

УДК 330.47+316.42

DOI: 10.52897/2411-4588-2024-1-21-32

Валерий Леонидович Макаров*

доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН

Альберт Рауфович Бахтизин**

доктор экономических наук, профессор, член-корреспондент РАН

*Центральный экономико-математический институт РАН

Москва, Россия

**МГУ им. М. В. Ломоносова

Москва, Россия

СОВРЕМЕННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация. Рассматриваются краткая история возникновения и основные направления применения агент-ориентированных моделей. Приведены примеры их практического использования, в том числе в сфере экономики и для моделирования бизнес-процессов. Кратко описаны программно-аналитический комплекс «МЕБИУС» и новый амбициозный проект «Цифровая Земля», поддержанный и реализуемый всеми странами межгосударственного объединения БРИКС.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, суперкомпьютерные технологии, имитация социальных и экономических процессов, апробация управленческих решений.

Для цитирования: Макаров В. Л., Бахтизин А. Р. Современные инструменты моделирования социально-экономических процессов // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. 2024. № 1(76). С. 21–32. DOI: 10.52897/2411-4588-2024-1-21-32.

Valery L. Makarov*

Grand PhD in Physico-mathematical Sciences, Professor,

Academician of the Russian Academy of Sciences

Albert R. Bakhtizin**

Grand PhD in Economic Sciences, Professor,

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences

*Central Economics and Mathematics Institute Russian Academy of Sciences

Moscow, Russia

**Lomonosov Moscow State University

Moscow, Russia

MODERN TOOLS FOR MODELING SOCIO-ECONOMIC PROCESSES

Abstract. The article discusses a brief history of the emergence and main areas of application of agent-based models. Examples of their practical use are given, including in the field of economics and for modeling business processes. The software and analytical complex «MOBIUS» and the new ambitious project «Digital Earth», supported and implemented by all countries of the BRICS interstate association, are briefly described.

Keywords: agent-based modeling, supercomputer technologies, imitation of social and economic processes, testing of management decisions.

For citation: Makarov V. L., Bakhtizin A. R. Modern tools for modeling socio-economic processes. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* = Economy of the North-West: problems and prospects of development. 2024;(1(76)):21–32. DOI: 10.52897/2411-4588-2024-1-21-32.

Происходящие в последние годы события (пандемии, торговые войны между ключевыми участниками мировой экономической системы и т. д.) являются плохо прогнозируемыми, кроме того, сильно затруднена оценка последствий управленческих решений. В этой связи остро встает проблема поиска аналитических инструментов нового поколения, адекватных задачам

современного сложного мира. До недавнего времени для определения взаимосвязей между социально-экономическими показателями в основном применялись методы многомерного статистического анализа, например регрессионные уравнения, но их спецификация осуществляется с использованием данных прошедших периодов, поэтому использование этих инструментов

для прогноза хотя и возможно, но с долей условности, предполагающей определенный специалистами набор сценариев, поэтому в условиях сильной флуктуации проходящих в социально-экономической сфере процессов данный инструмент малопригоден к использованию.

Одновременно с этим практически экспоненциально растет мощность вычислительных систем. По сравнению с данными 1993 г. суммарная производительность 500 самых быстродействующих суперкомпьютеров выросла более чем в 4,6 млн раз и в 2023 г. составляет более 5,24 эксафлопс [1], а производительность топовой системы FRONTIER [2] в 2022 г. перешагнула эксафлопсный рубеж. Такие мощности позволяют реализовывать модели практически любого уровня сложности.

Имея большой практический опыт в разработке множества агент-ориентированных моделей как инструментов для «выращивания» и изучения искусственных обществ, авторы берут на себя смелость рассматривать модели этого класса в качестве потенциальных инструментов решения не только перечисленных, но и прочих проблем.

Агент-ориентированный подход

Что такое агент-ориентированные модели и как они могут помочь нам ориентироваться в сложном современном мире? Классическая агентная модель представляет собой искусственное общество, состоящее из индивидумов, созданных программным способом и взаимодействующих друг с другом в некоторой среде (такой средой может быть как географический ландшафт, так и организация, социальная сеть и т. д.).

Трудно однозначно выявить момент зарождения агент-ориентированного подхода к моделированию наблюдаемых в реальной жизни процессов. Некоторые исследователи увязывают появление агентных моделей с клеточными автоматами 1940-х гг.

Клеточные автоматы оказали очень серьезное влияние на многие области науки (естественные, технические и гуманитарные) – астрономию, физику, медицину, геологию, математику, биологию, информатику, робототехнику, социологию, экономику и др., в связи с чем для обзора даже самых цитируемых моделей этого класса понадобится отдельная монография. Поэтому сошлемся на основной вывод научно-популярного бестселлера «Новый вид науки» (A New Kind of Science), написанного за более чем 10 лет одним из известных современных математиков, разработчиком систе-

мы компьютерной алгебры Mathematica – Стивеном Вольфрамом (Stephen Wolfram) и во многом посвященного клеточным автоматам. Автор приглашает к дискуссии о том, что накопленный к настоящему времени математический аппарат не позволяет увидеть сложность окружающего нас мира, а для его понимания, помимо совершенно новых подходов, необходимо проведение исследований, предполагающих осуществление многочисленных экспериментов, которые сами по себе имеют большой практический смысл и позволяют накапливать знания. В свою очередь методология клеточных автоматов, по мнению ученого, позволяет рассмотреть системы любой степени сложности путем их дезагрегирования на простые элементы.

Отметим, что в этом убеждении Вольфрам не одинок: создатель первого в мире языка программирования высокого уровня «Планкалькуль» (Plankalkül) и программируемого компьютера, немецкий ученый Конрад Цузе еще в 1969 г. опубликовал книгу «Вычислительное пространство» (Rechnender Raum), в которой бросил вызов сложившейся доктрине о непрерывности физических явлений, предположив дискретность всех наблюдаемых процессов. В этой связи он выдвинул тезис о том, что Вселенная представляет собой невообразимо сложный клеточный автомат с пока неизвестными правилами перехода между состояниями.

Отметим, что разработка и техническая реализация клеточных автоматов – далеко не разработанная сфера приложения исследователей, а скорее, наоборот, с использованием высокопроизводительных вычислений это направление получит дополнительный импульс к дальнейшему развитию.

