурсы, что значительно упрощает выполнение конкретных задач и функций. Платформа служит связующим звеном между базовой аппаратной инфраструктурой и программными приложениями, обеспечивая их эффективную коммуникацию и взаимодействие. Благодаря наличию готовых компонентов, библиотек и инструментов, программная платформа избавляет от необходимости создавать все с нуля [15]. Например, операционная система на компьютере или смартфоне также может рассматриваться как разновидность программной платформы.

В зарубежных обзорах средств для создания АО моделей часто используется термин «агентная платформа» или МАП [16, 17]. В российской литературе те же самые инструменты АОМ рассматриваются как программное обеспечение для создания АО моделей [18]. Когда в контексте систем, предназначенных для создания АО моделей, говорят о «платформе», мы считаем, это подразумевает вид программной платформы.

В нашей работе мы, применяя термин «платформа АОМ», фокусируемся не только на том, что это программное средство для построения АО моделей, но и на том, что это цифровая платформа, предназначенная для организации коллективной работы над АО моделями большого количества исследователей и предоставления сервисов АОМ для потребителей.

Развитие МАП является трендом современного экономического моделирования. Так, в обзоре [16], вышедшем в 2006 году, насчитывалось 58 МАП, с тех пор их количество продолжало стремительно расти. Многие платформы отличаются открытостью и возможностью бесплатного использования и развития. Свободный доступ характерен для 42% платформ, описанных в этом обзоре.



В обзоре [17] представлен сравнительный анализ 24 наиболее перспективных существующих агентных платформ. В нем подчеркивается, что платформы АОМ являются мощным инструментом для моделирования и понимания процессов в различных областях, таких как экономика и торговля, здравоохранение, городское планирование и социальные науки. Сравнительный анализ платформ АОМ, проведенный в этой работе, основан на универсальных критериях сравнения и оценки. Они помогают понять, какие платформы демонстрируют определенные свойства и в каких ситуациях лучше сделать выбор в пользу той или иной платформы. Ценность работы заключается в обзоре областей их применения.

Одним из наиболее актуальных и фундаментальных обзоров средств АОМ является публикация ведущих сотрудников Центрального экономико-математического института РАН. Они уже достаточно давно занимаются вопросами АОМ и являются лидерами в этой области в России.

Работа А.Р. Бахтизина, А.В. Брагина А. и В.Л. Макарова [18] посвящена обзору состояния отрасли агент-ориентированного и имитационного моделирования. В ней собраны данные о 95 различных программах, используемых для работы с АО моделями. Некоторые из этих программ уже не поддерживаются. В работе рассматривается само понятие АО модели и его развитие во времени. Также проводится анализ существующих обзоров и технических средств для АОМ. При этом те же самые программные средства, которые в данном обзоре рассматриваются как программные инструменты для создания АО моделей, как мы отмечали выше, упоминаются в иностранных публикациях под терминами «агентная платформа» и МАП.

В работе [18] на основе обзора средств для АОМ делаются следующие выводы: ни одна из программ не покрывает всех потребностей АОМ, выявлена необходимость в специализированном программном обеспечении для моделирования отраслевых рынков, в частности рынка электроэнергетики.

МАП, или программные средства для АОМ, отличаются по:

- а) виду лицензии;
- б) скорости доставки сообщений между агентами;
- в) особенности реализации (языкам программирования, инструментам, платформам);
- г) масштабированию;
- д) интеграции (возможности связи платформы с другими системами);
- е) документированности (качеству сопроводительной документации);
- ж) наличию примеров проектов, выполненных на этой платформе.

В работе [19] указано, что большинство популярных платформ АОМ следует парадигме «фреймворк и библиотека». Это означает, что они предоставляют разработчикам набор стандартных концепций для проектирования АО моделей, а также набор программных инструментов, реализующих эти концепции и позволяющих создавать модели.

Кроме того, в работе [19] подчеркивается, что АОМ становится все более популярным исследовательским подходом, требующим инструментов для научного анализа. Авторы работы также полагают, что продвинутая платформа АОМ должна включать инструменты для настройки и проведения симуляционных экспериментов, а также инструменты для получения и обработки статистических данных.

