

DOI: 10.29141/2218-5003-2023-14-6-5

EDN: CQLXNE

JEL Classification: L52, C54, L60

Методология управления промышленным комплексом региона: архитектура агент-ориентированной модели

А.Ф. Шориков, Г.Б. Коровин, Д.В. Сиротин

Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, РФ

Аннотация. Промышленность составляет основу экономики государств и отдельных регионов, это сложный, многоуровневый объект. Для оптимизации управления таким объектом требуется разработка специальных экономико-математических моделей. Статья посвящена построению архитектуры модели оптимального управления промышленным комплексом региона на современной теоретико-методологической и инструментальной (программной) основе. Методологической базой исследования послужили классическая теория менеджмента, теории оптимизации и игр. Методы исследования – агент-ориентированный и минимаксный подходы. Обосновано применение агент-ориентированного подхода для моделирования управления промышленным комплексом региона. Предложена трехуровневая архитектура управления, включающая органы власти федерального и регионального уровней, а также уровень управления предприятий (объединенных по видам деятельности). Для каждого уровня определены управляющие агенты, сформирован состав показателей – структура фазового вектора, включающая его атрибуты; основные параметры, используемые управляющие воздействия; риски; модель динамики параметров; модель данных, которыми располагает объект. Разработана иерархическая структура управляющих и информационных связей в модели. На основе минимаксного подхода создан алгоритм действий агентов по выбору оптимальных управляющих воздействий. Предложенная архитектура позволит создать гибкий инструментарий для оценки сценариев развития промышленности и расчета оптимального пошагового управления промышленным комплексом региона.

Ключевые слова: управление; агент-ориентированное моделирование; региональный промышленный комплекс; минимаксный подход; управление промышленностью.

Финансирование: Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-28-01868 «Разработка агент-ориентированной модели сетевого промышленного комплекса в условиях цифровой трансформации».

Информация о статье: поступила 23 июня 2023 г.; доработана 25 августа 2023 г.; одобрена 11 сентября 2023 г.

Ссылка для цитирования: Шориков А.Ф., Коровин Г.Б., Сиротин Д.В. (2023). Методология управления промышленным комплексом региона: архитектура агент-ориентированной модели // Управленец. Т. 14, № 6. С. 63–76. DOI: 10.29141/2218-5003-2023-14-6-5. EDN: CQLXNE.

Methodology for regional industrial complex management: Architecture of an agent-based model

Andrey F. Shorikov, Grigory B. Korovin, Dmitry V. Sirotnin

Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Industry is the backbone of the economy of developed countries and individual regions. To optimize management processes in such a complex and multi-level sector, specific economic-mathematical models and practical tools have to be developed. The paper discusses the optimal architecture of the regional industrial complex management model on a modern theoretical-methodological and instrumental (program) basis. The classical management theory, optimization theory and game theory constitute the methodology of this study. Among the research methods applied are agent-based and minimax approaches. We substantiate the use of agent-based modelling to simulate administering the regional industrial complex. The paper presents a three-tiered management architecture consisting of federal, regional and company level authorities (united by type of activity). For each level, control agents are identified and a set of indicators formed, which cover the structure of the phase vector, including its attributes, key parameters, control actions used, risks, a model of the parameters' dynamics, and a model of the data possessed by the object. We build a hierarchical structure of administration and information relationships in the model and, based on the minimax approach, create an algorithm of agents' efforts to select optimal control actions. The proposed architecture will allow forming a flexible toolkit for assessing industrial development scenarios and producing the best step-by-step management pattern of the regional industrial complex.

Keywords: management; agent-based modelling; regional industrial complex; minimax approach; industrial management.

Funding: The article was funded by the Russian Science Foundation as part of the research project no. 22-28-01868 "Developing an agent-based model of a network industrial complex amid digital transformation".