С середины 1990-х гг. агент-ориентированное моделирование проникло в самые различные научно-практические сферы и успешно применяется при решении множества задач. На основе анализа многих публикаций, посвященных агент-ориентированным моделям, можно обозначить несколько устоявшихся направлений их использования.

1. Эпидемиология (в первую очередь оценка скорости распространения эпидемий с учетом различных ограничительных мер). Самая большая агент-ориентированная модель в мире (6,5 млрд агентов) была разработана в 2009 г. в США, первоначально для сценарных расчетов различных вариантов профилактических мероприятий в отношении вируса H1N1 (авторы – Джон Паркер и Джошуа Эпштейн).

2. Пешеходное движение (включая имитацию процессов эвакуации).

3. Киноиндустрия (в начале 2000-х гг. был создан программный продукт MASSIVE (Multiple Agent Simulation System in Virtual Environment – система многоагентного моделирования в виртуальной среде), который может использоваться для одновременной обработки десятков, сотен тысяч и вплоть до миллионов объектов. Основатель компании, предложившей продукт MASSIVE, Стивен Регелус реализовал придуманную им в 1990-е гг. концепцию искусственных обществ, основанную на агент-ориентированном подходе. Главную награду – премию «Оскар» – Регелус получил за научные и инженерные достижения (Scientific and Engineering Award) и за автономную систему анимации агентов, используемую для боевых сцен в трилогии «Властелин колец» [3].

4. Демографические процессы (использование агентного подхода позволяет не только более точно прогнозировать численность населения, но и оценивать эффективность различных мер государственной политики, направленной на решение демографических проблем; также модели этого класса хорошо себя зарекомендовали в вопросах прогнозирования миграционных процессов).

5. Транспортные системы (к настоящему моменту разработаны агентные модели транспортных систем более чем для 100 мегаполисов мира).

6. Окружающая среда (на фоне заметных климатических изменений и сформировавшегося тренда на декарбонизацию производств модели этого класса активно применяются для мониторинга и прогнозирования состояния окружающей человека среды).

7. Землепользование (это направление активно развивается, и ряд построенных моделей позволяют учитывать влияние изменений режима землепользования на качество жизни населения).

8. Городская динамика (моделирование городских агломераций – более сложный процесс, нежели симуляции окружающей среды, поскольку такие модели должны включать социальные, транспортные, экологические, экономические и другие системы; в силу трудоемкости построения таких инструментов разрабатываются они редко, но примеры есть: Гренобль, Лос-Анджелес, Вашингтон и др.).

9. Реконструкция исторических событий. Здесь следует упомянуть совместный проект Брукингского института (Brookings Institution), Института Санта-Фе (Santa Fe Institute) и Института мировых ресурсов (World Resources Institute), посвященный воспроизведению древнего социума (древнеиндейской культуры Анасази) в виде цифрового искусственного общества [4]. Была смоделирована динамика города Кайента (Аризона, США) в период с 900 по 1350 г. нашей эры, после которого упомя-

нутая цивилизация исчезла. Главный вопрос для археологов был, почему так произошло. С использованием расширенной версии модели Sugarscape [5] была создана окружающая агентов среда с учетом гидрологических особенностей территории, плодородности почвы, засушливости и других параметров. В свою очередь расселение анасази по территории в рамках цифровой модели осуществлялось на основе данных, собранных Лабораторией годичных колец Аризонского университета (Tree Ring Laboratory at the University of Arizona). Искусственное общество анасази было построено с учетом правил создания новых семей, способов добычи еды и других специфических особенностей этой древней цивилизации. После инициализации стартового состояния цифровой двойник анасази воспроизвел длительный период своей истории, и результаты показали, что окружающая среда могла поддерживать только небольшую популяцию жителей [6]. Научно-популярный отчет на эту тему приведен в работе *Life with the artificial Anasazi* журнала *Nature* [7], а сама агент-ориентированная археология превратилась в бурно развивающуюся область науки (например, [8]).

10. Военные конфликты. К настоящему моменту разработано несколько сотен симуляторов, позволяющих воспроизводить военные операции и определять вероятный исход боевых столкновений. Известными продуктами в этой сфере являются разработка компании AgentFly Technologies и проект The System Effectiveness Analysis Simulation, финансируемый командованием воздушных сил США.

Переходя от вопросов межгосударственных конфликтов к внутригосударственным, отметим, что агент-ориентированные модели неоднократно использовались для анализа революций и восстаний. Например, модель гражданского насилия Эпштейна [9], одна из реализаций которой доступна вместе с пакетом NetLogo, в дальнейшем неоднократно реплицировалась (например, [10]). В оригинальной модели присутствуют перемещающиеся и взаимодействующие агенты двух типов – гражданские и полицейские. Гражданские агенты могут быть спокойными или склонными к активным действиям (в том числе к мятежу). Последние бунтуют, если их недовольство властью превышает вероятность ареста (с поправкой на риск)¹. Гражданский агент оценивает вероятность своего ареста в зависимости от количества агентов-полицейских в пределах его видимости. В свою очередь уровень недовольства определя-

¹Технически повод для недовольства «минус» вероятность ареста должно превышать пороговое значение, обычно равное нулю.

ется экономической ситуацией и степенью легитимности действующего режима.

С помощью теоретической модели было получено несколько результатов. Расчеты показали пространственное возникновение локализованных всплесков недовольства в результате двух модельных прогонов. В первом из них уровень легитимности режима снижается с максимального значения (100) до нуля с небольшим шагом. Каждый раз, когда легитимность падает, находится незначительное число агентов, у которых недовольство превышает соответствующий порог, и они бунтуют. Но поскольку их мало (бывает, что и один), их быстро нейтрализуют, и восстания не происходит.

Во втором случае уровень легитимности снижался резко (со 100 до 80) и многие активные агенты стали бунтовать одновременно, в результате чего соотношение полицейских и протестующих гражданских усилилось в пользу последних, что вызвало присоединение склонных к активным действиям агентов к протестам и восстание дополнительно усилилось. Таким образом, само по себе низкое значение легитимности власти не вызывает неконтролируемый мятежный процесс, а резкое снижение этого значения может вызвать сильное волнение. Тем не менее, как отмечается в книге *How Democracies Die*, особого внимания требует медленное, постепенное и незаметное разрушение свобод [11].

11. Социальные сети (использование агентного подхода для моделирования и исследования социальных сетей открывает широкий спектр новых возможностей для изучения эволюции человеческого общества; возможно изучать скорость распространения информации, выявлять закономерности формирования социальных групп, продолжительность различных видов отношений между участниками и т. д.).