Таким образом, при разработке концептуальной схемы ОПАОМПЭ мы обращаем внимание на следующие направления научной литературы: вопросы развития цифровых и программных платформ, применение АОМ в системах поддержки и принятия решений, цифровой и пространственной экономике, научно-прикладные задачи для АОМ, применение агент-ориентированной многорегиональной модели «затраты–выпуск» для анализа российской экономики.

Методы и материалы

Концептуальная схема ОПАОМПЭ, разрабатываемая в рамках данного исследования, основана на системном и структурном подходах.

Ряд базовых элементов ОПАОМПЭ были описаны ранее в материалах сотрудников ИЭОПП СО РАН [9]. Прикладные применения ОПАОМПЭ основаны как на наших собственных исследованиях, так и на ряде работ российских и зарубежных исследователей [20–25].

Результаты

Проведенный в обзоре литературы анализ демонстрирует, что терминология в этой области может быть неоднозначной. В зарубежных источниках те же программные пакеты могут называться мультиагентной платформой (Multi-Agent Platform) [16] или агентной платформой (Agent Platform) [17]. В то же время в российских источниках речь идет о программах для обеспечения работы АО моделей [18]. Данное программное обеспечение может включать в себя библиотеки АО моделей и инструменты для изучения их различных параметров, а также обладать полной документацией, что значительно облегчает работу внешних пользователей [16–19]. Мы учитываем эти аспекты при разработке концептуальной схемы ОПАОМПЭ, предложенной в данной работе.

Исходя из представленных выше удачных определений инструментальной и инфраструктурной цифровых платформ, мы можем определить ОПАОМПЭ как инструментально-инфраструктурную цифровую платформу с открытой архитектурой, в основе которой находится программное обеспечение для разработки АО моделей. Платформа предназначена для:

- а) совместной работы большого сообщества исследователей над крупными экономическими моделями, основанными на пространственной АО модели экономики России;
- б) моделирования динамики экономической системы;
- в) настройки и проведения симуляционных экспериментов;
- г) предоставления услуг по использованию АО моделей в качестве сервиса.

ОПАОМПЭ помогает ускорить разработку АО моделей, предоставляя готовые типовые функции и интерфейсы. Кроме того, платформа предлагает инструментарий для отладки моделей. Проведенный анализ показал, что существующее программное обеспечение для разработки АО моделей уже обеспечивает основные функциональные возможности для агент-ориентированного моделирования, такие как создание агентов, определение их поведения и взаимодействий, учет пространственного расположения агентов и визуализацию результатов. Это позволяет сократить время и ресурсы на разработку нового программного обеспечения.

Таким образом, предлагаемая платформа обладает потенциалом реализации на основе уже существующего программного комплекса для разработки АО моделей. Обоснование выбора конкретного программного обеспечения и комплексный анализ целесообразности реализации ОПАОМПЭ на его основе – это одно из направлений дальнейших исследований.

На рис. далее представлена концептуальная схема ОПАОМПЭ, которая предлагается в этой работе. На ней мы выделяем основной блок и вспомогательные.

Основной блок – ОПАОМПЭ включает следующие элементы:

- а) ядро платформы;
- б) библиотеку платформы;
- в) руководство пользователя;
- г) научный совет.

К вспомогательным блокам мы отнесли следующие элементы:

- а) подготовку входной информации для ядра ОПАОМПЭ;
- б) внешнюю среду;
- в) информационную инфраструктуру;
- г) инфраструктуру моделирования как сервис;
- д) потребителей и заказчиков: экономическую науку и образование; индустрию; органы власти.

Рассмотрим далее содержание блоков.



Рис. Концептуальная схема ОПАОМПЭ

Fig. Conceptual framework for OPABMSE

Источник: подготовлено автором на основе [9].

Ядро платформы

Программная среда, лежащая в основе ядра платформы, предоставляет конечным пользователям следующие возможности: легко и быстро разрабатывать и тестировать АО модели, пользоваться блоками, созданными другими пользователями, интегрировать модели с источниками входных данных, создавать самообучаемых агентов с использованием искусственного интеллекта, а также применять модели в качестве сервисов предиктивной аналитики для принятия решений. Ядро платформы включает следующие элементы:

- а) программная среда с открытой архитектурой для разработки АО моделей;
- б) средства для коллективной работы над большими моделями большого сообщества исследователей;
- в) среда моделирования динамики экономической системы;
- г) инструменты для настройки и проведения симуляционного эксперимента;
- д) пространственная АО модель экономики России;
- е) инструменты для статистического анализа.