Article info: received June 23, 2023; received in revised form August 25, 2023; accepted September 11, 2023

For citation: Shorikov A.F., Korovin G.B., Sirotin D.V. (2023). Methodology for regional industrial complex management: Architecture of an agent-based model. *Upravlenets / The Manager*, vol. 14, no. 6, pp. 63–76. DOI: 10.29141/2218-5003-2023-14-6-5. EDN: CQLXNE.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленность составляет основу экономики индустриально развитых государств, таких как Российская Федерация, и их территорий, что актуализирует задачу управления промышленными комплексами регионов. Промышленный комплекс представляет сложный объект управления, требующий моделирования его субъектно-объектной структуры, многомерной экосистемы связей [Сморозинская, 2017], в которой процессы, имеющие глобальный характер (в том числе цифровизация), создают эффекты, накладываемые на подсистемы всех уровней (организации, сетевые сообщества, индустриальные комплексы и др.). При моделировании процессов управления промышленным комплексом региона необходимо учитывать сложности, связанные с корректностью понимания состава такого комплекса, целевыми ориентирами субъектов управления и критериями оптимальности управления промышленным комплексом.

Эффект от управляющих воздействий на развитие отраслей экономики отдельных территорий может быть оценен при помощи модели, учитывающей развитие промышленных видов деятельности, влияние основных производственных факторов, а также современных темпов технологического и цифрового развития. Процесс построения такой модели можно разбить на три этапа. Первый этап предполагает формулировку задач будущей концептуальной модели, формирование логической структуры, основных элементов, алгоритма работы модели. На втором этапе количественно оцениваются основные параметры модели, формализуются стратегии, алгоритмы действий, взаимосвязи агентов. На заключительном этапе строится программная оболочка модели. При этом проверяется адекватность отклика входных сигналов в рамках оценки взаимосвязи между агентами, осуществляется калибровка модели, планируется и проводится эксперимент с помощью прикладной программы [Швецов, Дианов, 2019].

Статья развивает полученные ранее результаты [Акбердина, Шориков, 2022; Коровин, 2022; Сиротин, 2019] по построению детерминированной экономико-математической модели прогнозирования состояния и оптимизации управления производственным потенциалом промышленности на основе трехуровневой иерархической дискретной управляемой динамической системы. Целью настоящего исследования является построение архитектуры модели управления

промышленным комплексом региона. Для достижения этой цели решены следующие задачи: проанализированы теоретические положения и методология агентного моделирования, предложен подход к агент-ориентированному моделированию процессов управления развитием промышленного комплекса региона РФ, сформирована логическая структура модели, разработаны основные элементы и алгоритмы работы модели.

МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Широкое применение, в частности для моделирования промышленности, в последние годы находят методы имитационного моделирования, экстраполяции, экспертных оценок, используемые для построения прогнозов социально-экономического развития территорий [Ивантер, 2016; Широ́в, Гусев, Янтовский, 2012] и отраслей промышленности [Широ́в, Янтовский, 2017; Макаров, Бахтизин, Сушко, 2017; Машкова и др., 2018; Maouane et al., 2021]. В числе наиболее значимых российских моделей на базе данных методов можно выделить макроэкономическую модель RUSEC и ее развитие в моделях экономического равновесия [Макаров, Бахтизин, Бахтизина, 2005], агент-ориентированную региональную модель «Губернатор» (ЦЭМИ РАН) [Сушко, 2012], комплекс моделей на основе модели RIM, включающий региональную социально-экономическую модель NORM (ИНП РАН) [Широ́в, Янтовский, 2017], а также ряд других перспективных моделей: макроструктурную модель российской экономики (Центр фундаментальных исследований ГУ ВШЭ), сценарную динамическую модель демографической ситуации (ИИММ КНЦ РАН) [Маковеев, 2016] и др. Функции имитационных и системно-динамических моделей, как правило, включают возможности управленческого моделирования отраслевых комплексов, межотраслевых связей, управления производственной программой, бизнес-процессами и др. [Лычкина, 2009].

Создатели модели RIM указывают, что макроэкономические модели, ориентированные на решение практических задач, должны увязывать динамические и структурные (отраслевые) характеристики развития экономики, иметь прогностические способности, учитывать ресурсные и иные ограничения, отражать межотраслевые взаимодействия, отслеживать поведение ключевых экономических агентов на основе

эконометрических уравнений и тождеств, иметь в качестве экзогенных переменных параметры экономической политики [Широв, Янтовский, 2017].