12. Экономика (в последние годы этот инструмент прочно вошел в арсенал средств, используемых научными организациями, аналитическими центрами, корпорациями, органами государственного управления и др. применительно к вопросам моделирования и прогнозирования экономических процессов; наиболее известными примерами являются модель рынка труда США с количеством агентов 120 млн (автор – Роберт Экстелл), фондового рынка США (автор – Лебарон Блейк) и модель экономики стран ЕС – EURACE).

Проекты в сфере экономики

Известный немецкий социолог Никлас Луман (Niklas Luhmann), посвятивший всю жизнь

изучению человеческого общества, рассматривал экономику как часть более сложной социальной системы и выдвинул известную гипотезу о том, что экономические системы с целью сохранения усиливают исходное неравенство [12, р. 112]. Его идеи были частично реализованы в виде агент-ориентированной модели Флейшманна, в которой рассматривается простая экономическая система. Основным результатом проведенных с ее помощью экспериментов состоит в том, что неравенство в обществе всегда возникает независимо от начального состояния, имеющих различий между агентами и модификаций правил взаимодействия между ними [13]. Автор поддерживает гипотезу Н. Лумана, написав, что «потребуется длительный период модельного времени (для 36 агентов, 3 видов товара общим количеством 900 и 150 000 торговых операций), чтобы подтвердить гипотезу о том, что экономика производит неравенство из неравенства». Флейшманн также отмечает в работе несколько важных предположений и предлагает расширения модели для их проверки. Это обстоятельство иллюстрирует, что агентный подход используется не только для генерирования гипотез, но и для их оспаривания.

В отдельное направление следует выделить агент-ориентированное моделирование финансовых рынков. Анализ библиографических баз Web of Science и SCOPUS показал, что к настоящему моменту разработаны сотни агентных моделей, связанных с моделированием финансовых рынков. Использование этого инструмента для обозначенных целей вполне оправдано. Как отмечается в тематической публикации самой крупной в мире аудиторской и консалтинговой компании Deloitte, посвященной моделированию финансовых рынков, применение агент-ориентированных моделей позволяет имитировать самые разнообразные типы поведения участников рынка. В отличие от традиционных математических методов, в которых часто формализуются зависимости, построенные на основе субъективных предположений, агент-ориентированный подход позволяет получать новые знания о механизмах работы финансовых рынков за счет проведения многочисленных симуляций [14].

Один из наиболее цитируемых исследователей финансовых рынков с использованием агентного подхода – профессор Кильского университета Томас Люкс в своей открытой лекции *Agent-Based Models in Finance: Foundations, Explanatory Power and Application*, прошедшей 3 февраля 2021 г. отметил, что за последнее десятилетие агент-ориентированные модели проделали большой путь

в области имитации работы финансовых рынков за счет возможности программной формализации настроения их участников [15].

В работах Лебарона Блейка (Lebaron Blake) рассматривается агент-ориентированный подход применительно к фондовому рынку США. Автор получил интересные и принципиальные результаты, заключающиеся в том, что при расширении доступного для агентов набора стратегий может значительно меняться траектория биржевых индексов [16; 17]).

В 2016 г. профессор Университета Джорджа Мейсона (George Mason University) Роберт Акстелл опубликовал модель, в которой достаточно простые агенты (около 120 млн) объединяются в группы и этот механизм воспроизводит процесс образования фирм в США (около 6 млн фирм [18]). Эта работа основана на более раннем исследовании – агент-ориентированной модели, симулирующей динамику образования фирм, которая весьма реалистично сгенерировала существовавшую в то время совокупность фирм в США в соответствии с их размером. Полученные результаты были опубликованы в журнале *Science* [19]. В противовес классическим моделям, предполагающим, что экономика находится в состоянии равновесия, в реальности наблюдается значительная динамика практически во всех сферах. Например, автор отмечает, что в США (на момент его публикации) около 3 млн чел. ежемесячно находят новую работу, т. е. примерно 1 из 40 трудящихся меняет работодателя и 1 из 60 фирм закрывается. Соответственно, агенты модели постоянно находятся в движении, приспосабливаются к возникающим обстоятельствам и предопределяют заметные флуктуации на рынке труда. Один из результатов заключается в том, что на рынке труда не получается устойчивых равновесных состояний [20]. Тем не менее, несмотря на микроуровневую турбулентность, асимметричное распределение Ципфа для размеров фирм получилось стационарным.

Один из инструментов эконофизики – статистическая механика была использована для понимания механизмов распределения денег среди взаимодействующих агентов. В работе *Colloquium: Statistical mechanics of money, wealth, and income* это хорошо продемонстрировано [21]. Анализ данных результатов экспериментов по распределению богатства и доходов показал образование двух классов. Большинство населения принадлежит к низшему классу, характеризующемуся экспоненциальным распределением, а небольшая часть высшего класса – степенным. При этом низший класс стациона-

рен, а высший находится в постоянной динамике и неравновесных состояниях.

Весьма интересное исследование было проведено Робертом Пекхэмом (Robert Peckham) – ученым из Гонконгского университета. Им были изучены вопросы распространения различного рода инфекций (H1N1, H5N1, SARS, HIV/AIDS и др.) во взаимосвязи с развитием финансовых кризисов. Автор не только идентифицирует причинно-следственную связь между этими процессами, но и отмечает схожесть механизмов их развития. По его мнению, проблемы на финансовых рынках, как и сообщения о распространении пандемии вызывают панику и экономическую нестабильность, и в этой связи экономисты все чаще обращаются к эпидемиологии с целью поиска эффективного «антидота». В этом смысле инфекционные заболевания переопределяют финансовую нестабильность как патогенную форму, оказывающую негативное влияние на всю социально-экономическую систему страны, а инициаторов кризиса (спекулянтов и пр.) как возбудителей заражения [22].

По словам известного физика Жана-Филиппа Бушо (Jean-Philippe Bouchaud), руководителя исследовательского отдела Capital Fund Management (Париж, Франция), «изучение сложных физических систем за последние 40 лет значительно продвинулось вперед, появились новые идеи и методы. Это актуально и для экономики, поскольку с помощью новых инструментов удалось построить симуляторы, позволяющие выявлять точки бифуркации, вызывающие кризисы. К таким инструментам в первую очередь относятся агент-ориентированные модели, являющиеся более реалистичными и гибкими, нежели классические модели экономики. В отличие от последних, в агентных моделях возможно реализовывать приводящие к панике человеческие эмоции. Страны с развитой экономикой до сих пор борются с последствиями кризиса, и экономисты не могут прийти к согласию по поводу его фундаментальных причин. С использованием новых инструментов мы, безусловно, можем добиться большего» [23].