Библиотека платформы

Репозиторий, содержащий типовые цифровые модели для различных социально-экономических агентов, которые явно учитывают расположение в пространстве.

Библиотеку можно использовать для тестирования, в качестве образцов готовых решений для наполнения платформы, а также в образовательных целях. Она постоянно пополняется благодаря открытой архитектуре.

Библиотека платформы включает в себя:

- а) АО модели фирм, домохозяйств, технологических и инвестиционных компаний, банков, государства и других организаций с различными модификациями алгоритмов экономического поведения и явным учетом местоположения в пространстве;
- б) поведенческие цифровые двойники реальных экономических агентов;
- в) типовые модельные блоки экономического пространства, такие как инфраструктура, дороги, месторождения полезных ископаемых;

г) набор прикладных экономических кейсов и задач, связанных с пространственными АО моделями. Позволяет проверить общую работоспособность разрабатываемых модельных конструкций, сопоставить результаты работы моделей с реальными данными и теоретическими моделями.

Руководство пользователя

Руководство пользователя будет состоять из следующих документов:

- а) описание основных принципов программной архитектуры платформы АОМ;
- б) описание пользовательского интерфейса;
- в) руководство по работе с данными;
- г) подробное описание ключевых функций;
- д) описание доступных библиотек и модулей;
- е) примеры использования платформы;
- ж) и другие материалы, которые будут полезны для пользователей.

Научный совет

Научный совет выполняет следующие функции:

- а) осуществляет научное руководство развитием ОПАОМПЭ;
- б) разрабатывает правила интеграции элементов модели, созданных пользователями, в основную модель;
- в) проводит рецензирование элементов модели перед их интеграцией в основную модель.

Подготовка входной информации для ядра платформы

Обработка исходных данных с использованием набора алгоритмов, программных сервисов и интерфейсов. На входе мы получаем необработанные экономические данные, а на выходе — обработанные данные для последующего слоя (например, для обучения «цифровых двойников» реальных экономических агентов).

Инфраструктура моделирования как сервис

Инфраструктура моделирования как сервис предоставляет потребителям и заказчикам доступ к инструментам и технологиям ОПАОМПЭ для решения сложных задач с помощью моделирования.

Пользователи смогут взаимодействовать с платформой через веб-интерфейс ОПАОМПЭ, включающий удобные инструменты для загрузки данных, настройки моделей и анализа результатов.

Эксперты оказывают содействие пользователям в адаптации их задач к уже существующим моделям или в разработке новых моделей, учитывая специфику их бизнеса или научных исследований. После проведения симуляций они помогают интерпретировать полученные результаты и предлагают рекомендации для принятия обоснованных решений.

Информационная инфраструктура

Перспективными источниками информации для АО моделей являются геоинформационные системы (ГИС). Применение ГИС обладает потенциалом формирования экономических данных, характеризующихся привязкой к пространству.

Реальные экономические агенты могут оставлять информационной след о фактах своей экономической активности. Данный след экономической активности может собираться с применением технологий интернета вещей (IoT), промышленного интернета вещей (IIoT) и, в том числе, храниться с применением блокчейн-платформ. Объем получаемой информации может формировать большие данные, что, в свою очередь, открывает новые перспективы для ОПАОМПЭ как инструмента поддержки принятия решений.

Потребители и заказчики платформы

Включает следующие основные группы: органы власти, представителей экономической науки и образования, представителей индустрии. ОПАОМПЭ позволит потребителям и заказчикам быстро и эффективно применять АОМ как сервис.



Далее мы подробнее рассмотрим потенциальных потребителей ОПАОМПЭ и ряд задач, которые они могут решать с ее применением. В описании задач мы ориентировались на те из них, которые уже сейчас и в перспективе можно решать с применением АОМММ, при этом напомним, что это – частный случай пространственной АО модели, которая может применяться в «ядре» платформы.

Органы власти

Платформа поможет органам власти, ответственным за принятие экономически или социально значимых решений на региональном и федеральном уровнях, анализировать возможные последствия своих решений. Рассмотрим некоторые задачи, которые можно решить с помощью этой платформы.