Одним из современных подходов, включающих широкий инструментарий, выступает методология агент-ориентированного моделирования (АОМ), которая рассматривает экономическую систему как сообщество агентов, описывает их связи, ресурсы, стратегии и алгоритмы поведения. АОМ предполагает построение вычислительного инструмента моделирования искусственного общества, состоящего из взаимодействующих друг с другом агентов. Под агентами понимаются субъекты экономических отношений, выполняющие определенные функции и взаимодействующие между собой по определенным правилам в описанной среде.

Применение АОМ в социально-экономической сфере имеет теоретико-методологическое обоснование. Отношение к экономической системе как к совокупности разнородных агентов и их координации на примере промышленности описывал J. Stiglitz, отмечая ее децентрализованное поведение, радикально различные цели разнородных агентов [Simoli и др., 2006]. Растущий интерес к агентному моделированию связан со свойствами экономических агентов, к которым можно отнести: независимость агентов друг от друга (при этом каждый агент решает свою индивидуальную задачу); ограничение возможностей агентов рамками заданных пользователем правил; функционирование агентов в ограниченном пользователем пространстве и времени [Макаров, Бахтизин, Сушко, 2015].

Вместе с тем при применении АОМ могут возникать проблемы, связанные с неправильной интерпретацией результатов экспериментов, необходимостью адекватной формализации обучения агентов, особенностями калибровки параметров модели, сложностью спецификации стратегий агентов и др. [Самков, Швецов, 2017]. Несмотря на указанные сложности, развитие подходов на базе агентных моделей открывает новые возможности в имитационном моделировании.

Если рассматривать только наиболее значимые исследования, основанные на АОМ, необходимо указать на работы В.Л. Макарова и А.Р. Бахтизина с соавторами. Их труды по созданию и применению агентных моделей легли в основу российской научной базы компьютерного симуляционного моделирования экономических систем. Так, на основе разработанной в 1997 г. академиком В.Л. Макаровым первой отечественной модели общего экономического равновесия (Computable General Equilibrium model, CGE-модель) и нейросетевых алгоритмов была создана агент-ориентированная модель социально-экономической системы. В качестве экономических агентов авторы выделили государственный, рыночный, банковский секторы, домашние хозяйства (как совокупного потребителя),

правительства различных уровней (учитывая внебюджетные фонды) и внешний мир [Макаров, Бахтизин, Бахтизина, 2005]. С учетом теневого сектора выделено семь агентов. Производственная деятельность отдельных агентов (государственный, рыночный, теневой) моделируется на основе функции Кобба – Дугласа [Бахтизин, 2007]. ЦЭМИ РАН совместно с Институтом психологии РАН разработал агент-ориентированную модель экспертизы научных проектов и принятия управленческих решений об их финансовой поддержке [Клейнер, Рыбачук, Ушаков, 2019]. Особенностью модели является учет индивидуальных экономико-психологических характеристик агентов, их квалификации и склонности к субъективности.

К важным результатам ЦЭМИ РАН в развитии АОМ также можно отнести разработку агент-ориентированной модели регионального социо-эколого-экономического развития [Макаров, Бахтизин, Сушко, 2020]; системы имитации функционирования механизмов государственных закупок [Макаров и др., 2017]; модели регулирования промышленных выбросов на основе оптимизации системы торговли квотами на выбросы [Макаров, Бахтизин, Сушко, 2017]. Менее масштабными, но все же интересными являются работы, связанные с агентным моделированием воспроизводства научного потенциала РФ, функционированием рынка авиаперевозок и др. [Макаров, Бахтизин, 2009].