Нельзя не упомянуть про новое направление в прикладной экономике – агент-ориентированную вычислительную экономику (Agent Based Computational Economics, ACE). Один из идеологов этого направления – профессор Университета штата Айова Ли Тесфатси (Leigh Tesfatsion) определяет процесс построения моделей в соответствии с методологией ACE как лабораторный биологический эксперимент с использованием чашки Петри. Предполагается, что разработчик задает начальные условия для моделируемой системы в соответствии с некоторой целью ее функциони-

рования, а в дальнейшем динамика этого виртуального мира определяется без участия извне, а под воздействием его составных частей. Ли Тесфатси подчеркивает, что парадигма ACE разработана в качестве дополнения к современной экономической теории, предполагающей рациональность и оптимальность ее участников, а также существование равновесия [24]. В свою очередь ACE предполагает большую реалистичность агентов, непредсказуемость их поведения по отношению друг к другу и некую автономность виртуальных миров, в которых они существуют. В проект по созданию таких миров вовлечено много исследователей, а результаты выложены на сайте <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm>.

После критики Аланом Кирманом [25] моделей репрезентативного агента макроэкономической теории предпринимались попытки разработать макроэкономическую теорию с использованием разнородных индивидуумов. Одна из них заключалась в расширении методологии построения динамических стохастических моделей общего равновесия (Dynamic Stochastic General Equilibrium, DSGE) путем включения в них гетерогенных агентов, но самая главная – использование агент-ориентированных моделей. Большое количество успешных примеров в этих направлениях собрано в работе *Computational Economics: Heterogeneous Agent Modeling* [26].

В последние годы этот инструмент прочно вошел в арсенал средств, используемых научными организациями, аналитическими центрами, корпорациями, органами государственного управления и др. применительно к вопросам моделирования и прогнозирования экономических процессов. В октябрьской статье 2003 г. *Agents of creation* [7] журнала *The Economist* агент-ориентированные модели позиционировались как новый инструмент моделирования сложных систем [27], в 2010 г. в этом же издании в статье *Agents of change* они рассматривались как альтернатива динамическим стохастическим моделям общего экономического равновесия и с тех пор постоянно фигурируют в качестве доказавшего свою эффективность программного средства [28].

В редакционной статье журнала *Nature* агентное моделирование рекомендовалось в качестве перспективного и многообещающего инструмента исследования социально-экономических процессов [29].

Моделирование бизнес-процессов

Агентный подход также используется при моделировании бизнес-процессов. В работе *Agent-*

based modeling in marketing: Guidelines for rigor отмечается, что «агент-ориентированное моделирование позволяет понять, как сложные маркетинговые решения возникают из достаточно простых действий, осуществляемых на микроуровне. Такие решения слишком сложны для традиционных аналитических подходов, поэтому агентное моделирование, применяемое для имитации отдельных потребителей и организаций, часто используют для обозначенной проблемы» [30]. В качестве примера авторы реализовали расширенную модель распространения инноваций Басса с использованием агентного подхода.

Исследователи из Силезского университета (Опава, Чехия) в коалиции с коллегами из Дании разработали среду моделирования MAREA (Multi-agent REA framework), интегрированную с ERP-системой (Enterprise Resource Planning). В работе *Is there a Need for Agent-based Modelling and Simulation in Business Process Management?* представлены результаты, полученные с ее помощью на примере модели, имитирующей работу торговой компании по продаже компьютерных кабелей. Конкретно оценивалось влияние изменений в наборе различного рода ресурсов на финансовый результат компании. Расчеты показали, что даже небольшие низкоуровневые изменения оказывают статистически значимое влияние на результаты бизнес-процессов. По мнению разработчиков, агент-ориентированное моделирование в ближайшее время получит большее распространение в управление бизнес-процессами [31].

Программно-аналитический комплекс «МЕБИУС»

В течение многолетней работы в ЦЭМИ РАН были разработаны методологические принципы построения сложных программно-аналитических комплексов, сочетающих различные подходы к моделированию социально-экономических процессов, и в первую очередь агент-ориентированный. Эволюционным путем мы построили модельный комплекс «МЕБИУС»¹, который вообрал в себя преимущества разных подходов и состоит из нескольких блоков (рисунок).

¹Название программно-аналитического комплекса связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, лента Мебиуса является главным символом ЦЭМИ РАН, а его горельеф украшает здание института. Во-вторых, этот знак служит физическим воплощением бесконечности, что соответствует масштабам вычислительных возможностей одного из модулей – «МЕБИУС-суперкомпьютера», способного технически реализовывать модели с численностью порядка 109 агентов на самых производительных в мире системах (в том числе на суперкомпьютерах экзафлопсного уровня).

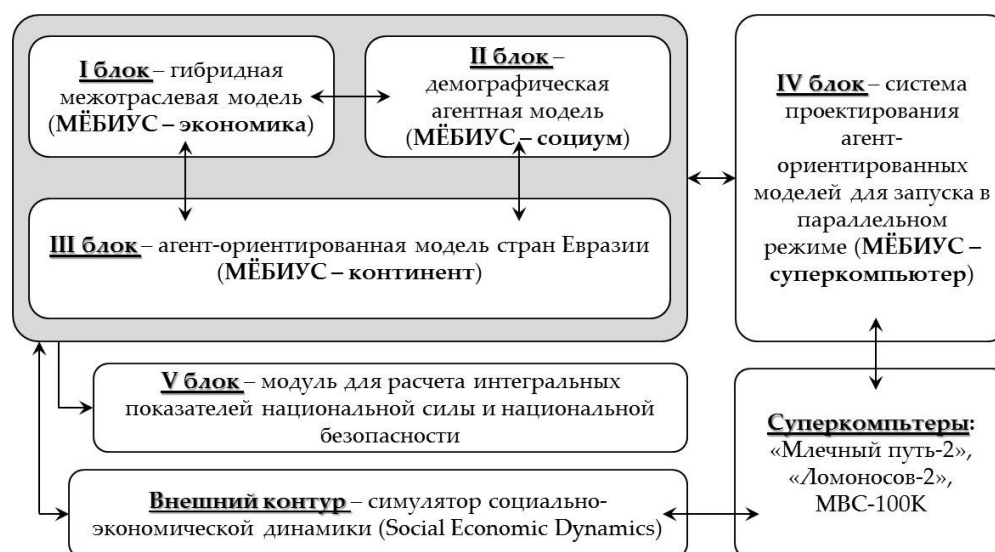


Схема программно-аналитического комплекса «МЕБИУС»