Министерство транспорта

С помощью платформы можно моделировать эффективность развития транспортной инфраструктуры, учитывая пространственное размещение агентов и транспортные издержки. Агенты в модели имеют географические координаты, а транспортные расходы зависят от расстояния и влияют на выбор покупателей и продавцов, а также на географию транспортных потоков. АОМММ позволяет анализировать различные сценарии развития транспортной инфраструктуры и поддерживать транспортные инвестиционные решения.

Федеральная служба по труду и занятости

В текущей постановке АОМММ выбор места работы агент модели домохозяйство определяет из взаимного расположения в пространстве жилья и места работы, потребности в транспорте для перемещения между ними, величиной транспортных издержек в денежном и временном выражении для этого перемещения, ситуацией на рынке труда [5]. Как отмечается в работе [21]: «...в большинстве подобных моделей в качестве побудительных мотивов миграции агентов рассматриваются экономические причины, а факторами, ограничивающими перемещения агентов, становятся параметры рынка труда на той территории, куда агенты стремятся мигрировать». Представленный в рамках АОМММ инструментарий обладает потенциалом моделирования межрегиональной и внутрирегиональной трудовой миграции.

Департаменты муниципалитетов

Развитие АОМММ в рамках ОПАОМПЭ позволит решать для заказчиков из муниципалитетов задачи, связанные с проблемами городского развития. В том числе решать приведенные в [20, 24] задачи:

- а) прогнозирования спроса на городскую землю;
- б) моделирования сценариев политики расширения городов;
- в) анализа эффектов реализации городской пространственной политики.

Индустрия

В перспективе заказчики из индустрии смогут использовать модельный комплекс ОПАОМПЭ для решения различных задач:

- а) анализа пространственного распределения спроса;
- б) моделирования поведения потребителей;
- в) стратегического планирования [25];
- г) маркетинга, в том числе ценообразования для инноваций [22].

Если включить в структуру модели агента – технологическую компанию, которая будет отражать особенности поведения быстрорастущих инновационных компаний, то это позволит решать задачи моделирования и прогнозирования развития инновационной экономики. Например, в работе [23] рассматривается пример такой задачи: оценка ситуации участником высокотехнологичного рынка во внешней среде компании для разработки конкурентной стратегии.

Экономическая наука и образование

В сфере науки и образования есть задачи, которые можно решать с помощью агент-ориентированного подхода и ОПАОМПЭ. Эти задачи можно разделить на несколько категорий.

Задачи в рамках учебного процесса

Платформа АОМ может быть полезным инструментом для экономического моделирования в выпускных квалификационных работах по направлениям: финансы, региональная и отраслевая экономика, экономика предпринимательства, менеджмент, рынок ценных бумаг, банковское дело.

Научные задачи в сфере экономики

Анализ сложных экономических систем, моделирование финансовых и отраслевых рынков, таких как электроэнергетика, а также цифровая экономика, – вот лишь некоторые области, где применяются методы пространственного моделирования.

Сценарное моделирование пространственного развития открывает новые горизонты для разработки различных сценариев развития экономики в зависимости от размещения транспортной инфраструктуры или освоения новых природных ресурсов.

Моделирование экономических процессов на разных уровнях позволяет анализировать экономическую деятельность в масштабах города, региона или страны, учитывая пространственные факторы. С помощью таких моделей можно исследовать агломерационные явления, пространственное экономическое неравенство и прогнозировать трудовую миграцию.

Обсуждение

Концептуальная схема ОПАОМПЭ, представленная в работе, отличается оригинальностью.

Это связано с тем, что программное обеспечение для АОМ, рассматриваемое в обзорах [16–18], по сути представляет собой вид программных платформ.

Мы, в свою очередь, говорим об ОПАОМПЭ как об инструментально-инфраструктурной цифровой платформе. Ее основная задача – обеспечить возможность коллективной работы над большой АО моделью экономики России.