Существует множество других примеров применения АОМ в исследованиях развития промышленного комплекса России и субъектов РФ в разрезе отдельных видов деятельности [Горчакова, Шабалов, 2017; Медведев, Аксенов, 2012]. В рамках компьютерной реализации модели «инновационной воронки» [Фролова, Селянинов, 2012] сотрудниками Пермского государственного национального исследовательского университета был предложен оригинальный подход к оценке развития инновационной системы, учитывающий количественные и качественные эффекты воздействия. В работе [Машкова и др., 2018] для решения задач моделирования динамики экономических процессов, наблюдаемых в различных отраслях, использован комплексный подход, включающий помимо АОМ и системной динамики также межотраслевые балансовые модели, элементы систем искусственного интеллекта и др. Е.В. Кислицын и В.В. Городничев предложили имитационную модель, разработанную в нотации системной динамики, где в качестве структурных элементов выделены отдельные отрасли, связанные динамическими петлями обратной связи. Имитационная модель позволила спрогнозировать ряд сценариев развития отраслей промышленности с учетом изменения трудовых ресурсов и инвестирования в основные производственные фонды [Кислицын, Городничев, 2021].

Наиболее значимая зарубежная модель, основанная на АОМ, – Eurase. Она была разработана

в 2009 г. совместными усилиями ученых ряда европейских стран (Германия, Великобритания, Франция, Италия и др.) [Cincotti, Raberto, Teglio, 2010]. Для данной модели была создана методология, известная как ACE (Agent-based Computational Economics). Объектом исследования Eurace является весь Европейский союз. Система моделирует рыночное взаимодействие основных секторов экономики стран Евросоюза на базе реальных экономических механизмов. Симулирование экономической среды Евросоюза создается посредством влияния на динамику развития экономики различных режимов и инструментов макроэкономической политики. Модель Eurace получила ряд расширений, например, одно из них создано исследователями университетов Жауме I (Испания) и Генуи (Италия) и позволяет охватить широкий спектр экономических и финансовых параметров интеграции между отдельными странами и их кластерами [Petrovic et al., 2017].

По результатам некоторых исследований использование методов машинного обучения и АОМ повышает их общую производительность [Turgut, Vozdag, 2022], отмечается возможность включения в агентные модели нейронных сетей, способствующих адаптации и обеспечивающих реалистичность обучения системы [Bonabeau, 2002]. В этой же работе выделены условия, определяющие целесообразность применения АОМ: наличие сложных взаимоотношений между агентами; неоднородность популяции (агентов); неоднородность и сложность топологии взаимодействий (между агентами); нелинейность поведения агентов; наличие сложностей, связанных с их обучением и адаптацией; необходимость ориентации в пространстве (отсутствие фиксации агентов в пространстве). Отмечается высокий потенциал агентных моделей в сфере анализа экономических кризисов в силу возможности решения нелинейных задач, таких как оценка ликвидности, банкротства, системных рисков, эффектов домино и др. [Raberto, Teglio, Cincotti, 2012; Delli Gatti et al., 2010]. Интерес представляет ряд макромоделей, построенных на базе АОМ [Popoyan, Napoletano, Roventini, 2017; Gabbi et al., 2015; Gualdi et al., 2015]. Так, для проверки результативности выполнения сценариев проводимой в Италии денежно-кредитной и фискальной политики был использован агентный подход на базе кейнсианской модели [Dosi, Fagiolo, Roventini, 2010].

В числе предметных сфер активного применения АОМ можно выделить исследование особенностей распространения инноваций [Scheller, Johanning, Bruckner, 2019; Kiesling et al., 2011], изучение влияния цифровых технологий на деятельность различных отраслей и на экономику в целом [Chaniyas, Myers, Hess, 2019]. Существуют исследования, в которых приняты попытки применить агент-ориентированные модели в области технологических инноваций [Zhangqi, Zhuli, Lingyun, 2022; Stummer et al., 2015;

Jensen, Chappin, 2017]. В качестве теоретической основы агент-ориентированного моделирования технологических изменений, как правило, выступают три основных направления: теория сложных систем, объясняющая формирование особых свойств, структур в результате взаимодействия простых агентов, позволяющая отойти от жестко детерминированных взглядов [Цветков, 2017; Bonabeau, 2002]; теория игр, в рамках которой решения агентов опираются не только на внутреннюю логику, но и на действия других участвующих агентов [Tian, 2014; Cullen, Alpcan, Kalloniatis, 2022]; теория диффузии инноваций в области формирования отношения агентов к новым технологиям [Kiesling et al., 2011; Greenhalgh et al., 2004].