Все блоки комплекса «МЕБИУС», хотя и были изначально разработаны отдельно, тесно связаны друг с другом и представляют собой единое целое. Демографическая агент-ориентированная модель является базовым элементом для агентной модели Евразийского континента, а также определяет динамику численности домашних хозяйств для межотраслевого блока «МЕБИУС-экономика», который, в свою очередь, также связан с моделью стран Евразии. Для ускорения расчетов к этим инструментам может быть подключена система «МЕБИУС-суперкомпьютер», которая в автоматическом режиме перераспределяет исполняемый программный код по задаваемому числу процессоров для выполнения в параллельном режиме [32]¹.

С использованием программного комплекса был проведено множество расчетов, например:

- прогноза изменений возрастно-половой структуры населения регионов России [33];
- демографических изменений в Европейском союзе с учетом важных факторов, таких как внутренние установки людей, влияющие на их стратегию репродуктивного поведения, а также миграционный приток извне [34];
- динамики трудовой миграции между Россией и Китаем [35];
- уровня загрязнений в некоторых регионах РФ с учетом пространственного размещения производств и стационарных источников выбросов [36];

– прогноза основных макроэкономических показателей России и ее субъектов в результате изменения ставок основных налогов, бюджетных субсидий, объема денежной массы, ключевой ставки, цен на основные энергоносители, курса доллара и др. [37].

Отдельным блоком выступает модуль для расчета интегральных показателей национальной силы и национальной безопасности для 193 стран – членов ООН. Веса выбранных факторов (их несколько десятков) были рассчитаны с использованием методов многомерного статистического анализа.

Помимо разработанных в ЦЭМИ РАН блоков программно-аналитического комплекса, совместно с IT-компанией Guangzhou Milestone Software Co., Ltd специалистами Академии общественных наук Китая и Национальным суперкомпьютерным центром КНР был разработан симулятор социально-экономической динамики для более чем 100 стран мира. Этот инструмент используется в составе «МЕБИУСа» следующим образом: симулятор является внешним для него контуром, и таким образом получаемые с его помощью данные оказываются входными для первых трех блоков комплекса, равно как и наоборот [38].

Проект «Цифровая Земля»

9–10 июля 2023 г. в Шанхае прошло ежегодное заседание рабочей группы стран БРИКС по высокопроизводительным вычислениям. И в этой связи было интересно оценить изменения в направлениях применения суперкомпьютерных технологий.

¹Для нас доступны суперкомпьютеры «Млечный путь – 2» (Национальный суперкомпьютерный центр КНР, г. Гуанчжоу), «Ломоносов-2» (МГУ им. М. В. Ломоносова), MBC-100K (Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН).

Каждая страна-участница представила свои приоритеты в этой сфере:

– *Бразилия* – искусственный интеллект и разработку алгоритмов для эффективного распараллеливания компьютерных программ;

– *Индия* – биоинформатику (в первую очередь секвенирование генома и моделирование лекарств), климат и экологию, распространение пожаров;

– *Китай* – искусственный интеллект, транспортные симуляторы, персонифицированную медицину;

– *ЮАР* – климат, океанские течения, болезни, городское планирование;

– *Россия* – климат, демографию.

Вместе с этим самый многообещающий проект – «*Цифровая Земля*» (*Digital Earth*) был поддержан для совместной реализации сразу всеми пятью странами, причем каждая из них будет специализироваться на отдельном направлении: *ЮАР* – на моделировании, оценке и прогнозе изменений в атмосфере Земли; *Бразилия* – на разработке системы для хранения данных; *Индия* – на построении интегрированной платформы для моделирования и проведения расчетов, а *Россия* и *Китай* – на моделировании климата (МГУ им. М. В. Ломоносова, руководители проекта В. В. Воеводин и В. М. Степаненко) и разработке цифрового двойника социально-экономических систем стран мира (национальный суперкомпьютерный центр КНР, IT компания Milestone Ltd., ЦЭМИ РАН).

Одна из частей цифрового двойника, связанная с демографической системой планеты уже разработана на базе агент-ориентированного подхода и реализована в масштабе 1:10 (один агент представляет 10 жителей Земли), а различные прогнозные сценарии рассчитывались на одном из самых быстрых суперкомпьютеров мира – «Млечный путь – 2».

Почему важна такая детализация?

Самый известный демографический прогноз в мире, рассчитываемый департаментом народонаселения ООН, опирается на предположения об обязательных и одинаковых фазовых переходах в социальных системах во всех странах мира, которые предусматривают период высокой рождаемости, сменяющийся периодом снижения рождаемости ниже уровня воспроизводства с последующей стабилизацией на этом уровне. Однако убедительных аргументов в пользу неизменности этих процессов для всех стран не приводится, а учитывая, что упомянутые фазы для стран, проходивших их первыми, предсказаны не были, а по сути, были иденти-

фицированы впоследствии, воспринимать методологию расчетов ООН как незыблемую догму не следует.

Для своего времени используемая ими парадигма моделирования скорее всего была единственно правильная, поскольку погрешность прогнозов незначительна, а при этом рассматривались все страны мира. Но учитывая бурное развитие информационных технологий, стала возможна реализация систем, рассматривающих моделируемые объекты с детализацией до мельчайшего уровня. Эти возможности применимы и необходимы для моделирования человеческого социума.

Во-первых, за счет такой детализации возможно более реалистичное представление людей в компьютерных симуляциях. Например, ООН, когда прогнозирует численность населения крупных государств, таких как Китай или Россия, учитывает показатель прироста населения – суммарный коэффициент рождаемости только для всей страны, без учета региональных особенностей, а ведь они сильно варьируются по соответствующим субъектам. Так, в России вариативность этого важнейшего показателя весьма высока – от 1,04 (Ленинградская область) до 2,94 (Республика Тыва). А дальнейшая возможная детализация, определяющая репродуктивные установки, которые основаны на индивидуальных характеристиках отдельных людей (возраст, уровень дохода, жилищные условия, местность проживания, уровень образования, вероисповедание и т. д.), позволяет значительно повысить уровень реалистичности построенной модели.