Использование АОМММ (частного случая пространственной АО модели) в «ядре» платформы позволяет рассматривать экономику в целом, учитывая пространственное размещение агентов и транспортные издержки. Важным свойством предлагаемой платформы является предоставление услуг применения имитационных моделей как сервиса. Этот сервис предназначен для того, чтобы пользователи могли многократно запускать симуляции АО моделей и использовать полученные результаты в качестве основы для принятия решений. Именно такая возможность определяет потенциальные экономические эффекты от практической реализации ОПАОМПЭ.

В работе [9] упоминается платформа АОМ и описываются некоторые ее элементы. Однако, в отличие от предыдущих исследований, мы предлагаем концептуальную схему ОПАОМПЭ и выделяем в ее рамках потребителей сервисов ОПАОМПЭ из сфер науки и образования, индустрии и органов власти. Мы также рассматриваем задачи, которые они могут решать с помощью ОПАОМПЭ. Это новое видение проблемы.

Кроме того, мы считаем перспективным рассмотреть ОПАОМПЭ как часть мультиагентной системы поддержки и принятия решений в экономике. Контуры такой системы описаны в работе [9].

В результате использования ОПАОМПЭ для задач принятия решений может возникнуть обратная связь. Она заключается в том, что управляющие воздействия от лиц, принимающих решения, передаются в экономическую систему. Это может повлиять на поведение экономических субъектов и, соответственно, на данные, поступающие на вход платформы АОМ через блок информационной инфраструктуры. Как отмечается в работе [9], обратная связь в мультиагентных системах принятия решений может осуществляться путем обобщения информации, содержащейся в цифровых следах, создаваемых в рамках существующей информационной и цифровой инфраструктуры. Механизмы передачи управляющих воздействий обратно в цифровую экономическую среду включают в себя действия экономических агентов, как реакцию на управленческие решения, подготовленные с использованием платформы АОМ.



Таким образом, в контексте системы принятия решений в цифровой экономике ОПАОМПЭ может быть представлена как один из уровней этой системы.

Заключение

Несмотря на уже достигнутые успехи, в развитии АОМ существуют определенные трудности. Основная задача ОПАОМПЭ – помочь преодолеть эти сложности, такие как низкая скорость разработки и недостаточная связь пространственных АО моделей с реальными процессами. Открытая архитектура предлагаемой платформы позволяет привлечь к разработке пространственной АО модели экономики России множество независимых исследовательских групп. Это увеличит скорость разработки модели, повысит ее детализацию и улучшит связь с реальными процессами. В работе были получены следующие результаты.

1. На основе анализа научной литературы было предложено определение открытой платформы агент-ориентированного моделирования пространственной экономики. Мы определили ОПАОМПЭ как инструментально-инфраструктурную цифровую платформу с открытой архитектурой, в основе которой находится программное обеспечение для разработки АО моделей. Было показано, что платформа обладает потенциалом реализации на базе существующего программного комплекса для разработки АО моделей.

2. Была разработана концептуальная схема ОПАОМПЭ, а также было описано содержание ее элементов. Концептуальная схема ОПАОМПЭ учитывает взаимодействие ядра платформы с внешней средой, информационной инфраструктурой, потенциальными потребителями и задачами, которые они могут решать. В основе ядра платформы как частный случай может применяться агент-ориентированная межотраслевая многорегиональная модель «затраты–выпуск», разработанная в ИЭОПП СО РАН. К особенностям предлагаемой концептуальной схемы относится применение сквозных технологий интернета вещей и промышленного интернета вещей для сбора цифровых следов об экономической активности агентов и подготовки на этой основе входной информации для разработки АО моделей. Предложенная концептуальная схема ОПАОМПЭ обладает потенциалом для дальнейшей практической реализации.

3. Были определены группы пользователей сервисов ОПАОМПЭ: органы власти, представители экономической науки и образования, а также представители индустрии.