По своим свойствам агентное моделирование индуктивно, что отличает его от большинства методов моделирования, использующих в основном агрегированные показатели, ограничивающие возможности структурной оценки (в том числе отраслевого развития). При этом возможности моделирования отдельных элементов системы (таких как, например, подвиды обрабатывающих видов деятельности) при симуляции задач отклика на внешние условия, сценарного развития и прогнозирования изменения самой системы (прежде всего экономической) сегодня нуждаются в дальнейшем развитии. Сотрудниками Института экономики УрО РАН обоснована эффективность агент-ориентированного подхода для формализации систем иерархического [Шориков, 2006] управления и прогнозирования развития региональных промышленных комплексов [Акбердина, Шориков, 2022].

КОНЦЕПЦИЯ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ИЕРАРХИЧЕСКОГО МИНИМАКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

В результате анализа существующих подходов к построению экономико-математической модели оптимизации управления региональным промышленным комплексом нами предложена архитектура, опирающаяся на методологию АОМ. Модель состоит из трех уровней управления: федерального, регионального и уровня предприятий, объединенных по видам деятельности. В качестве отдельного объекта управления мы будем рассматривать совокупность предприятий, относящихся к одному классу промышленного вида деятельности в соответствии с классификацией ОКВЭД. При этом федеральный уровень управления является доминирующим, ему подчиняется региональный уровень управления, доминирующий над уровнем управления видами деятельности. Виды деятельности (классы в соответствии с классификацией ОКВЭД) регионального промышленного комплекса рассматриваются как объекты, управляемые агентами нижнего уровня, которые в соответствии с иерархией подчиняются агентам высших уровней. Агенты разных уровней имеют различные цели и ресурсы для принятия решений.

Учитывая доступный в публикациях опыт создания моделей, основанных на АОМ (например, моделей ЦЭМИ, Eurase), можно говорить об обоснованности применения секторного подхода – использования видов экономической деятельности в качестве отдельных объектов, управляемых агентами. Это позволяет более точно моделировать динамику и структуру промышленного комплекса, учитывать специфические свойства предприятий, ведущих производственную деятельность в рамках этого подвида деятельности, разные характеристики использования факторов производства, производственные технологии. Параметры этих агентов можно более точно оценивать благодаря детальной официальной статистике, собираемой во всех регионах и в экономике страны в целом.

Считаем, что выбор таких объектов и агентов обоснован, поскольку эти сектора в значительной степени автономны [Кислицын, Городничев 2021], действуют в отдельных рыночных нишах, имеют собственную производственную и технологическую базу, обладают различной степенью интеграции в различные производственные цепочки и финансово-промышленные структуры, выпускают продукцию различного рода. При этом для каждого объекта промышленной деятельности региона идентифицируется модель динамики основных показателей, их подверженность влиянию управляющих воздействий и рисков.

Поскольку промышленный комплекс конкретного региона тесно связан с другими регионами, вплетен в промышленные цепочки и глобальные промышленные структуры и имеет значительные трансграничные материальные потоки, отсутствует необходимость отражения в предлагаемой модели обязательного обеспечения внутрирегионального баланса материальных ресурсов и достижения равновесия по этим параметрам.

Предлагаемый подход используется для формирования общей экономико-математической модели,

в рамках которой формулируется задача гарантированной (минимаксной) оптимизации трехуровневого иерархического управления региональным промышленным комплексом.

Макромодель позволяет представить уровни управления, основных управляющих субъектов, объекты промышленной деятельности, определить свойства среды, ограничения и используемые региональным промышленным комплексом ресурсы (рис. 1).

В итоге с учетом структуры управления промышленным комплексом региона в модели предлагается ограничиться тремя типами агентов: 1) совокупность агентов, управляющих группами промышленных предприятий одного класса ОКВЭД (на данный момент это 29 агентов); 2) региональные органы власти; 3) федеральные органы власти.