Во-вторых, цифровой двойник социальной системы можно увязать с цифровыми системами других сфер жизни – экономической, транспортной, экологической и др. За счет этого возможно оценивать их взаимовлияние и прогноз будущего развития может стать более выверенным.

В-третьих, совмещение цифрового двойника с другими новыми технологиями (индустрия 4.0 и т. д.) позволит выстраивать оптимальную жизненную траекторию для каждого человека.

Помимо такой реалистичности важно отметить, что альтернативные прогнозы весьма ангажированы. Например, для России и Китая ООН прогнозирует снижение численности населения к концу века на 23 и 47% соответственно, а для США наоборот – прирост на 20%.

Такие прогнозы оказывают негативное воздействие как минимум по двум направлениям:

1) деформируют репродуктивные установки людей, поскольку в некоторой степени программируют их сознание на отсутствие позитивных общественных перспектив;

2) демографический прогноз от ООН используется крупнейшими международными организациями, проводящими расчеты динамики ключевых макроэкономических показателей для большинства стран мира. Имеются в виду Всемирный банк и Международный валютный фонд. В их моделях в качестве ключевых факторов экономического роста используется показатель рабочей силы, который так же, как и общая численность населения, для нашей страны снижается. Соответственно, ухудшаются прогнозы по основным экономическим показателям, что в конечном счете создает негативную картину для долгосрочных инвесторов.

Это не означает, что упомянутые показатели нужно искусственно завышать, но с использованием перечисленных инструментов необходимо рассчитывать сценарии, реализация которых позволит выйти на лучшую траекторию развития. Так поступают в Китае – партнере России в сфере высокопроизводительных вычислений и работе по созданию цифровых двойников.

Реализация таких масштабных моделей с большим количеством агентов возможна с применением суперкомпьютерных технологий. Совместно с нашим коллегой, академиком РАН В. В. Окрепиловым в 2023 г. мы издали монографию «Научные решения сложных экономических и социальных задач с помощью суперкомпьютеров», в которой содержится зарубежный опыт реализации агентных моделей на суперкомпьютерах и наши собственные разработки [39]. Рассматриваемые модели относятся к самым разным направлениям: эпидемиология, транспортные симуляторы, пешеходное движение, системы эвакуации и др., а наш опыт сконцентрирован на вопросах демографии. Монография стала результатом многолетних исследований, выполняемых в рамках программ Президиума РАН, выполняемых коллективами ИПРЭ РАН, НИИСИ РАН и ЦЭМИ РАН.

Заключение

Сфера применения агентного моделирования значительно расширилась за последнюю четверть века, вобрав в себя множество направлений в самых разных масштабах – от молекулярного до глобального. Проблемы прошлого века, связанные с потребностями в вычислительных ресурсах для крупномасштабного моделирования, в значительной степени преодолены, и следующим шагом должна стать цифровая симуляция происходящих общественных процессов в реальном времени. Мы выделяем три наиболее приоритетных направления для дальнейшего развития.

Первое – построение моделей в рамках экономических, экологических, эпидемиологических систем независимо от их соответствия существующим политическим границам, которые не имеют большого значения для пандемии COVID-19 или климатических изменений.

Второе направление логично продолжает первое. Все упомянутые системы тесно связаны друг с другом: эпидемии влияют на экономическую динамику, а климатические изменения сдвигают ареалы обитания комаров и новые болезни в мегаполисы северного полушария и т. д. Возникает множество новых вопросов. Например, как урбанизация влияет на здоровье людей, экономический рост и политическую стабильность? Одновременно с этим меняются объем и структура новых данных, на этот процесс также оказывает влияние появление данных из социальных сетей, имеющих геопространственную привязку. Все это создает запрос для создания агент-ориентированных моделей, увязывающих перечисленные системы и возрастающий в прогрессии огромный объем данных.

Третье направление – наполнение моделей реалистичными, когнитивными агентами. В отдельных случаях поведение индивидуумов действительно рационально, т. е. хорошо информированные агенты максимизируют полезность с учетом бюджетных ограничений. Но при других условиях, под воздействием эмоций, в частности страха, переходящего в массовую панику, далекие от оптимальных действия людей могут вызвать обвалы на финансовых рынках, этническое насилие и другие негативные общественные явления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Top500: проект по составлению рейтинга и описаний 500 самых мощных общественно известных суперкомпьютеров мира. URL: <https://www.top500.org> (дата обращения: 04.11.2023).
2. Frontier: сайт суперкомпьютера. URL: <https://www.olcf.ornl.gov/frontier/> (дата обращения: 04.11.2023).
3. The 76th scientific & technical awards 2003|2004 // Academy of Motion Picture Arts and Sciences. URL: <https://www.oscars.org/sci-tech/ceremonies/2004> (дата обращения: 04.11.2023).
4. **Epstein J. M.** Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling. Princeton Univ. Press, 2006. 352 p.
5. **Epstein J. M., Axtell R.** Growing artificial societies: Social science from the bottom up. Brookings Inst. Press: The MIT Press, 1996. 208 p.