Мы рассмотрели широкий спектр научных и прикладных задач, которые эти группы могут решать с помощью данной платформы, реализация которых может принести значительные эффекты. В контексте экономической науки и образования использование ОПАОМПЭ поможет ускорить проведение научных исследований и повысить их качество, одновременно улучшая уровень экономического образования. Одним из перспективных направлений является применение ОПАОМПЭ в рамках систем поддержки и принятия решений. Это позволит органам власти и представителям индустрии анализировать возможные последствия своих решений в социальной и экономической сферах, в том числе на региональном и федеральном уровне.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Эпштейн Дж.М. (2022) Агент-ориентированное моделирование для сложного мира. Часть 1. *Экономика и математические методы*, 58 (1), 5–26. DOI: <https://doi.org/10.31857/S042473880018970-6>
2. Цыплаков А.А., Мельникова Л.В. (2021) Инвестиции в основной капитал и макроэкономическое агент-ориентированное моделирование. *Мир экономики и управления*, 21 (1), 5–28. DOI: <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2021-21-1-5-28>
3. Брагин А.В., Бахтизин А.Р. (2023) Особенности реализации больших экономических моделей. *π-Economy*, 16 (3), 107–122. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.16307>

4. Суслов В.И., Доможиров Д.А., Ибрагимов Н.М., Мельникова Л.В., Цыплаков А.А. (2022). Агентно-ориентированное моделирование на базе моделей Затраты–Выпуск. В книге: *Модели, анализ и прогнозирование пространственной экономики* (под ред. В.И. Суслова, Ю.С. Ершова), гл. 6, Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН, 196–225.
5. Суслов В.И., Доможиров Д.А., Ибрагимов Н.М., Костин В.С., Мельникова Л.В., Цыплаков А.А. (2016) Агент-ориентированная многорегиональная модель «Затраты–Выпуск» российской экономики. *Экономика и математические методы*, 52 (1), 112–131.
6. Суслов В.И., Новикова, Т.С., Цыплаков А.А. (2023) Моделирование поведения экономических агентов на базе моделей «Затраты–Выпуск». В книге: *Модели и методы прогнозирования: Азиатская Россия в экономике страны* (под ред. А.О. Баранова, В.И. Суслова), гл. 4.7, Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН, 232–244.
7. Доможиров Д.А., Ибрагимов Н.М., Мельникова Л.В., Цыплаков А.А. (2017) Интеграция подхода «Затраты–Выпуск» в агент-ориентированное моделирование. Часть 1. Методологические основы. *Мир экономики и управления*, 17 (1), 86–99.
8. Доможиров Д.А., Ибрагимов Н.М., Мельникова Л.В., Цыплаков А.А. (2017) Интеграция подхода «Затраты–Выпуск» в агент-ориентированное моделирование. Часть 2. Межрегиональный анализ в искусственной экономике. *Мир экономики и управления*, 17 (2), 15–25.
9. Суслов В.И., Костин В.С., Иванов Е.Ю., Ибрагимов Н.М., Новикова Т.С., Цыплаков А.А. (2020) Проблемы создания мультиагентной системы поддержки принятия решений на субфедеральном уровне. *Мир экономики и управления*, 20 (3), 5–26. DOI: <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2020-20-3-5-26>
10. Яппарова Д.И. (2019) Анализ особенностей спроса и предложения на экономические направления высшего образования. *Фундаментальные исследования*, 10, 144–149.
11. Осипов Ю.М., Юдина Т.Н., Гелисханов И.З. (2018) Цифровая платформа как институт эпохи технологического прорыва. *Экономические стратегии*, 5 (155), 22–29.
12. Гелисханов И.З., Юдина Т.Н., Бабкин А.В. (2018) Цифровые платформы в экономике: сущность, модели, тенденции развития. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*, 11 (6), 22–36. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.11602>
13. Бабкин А.В., Куратова А. (2018) Классификация и характеристика цифровых платформ в экономике. *Вектор экономики*, 12.
14. Tiwana A., Konsynski B., Bush A. (2010) Research Commentary–Platform Evolution: Coevolution of Platform Architecture, Governance, and Environmental Dynamics. *Information Systems Research*, 21 (4), 675–687. DOI: <https://doi.org/10.1287/isre.1100.0323>
15. Hedges M. (2023) *What is a software platform?* [online] Available at: <https://citizenside.com/technology/what-is-a-software-platform/> [Accessed 5.04.2024]
16. Rendón-Sallard T., Sánchez-Marrè M. (2006) *A review on Multi-Agent platforms and Environmental Decision Support Systems Simulation tools*. [online] Available at: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/87344/R06-4.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accessed 3.12.2024]
17. Kravari K., Bassiliades N. (2015) A Survey of Agent Platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18 (1), art. no. 11. DOI: <https://doi.org/10.18564/jasss.2661>
18. Бахтизин А.Р., Брагин А.В., Макаров В.Л. (2022) Современные программные средства агент-ориентированного моделирования. *Искусственные общества*, 17 (4). DOI: <https://doi.org/10.18254/S207751800023501-0>
19. Railsback S.F., Lytinen S.L., Jackson S.K. (2006). Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendation. *SIMULATION*, 82 (9), 609–623. DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549706073695>
20. Tsyplakov A.A., Melnikova L.V., Ibragimov N.I. (2021) Agent-Based Modeling of Spatial Economic Systems: a Review. *Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences*, 14 (12), 1910–1919. DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1370-0869>
21. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. (2016) Агент-ориентированные модели как инструмент апробации управленческих решений. *Управленческое консультирование*, 12, 16–25.
22. Nasir A., Bozanta A. (2014) Usage of Agent-Based Modeling and Simulation in Marketing, *Journal of Advanced Management Science*, 2 (3), 240–245. DOI: <https://doi.org/10.12720/joams.2.3.240-245>
23. Бабенко Е.А. (2012) Агентно-ориентированная модель конкуренции на рынке высокотехнологичной продукции (на примере основных производителей самолетов боевой авиации). *Труды МАИ*, 59, 1–17.