СОСТАВ И СТРУКТУРА АГЕНТОВ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Агенты каждого уровня управления имеют свою целевую функцию, на основании которой производят оценку состояния объектов регионального промышленного комплекса региона в каждый период времени с учетом их ключевых параметров. Для каждого вида региональной промышленной деятельности, управляемого соответствующим агентом, рассчитываются собственные параметры целевой функции. Для каждого уровня управления предусмотрен набор возможных управляющих воздействий в пределах ограничений для каждого периода времени, в рамках размера средств для стимулирования развития промышленности, технологического развития, внедрения новых институтов.

Для каждого периода учитывается наличие неконтролируемых возмущений и рисков, влияющих на функционирование вида промышленной деятельности, связанных, например, с девальвацией, ограничениями импорта и экспорта, авариями, в модель вво-

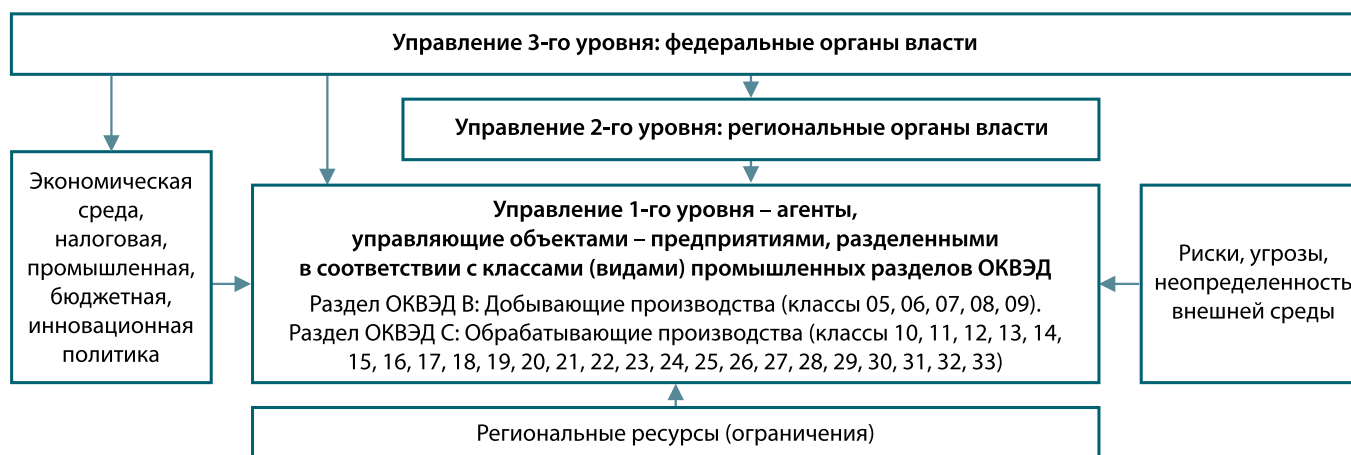


Рис. 1. Макромодель управления региональным промышленным комплексом

Fig. 1. Macromodel of regional industrial complex management

дится соответствующий векторный элемент. Отдельно оценивается спрос на продукцию каждого вида деятельности в каждый период времени, задаваемый на основе расчетных данных. Для всех элементов предусмотрены ограничивающие параметры, оцениваемые на основании имеющейся статистики или экспертным методом.

Базовые параметры состояния конкретного объекта управления – регионального промышленного комплекса или вида деятельности – представлены в мо-

дели в виде фазового вектора (таблица). Фазовый вектор объекта включает следующие основные параметры: атрибуты (ключевые признаки), финансово-экономические параметры, реакцию на возможные управляющие воздействия, степень подверженности возмущениям (случайным событиям, рискам), модель динамики собственных параметров, характеристику данных, которые связаны с объектом. Каждым объектом предлагаемой модели управляет агент, который руководствуется выбранным критерием качества – це-

Структура основных элементов модели управления региональным промышленным комплексом
Key components of the model of regional industrial complex management