6. Population growth and collapse in a multiagent model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley / R. L. Axtell, J. M. Epstein, J. S. Dean [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2002. № 99 (suppl. 3). P. 7275–7279.
7. **Diamond J.** Life with the artificial Anasazi // *Nature*. 2002. № 419. P. 567–568.
8. **Kohler T. A., Gumerman G. J.** Dynamics in Human and Primate Societies: Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes. Oxford Univ. Press., 2000.
9. **Epstein J. M.** Modeling civil violence: An agent-based computational approach // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2002. № 99 (suppl. 3). P. 7243–7250.
10. **Lemos C.** Agent-Based Modeling of Social Conflict: From Mechanisms to Complex Behavior. Berlin: Springer-Verlag, 2017. 137 p.
11. **Levitsky S., Ziblatt D.** How democracies die. N. Y.: Broadway Books, 2018. 300 p.
12. **Luhmann N.** Die Wirtschaft der Gesellschaft. Suhrkamp, 1988. 356 p.
13. **Fleischmann A.** A Model for a Simple Luhmann Economy // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2005. Vol. 8, № 2. URL: <https://www.jasss.org/8/2/4.html> (дата обращения: 04.11.2023).
14. Agent-based modeling for central counterparty clearing risk // *Deloitte*. 2020. April. URL: <https://www2.deloitte.com/uk/en/pages/audit/articles/agent-based-modelling-for-central-clearing-risk.html> (дата обращения: 04.11.2023).
15. Agent-Based Models in Finance: Foundations; Explanatory Power and Applications // *Wilmott Magazine*. URL: <https://wilmott.com/agent-based-models-in-finance-foundations-explanatory-power-and-applications> (дата обращения: 04.11.2023).
16. **LeBaron B.** Agent-based computational finance // *Handbook of computational economics*. 2006. № 2. P. 1187–1233.
17. **LeBaron B.** Microconsistency in Simple Empirical Agent-Based Financial Models // *Computational Economics*. 2019. № 58(6). P. 1–19.
18. **Axtell R. L.** 120 Million Agents Self-Organize into 6 Million Firms: A Model of the U.S. Private Sector // *Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems (AAMAS '16)*. 2016. P. 806–816.
19. **Axtell R. L.** Zipf distribution of U. S. Firm Sizes // *Science*. 2001. № 293(5536). P. 1818–1820.
20. **Axtell R. L.** Endogenous Dynamics of Multi-Agent Firms // *SSRN Electronic Journal*. 2015. № 16–39.
21. **Yakovenko V. M., Rosser J. B.** Colloquium: Statistical mechanics of money, wealth, and income // *Reviews of Modern Physics*. 2009. № 81. P. 1703.
22. **Peckham R.** Economies of contagion: financial crisis and pandemic // *Economy and Society*. 2013. № 42:2. P. 226–248.
23. Agent-based economic models offer more realism // *Financial Times*. URL: <https://www.ft.com/content/f653a4ee-2dce-11e8-a34a-7e7563b0b0f4> (дата обращения: 04.11.2023).
24. **Tesfatsion L.** Agent-Based Computational Economics: Modelling Economies as Complex Adaptive Systems // Iowa State University. Department of Economics. 2002. URL: <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi> (дата обращения: 04.11.2023).
25. **Kirman A. P.** Whom or what does the representative individual represent? // *Journal of economic perspectives*. 1992. № 6(2). P. 117–136.
26. *Computational Economics: Heterogeneous Agent Modeling* / eds: C. Hommes, B. LeBaron. North Holland, 2018. 834 p.
27. Agents of creation. Artificial «agents» can model complex systems // *The Economist*. URL: <https://www.economist.com/science-and-technology/2003/10/09/agents-of-creation> (дата обращения: 04.11.2023).
28. Agents of change. Conventional economic models failed to foresee the financial crisis. Could agent-based modelling do better? // *The Economist*. URL: <https://www.economist.com/finance-and-economics/2010/07/22/agents-of-change> (дата обращения: 04.11.2023).
29. **Farmer J., Foley D.** The economy needs agent-based modelling // *Nature*. 2009. № 460. P. 685–686.
30. **Rand W., Rust R. T.** Agent-based modeling in marketing: Guidelines for rigor // *International Journal of Research in Marketing*. 2011. Vol. 28, iss. 3. P. 181–193.
31. **Halaška M., Šperka R.** Is there a Need for Agent-based Modelling and Simulation in Business Process Management? // *Organizacija*. 2018. № 51(4). P. 255–269.
32. Программно-аналитический комплекс «МЕБИ-УС» – инструмент планирования, мониторинга и прогнозирования социально-экономической системы России / А. Р. Бахтизин, Н. И. Ильин, В. Л. Макаров [и др.] // *Искусственные общества*. 2020. Т. 15, вып. 4. URL: <https://artsoc.jes.su/s207751800012303-2-1> (дата обращения: 04.11.2023).
33. Демографическая агент-ориентированная модель России и оценка ее применимости для решения практических управленческих задач / А. Р. Бахтизин, В. Л. Макаров, А. А. Максаков, Е. Д. Сушко // *Искусственные общества*. 2021. Т. 16, вып. 2. URL: <https://artsoc.jes.su/s207751800015357-1-1> (дата обращения: 04.11.2023).
34. Разработка программной платформы для крупномасштабного агент-ориентированного моделирования сложных социальных систем / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян, А. С. Акопов // *Программная инженерия*. 2019. № 4. С. 167–177.
35. Агент-ориентированный подход при моделировании трудовой миграции из Китая в Россию / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Е. Д. Сушко, А. Ф. Агеева // *Экономика региона*. 2017. Т. 13, вып. 2. С. 331–341.

36. **Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д.** Агент-ориентированная модель как инструмент регулирования экологии региона // Журнал Новой экономической ассоциации. 2020. № 1(45). С. 151–171.
37. **Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Хабриев Б. Р.** Оценка эффективности механизмов укрепления государственного суверенитета России // Финансы: теория и практика. 2018. № 22(5). С. 6–26.
38. Мировые торговые войны: сценарные расчеты последствий / В. Л. Макаров, Цзе Ву, Б. Р. Хабриев, А. Р. Бахтизин // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90, № 2. С. 169–179.
39. **Макаров В. Л., Окрепилов В. В., Бахтизин А. Р.** Научные решения сложных экономических и социальных задач с помощью суперкомпьютеров СПб.: URSS, 2023. 416 с.