24. Tian G., Qiao Z. (2014) Modeling urban expansion policy scenarios using an agent-based approach for Guangzhou metropolitan region of China. *Ecology and Society*, 19 (3), art. no. 52. . DOI: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06909-190352>

25. Городецкий В.И., Скобелев П.О. (2017) Многоагентные технологии для индустриальных применений: Реальность и перспектива. *Труды СПИИРАН*, 6, 11–45. DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.55.1>

REFERENCES

1. Makarov V., Bakhtizin A., Epstein J.M. (2022) Agent-based modeling for a complex world. Part 1. *Economics and Mathematical Methods*, 58 (1), 5–26. DOI: <https://doi.org/10.31857/S042473880018970-6>

2. Tsyplakov A.A., Melnikova L.V. (2021) Fixed Investments and Macroeconomic Agent-Based Modeling. *World of Economics and Management*, 21, (1) 5–28. DOI: <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2021-21-1-5-28>

3. Bragin A.V., Bakhtizin A.R. (2023) Implementation features of large economic models. *π-Economy*, 16 (3), 107–122. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.16307>

4. Suslov V.I., Domozhurov D.A., Ibragimov N.M., Melnikova L.V., Tsyplakov A.A. (2022). Agent-oriented modeling on the basis of input-output models [Agent-Based Modeling Based on Input–Output Models]. In: *Modeli, analiz i prognozirovaniye prostranstvennoy ekonomiki [Models, analysis and forecasting of spatial economics]* (ed. Suslov V.I., Ershov Iu.S.), Chapter 6, Novosibirsk: Izd-vo IEOPP SO RAN, 196–225.

5. Suslov V.I., Domozhurov D.A., Ibragimov N.M., Kostin V.S., Melnikova L.V., Tsyplakov A.A. (2016) Agent-Based Multiregional Input–Output Model of the Russian Economy. *Economics and Mathematical Methods*, 52 (1), 112–131.

6. Suslov V.I., Novikova, T.S., Tsyplakov A.A. (2023) Modelirovaniye povedeniya ekonomicheskikh agentov na baze modeliye «zatraty–vypusk» [Modeling the behavior of economic agents based on input–output models]. In: *Modeli i metody prognozirovaniya: Aziatskaya Rossiya v ekonomike strany [Models and methods of forecasting: Asian Russia in the country's economy]* (ed. Baranov A.O., Suslov V.I.), Chapter 4.7, Novosibirsk: Izd-vo IEOPP SO RAN, 232–244.

7. Domozhurov D.A., Ibragimov N.M., Melnikova L.V., Tsyplakov A.A. (2017) Integration of Input–Output Approach into Agent-Based Modeling. Part 1. Methodological Principles. *World of Economics and Management*, 17 (1), 86–99.

8. Domozhurov D.A., Ibragimov N.M., Melnikova L.V., Tsyplakov A.A. (2017) Integration of Input–Output Approach into Agent-Based Modeling. Part 2. Interregional Analysis in an Artificial Economy. *World of Economics and Management*, 17 (2), 15–25.