Группы параметров агента	Параметры агента
Атрибуты	Вид экономической деятельности Класс экономической деятельности
Параметры	Среднегодовая численность работников организаций, тыс. чел. Основные фонды, млн р. Валовая добавленная стоимость, млн р. Объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами, млн р. Сальдированный финансовый результат организаций, млн р. Инвестиции в основной капитал, млн р. Затраты на внедрение и использование цифровых технологий, млн р.
Управляющие воздействия (региональный уровень)	Региональные бюджетные затраты на развитие промышленности (программы развития отраслей), млн р. Субсидии из бюджета региона, направляемые на стимулирование технологического (цифрового) развития промышленности, млн р. Величина государственных закупок в промышленном секторе со стороны региональных властей, млн р.
Управляющие воздействия (федеральный уровень)	Величина налоговой нагрузки (НДС, налог на прибыль), % Величина ключевой ставки, % Курс валютной пары евро – доллар, р. Федеральные бюджетные затраты на развитие промышленности (программы развития отраслей), млн р. Величина государственных закупок в секторе со стороны федеральных органов власти, млн р.
Возмущения	Прекращение (ограничение) экспорта, % Прекращение (ограничение) импорта, % Прямой ущерб от техногенных, природных чрезвычайных ситуаций, млн р.
Модель динамики параметров	Рассчитывается на основе статистических данных для каждого параметра с использованием регрессионной модели, модели идентификации или экспертным путем
Модель данных, которыми располагает объект	Доступ к информации об объекте управления, которой владеет агент
Включенность сектора в информационную сеть региона	Склонность предприятий сектора к обмену собственными результатами, технологиями, другой информацией. Характеристика (стратегия) информационного взаимодействия с другими агентами на основе исследования мнений руководителей
Критерии качества, элементы целевой функции управления группой промышленных предприятий, относящихся к виду деятельности	Добавленная стоимость предприятий вида деятельности, млн р. Темпы роста промышленного производства вида деятельности, % Совокупный финансовый результат предприятий вида деятельности, млн р. Налоговые поступления от предприятий вида деятельности, млн р.
Критерии качества, элементы целевой функции управления промышленным комплексом регионального уровня	Валовый региональный продукт, млн р. Темпы роста промышленного производства региона, % Совокупный финансовый результат предприятий промышленного комплекса региона, млн р. Налоговые поступления, млн р.
Критерии качества, элементы целевой функции управления промышленным комплексом федерального уровня	Валовый региональный продукт, млн р. Темпы роста промышленного производства региона, % Налоговые поступления, млн р.

левой функцией агента (таблица). Параметры фазового вектора конкретного объекта дополняются геометрическими ограничениями, как правило, на основе истории реализации их максимальных и минимальных значений. Параметры и коэффициенты предлагаемой модели рассчитываются на базе доступной региональной статистики.

В таблице описан исходный состав фазового вектора для рассматриваемых объектов управления, который подлежит последующей корректировке и уточнению в соответствии с доступностью и надежностью имеющихся данных. Оценки значимости каждого параметра, входящего в описание регионального промышленного комплекса и отдельных видов деятельности – значений соответствующих фазовых векторов в каждый период времени, производятся на основании их значений за предыдущие периоды, примененных управляющих воздействий со стороны региональных и федеральных органов власти, величины реализации возмущений, рисков и параметров спроса. При формировании модели динамики конкретного объекта управления коэффициенты «усиления» и взаимосвязи параметров его фазового вектора определяются на базе статистических данных о динамике реализации этих показателей в течение определенного промежутка времени, например за десять или пятнадцать лет, с периодом в один год, и решения задачи идентификации параметров рассматриваемой дискретной управляемой динамической системы, например, с помощью комбинированного итерационного метода, регрессионного анализа или экспертным путем.

ОТНОШЕНИЯ И СВЯЗИ

В ТРЕХУРОВНЕВОЙ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Общая система управления промышленным комплексом, заложенная в предлагаемой модели, имеет трехуровневую структуру (рис. 2). В общей структуре модели федеральные и региональные органы власти в лице агентов управления P и E , ориентируясь на состояние регионального промышленного комплекса, формируют собственные управляющие воздействия для достижения целевых показателей, заложенных в их целевые функции. Агенты E_i – предприятия одного i -го вида деятельности, ориентируясь на доминирующих агентов P и E , генерируют управляющие воздействия на собственные объекты – региональные промышленные предприятия i -го вида деятельности.