REFERENCES

1. Top500: projekt po sostavleniyu reitinga i opisaniy 500 samykh moshchnykh obshchestvenno izvestnykh superkomp'yuteroz mira. Available at: <https://www.top500.org> (accessed: 04.11.2023).
2. Frontier: sait superkomp'yutera. Available at: <https://www.olcf.ornl.gov/frontier/> (accessed: 04.11.2023).
3. The 76th scientific & technical awards 2003 | 2004. Academy of Motion Picture Arts and Sciences. Available at: <https://www.oscars.org/sci-tech/ceremonies/2004> (accessed: 04.11.2023).
4. **Epstein J. M.** Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling. Princeton Univ. Press, 2006. 352 p.
5. **Epstein J. M., Axtell R.** Growing artificial societies: Social science from the bottom up. Brookings Inst. Press: The MIT Press, 1996. 208 p.
6. Population growth and collapse in a multiagent model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley / R. L. Axtell, J. M. Epstein, J. S. Dean [et al.]. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2002;(99(3)):7275–7279.
7. **Diamond J.** Life with the artificial Anasazi. Nature. 2002;(419):567–568.
8. **Kohler T. A., Gumerman G. J.** Dynamics in Human and Primate Societies: Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes. Oxford Univ. Press., 2000.
9. **Epstein J. M.** Modeling civil violence: An agent-based computational approach. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2002;(99(3)):7243–7250.
10. **Lemos C.** Agent-Based Modeling of Social Conflict: From Mechanisms to Complex Behavior. Berlin: Springer-Verlag, 2017. 137 p.
11. **Levitsky S., Ziblatt D.** How democracies die. N. Y.: Broadway Books, 2018. 300 p.
12. **Luhmann N.** Die Wirtschaft der Gesellschaft. Suhrkamp, 1988. 356 p.
13. **Fleischmann A.** A Model for a Simple Luhmann Economy // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2005;(8(2)). Available at: <https://www.jasss.org/8/2/4.html> (accessed: 04.11.2023).
14. Agent-based modeling for central counterparty clearing risk. Deloitte. 2020. April. Available at: <https://www2.deloitte.com/uk/en/pages/audit/articles/agent-based-modeling-for-central-clearing-risk.html> (accessed: 04.11.2023).
15. Agent-Based Models in Finance: Foundations; Explanatory Power and Applications. Wilmott Magazine. Available at: <https://wilmott.com/agent-based-models-in-finance-foundations-explanatory-power-and-applications> (accessed: 04.11.2023).
16. **LeBaron B.** Agent-based computational finance. Handbook of computational economics. 2006;(2):1187–1233.
17. **LeBaron B.** Microconsistency in Simple Empirical Agent-Based Financial Models. Computational Economics. 2019;(58(6)):1–19.
18. **Axtell R. L.** 120 Million Agents Self-Organize into 6 Million Firms: A Model of the U.S. Private Sector. Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems (AAMAS '16). 2016:806–816.
19. **Axtell R. L.** Zipf distribution of U. S. Firm Sizes. Science. 2001;(293(5536)):1818–1820.
20. **Axtell R. L.** Endogenous Dynamics of Multi-Agent Firms. SSRN Electronic Journal. 2015;(16–39).
21. **Yakovenko V. M., Rosser J. B.** Colloquium: Statistical mechanics of money, wealth, and income. Reviews of Modern Physics. 2009;(81):1703.
22. **Peckham R.** Economies of contagion: financial crisis and pandemic. Economy and Society. 2013;(42:2): 226–248.
23. Agent-based economic models offer more realism. Financial Times. Available at: <https://www.ft.com/content/f653a4ee-2dce-11e8-a34a-7e7563b0b0f4> (accessed: 04.11.2023).
24. **Tesfatsion L.** Agent-Based Computational Economics: Modelling Economies as Complex Adaptive Systems. Iowa State University. Department of Economics. 2002. Available at: <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi> (accessed: 04.11.2023).
25. **Kirman A. P.** Whom or what does the representative individual represent? Journal of economic perspectives. 1992;(6(2)):117–136.
26. Computational Economics: Heterogeneous Agent Modeling / eds: C. Hommes, B. LeBaron. North Holland, 2018. 834 p.
27. Agents of creation. Artificial «agents» can model complex systems. The Economist. Available at: <https://www.economist.com/science-and-technology/2003/10/09/agents-of-creation> (accessed: 04.11.2023).
28. Agents of change. Conventional economic models failed to foresee the financial crisis. Could agent-based mod-

- elling do better? The Economist. Available at: <https://www.economist.com/finance-and-economics/2010/07/22/agents-of-change> (accessed: 04.11.2023).
29. **Farmer J., Foley D.** The economy needs agent-based modelling. *Nature*. 2009;(460):685–686.
 30. **Rand W., Rust R. T.** Agent-based modeling in marketing: Guidelines for rigor. *International Journal of Research in Marketing*. 2011;(28(3)):181–193.
 31. **Halaška M., Šperka R.** Is there a Need for Agent-based Modelling and Simulation in Business Process Management? *Organizacija*. 2018;(51(4)):255–269.
 32. Programmno-analiticheskii kompleks «MEBIUS» – instrument planirovaniya, monitoringa i prognozirovaniya sotsial'no-ekonomicheskoi sistemy Rossii / A. R. Bakhtizin, N. I. Il'in, V. L. Makarov [i dr.]. *Iskusstvennye obshchestva*. 2020;(15(4)). Available at: <https://artsoc.jes.su/s207751800012303-2-1> (accessed: 04.11.2023).
 33. Demograficheskaya agent-orientirovannaya model' Rossii i otsenka ee primenimosti dlya resheniya prakticheskikh upravlencheskikh zadach / A. R. Bakhtizin, V. L. Makarov, A. A. Maksakov, E. D. Sushko. *Iskusstvennye obshchestva*. 2021;(16(2)). Available at: <https://artsoc.jes.su/s207751800015357-1-1> (accessed: 04.11.2023).
 34. Razrabotka programmnoi platformy dlya krupno-masshtabnogo agent-orientirovannogo modelirovaniya slozhnykh sotsial'nykh sistem / V. L. Makarov, A. R. Bakhtizin, G. L. Beklaryan, A. S. Akopov // *Programmnyaya inzheneriya*. 2019;(4):167–177. (In Russ.)
 35. Agent-orientirovannyi podkhod pri modelirovanii trudovoi migratsii iz Kitaya v Rossiyu / V. L. Makarov, A. R. Bakhtizin, E. D. Sushko, A. F. Ageeva. *Ekonomika regiona*. 2017;(13(2)):331–341. (In Russ.)
 36. **Makarov V. L., Bakhtizin A. R., Sushko E. D.** Agent-orientirovannaya model' kak instrument regulirovaniya ekologii regiona. *Zhurnal Novoi ekonomicheskoi assotsiatsii*. 2020;(1(45)):151–171. (In Russ.)
 37. **Makarov V. L., Bakhtizin A. R., Khabriev B. R.** Otsenka effektivnosti mekhanizmov ukrepleniya gosudarstvennogo suvereniteta Rossii. *Finansy: teoriya i praktika*. 2018;(22(5)):6–26. (In Russ.)
 38. Mirovye trgovye voyny: stsennyye raschety posledstviy / V. L. Makarov, Tsze Vu, B. R. Khabriev, A. R. Bakhtizin. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2020;(90(2)):169–179. (In Russ.)
 39. **Makarov V. L., Okrepilov V. V., Bakhtizin A. R.** Nauchnye resheniya slozhnykh ekonomicheskikh i sotsial'nykh zadach s pomoshch'yu superkomp'yuterov SPb.: URSS, 2023. 416 s. (In Russ.)