9. Suslov V.I., Kostin V.S., Ivanov E.Yu., Ibragimov N.M., Novikova T.S., Tsyplakov A.A. (2020) Problems of Development of Multi-Agent Decision Support System at the Sub-Federal Level. *World of Economics and Management*, 20 (3), 5–26. DOI: <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2020-20-3-5-26>

10. Yapparova D.I. (2019) Special aspects analysis of supply and demand in economic fields of tertiary education. *Fundamental Research*, 10, 144–149.

11. Osipov Yu.M., Yudina T.N., Geliskhanov I.Z. (2018) Digital Platform as an Institution of the Technological Breakthrough Era. *Economic Strategies*, 5 (155), 22–29.

12. Geliskhanov I.Z., Yudina T.N., Babkin A.V. (2018) Digital platforms in economics: essence, models, development trends. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 11 (6), 22–36. DOI: [10.18721/JE.11602](https://doi.org/10.18721/JE.11602)

13. Babkin A.V., Kuratova A. (2018) Classification and characteristic of the digital platforms in economy. *Vector Economy*, 12.

14. Tiwana A., Konsynski B., Bush A. (2010) Research Commentary–Platform Evolution: Coevolution of Platform Architecture, Governance, and Environmental Dynamics. *Information Systems Research*, 21 (4), 675–687. DOI: <https://doi.org/10.1287/isre.1100.0323>

15. Hedges M. (2023) *What is a software platform?* [online] Available at: <https://citizenside.com/technology/what-is-a-software-platform/> [Accessed 5.04.2024]

16. Rendón-Sallard T., Sánchez-Marrè M. (2006) A review on Multi-Agent platforms and Environmental Decision Support Systems Simulation tools. [online] Available at: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/87344/R06-4.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accessed 3.12.2024]

17. Kravari K., Bassiliades N. (2015) A Survey of Agent Platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18 (1), art. no. 11. DOI: <https://doi.org/10.18564/jasss.2661>
18. Bragin A., Bakhtizin A., Makarov V. (2022) Modern Software tools for Agent-based modeling. *Artificial Societies*, 17 (4). DOI: <https://doi.org/10.18254/S207751800023501-0>
19. Railsback S.F., Lytinen S.L., Jackson S.K. (2006). Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendation. *SIMULATION*, 82 (9), 609–623. DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549706073695>
20. Tsyplakov A.A., Melnikova L.V., Ibragimov N.I. (2021) Agent-Based Modeling of Spatial Economic Systems: a Review. *Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences*, 14 (12), 1910–1919. DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1370-0869>
21. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. (2016) Agent-Based Models as a Means of Testing of Management Solutions. *Administrative Consulting*, 12, 16–25.
22. Nasir A., Bozanta A. (2014) Usage of Agent-Based Modeling and Simulation in Marketing, *Journal of Advanced Management Science*, 2 (3), 240–245. DOI: <https://doi.org/10.12720/joams.2.3.240-245>
23. Babenko E.A. (2012) Agentno-orientirovannaia model' konkurentsii na rynke vysokotekhnologichnoi produktsii (na primere osnovnykh proizvoditelei samoletov boevoi aviatsii) [Agent-Based Model of Competition in the High-Tech Market (Based on the Example of Major Manufacturers of Combat Aircraft)]. *Trudy MAI [Works of MAI]*, 59, 1–17.
24. Tian G., Qiao Z. (2014) Modeling urban expansion policy scenarios using an agent-based approach for Guangzhou metropolitan region of China. *Ecology and Society*, 19 (3), art. no. 52. . DOI: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06909-190352>
25. Gorodetsky V., Skobelev P. (2017) Industrial Applications of Multi-agent Technology: Reality and Perspectives. *SPIIRAS Proceedings*, 6, 11–45. DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.55.1>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT AUTHOR

БОБЫЛЕВ Георгий Владимирович

E-mail: georgiybobylev@gmail.com

Georgiy V. BOBYLEV

E-mail: georgiybobylev@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5223-5616>

Поступила: 29.10.2024; Одобрена: 04.12.2024; Принята: 06.12.2024.

Submitted: 29.10.2024; Approved: 04.12.2024; Accepted: 06.12.2024.