Полагается, что региональный промышленный комплекс имеет мультиагентную организацию и состоит из n видов деятельности, входящих в добывающую, обрабатывающую и другие отрасли. Региональный промышленный комплекс рассматривается в целом как основной объект I , управляемый доминирующим агентом E , отождествляемым с органом управления региональным промышленным комплексом, который подчиняется федеральным органам власти – федеральному доминирующему агенту P , отождествляемому с органом управления промышленностью РФ. Имеющиеся виды деятельности регионального промышленного комплекса рассматриваются как вспомогательные объекты I_i , $i \in \overline{1, n} = \{1, 2, \dots, n\}$, управля-



Рис. 2. Управляющие и информационные связи модели управления региональным промышленным комплексом

Fig. 2. Administration and information relationships in the model of regional industrial complex management

емые соответствующими подчиненными агентами E_i . Эти агенты подчиняются агентам более высокого уровня P и E , имеют собственные цели и информацию для принятия управленческих решений.

ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТОВ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Приведем формализованное описание моделей динамики объектов регионального промышленного комплекса при наличии возмущений, рисков и информационной неопределенности относительно спроса на продукцию предприятий.

Предполагается, что динамика основного объекта I , управляемого доминирующим агентом E , описывается следующим векторно-матричным линейным рекуррентным уравнением:

$$X(t+1) = A(t)X(t) + B(t)W(t) + C(t)U(t) + D(t)V(t) + E(t)S(t), X(0) = X_0, \quad (1)$$

где $X(t)$ – фазовый вектор объекта I в период времени $t \in \overline{0, T-1}$, $X(t) \in R^k$, $k \in N$, X_0 – начальное значение фазового вектора (здесь и далее для $\alpha \in N$ символом R^α обозначается α -мерное векторное пространство векторов-столбцов, даже если из экономии места они записаны в виде строки); $W(t)$ – вектор управляющего воздействия (управления) агента P в период времени $t \in \overline{0, T-1}$, $W(t) \in R^m$, $m \in N$; $U(t)$ – вектор управляющего воздействия (управления) агента E в период времени $t \in \overline{0, T-1}$, $U(t) \in R^p$, $p \in N$; $V(t)$ – вектор неконтролируемых возмущений и рисков в период времени $t \in \overline{0, T-1}$, влияющих на функционирование объекта I , $V(t) \in R^q$, $q \in N$; $S(t)$ – вектор спроса на продукцию объекта I в период времени $t \in \overline{0, T}$, $S(t) \in R^s$, $s \in N$; $A(t)$ – действительная матрица размерности $(k \times k)$, элементы которой характеризуют динамику и взаимовлияние показателей состояния фазового вектора регионального промышленного комплекса в период времени $t \in \overline{0, T-1}$; $B(t)$ – действительная матрица размерности $(k \times m)$, элементы которой характеризуют интенсивность и влияние управляющих воздействий федеральных органов власти (агента P) на показатели состояния фазового вектора регионального промышленного комплекса в период времени $t \in \overline{0, T-1}$; $C(t)$ – действительная матрица размерности $(k \times p)$, элементы которой характеризуют интенсивность и влияние управляющих воздействий региональных органов власти – агента E на показатели состояния фазового вектора регионального промышленного комплекса; $D(t)$ – действительная матрица размерности $(k \times q)$, элементы которой характеризуют влияние неконтролируемых возмущений на показатели состояния фазового вектора регионального промышленного комплекса; $E(t)$ – действительная матрица размерности $(k \times s)$,

элементы которой характеризуют влияние параметров спроса на продукцию предприятий на показатели состояния фазового вектора регионального промышленного комплекса.

Предполагается, что динамика видов деятельности регионального промышленного комплекса – объектов I_i , $i \in \overline{1, n}$, управляемых подчиненными агентами E_i , описывается следующими векторно-матричными линейными рекуррентными уравнениями:

$$X^{(i)}(t+1) = A^{(i)}(t)X^{(i)}(t) + B^{(i)}(t)W(t) + C^{(i)}(t)U(t) + \bar{C}^{(i)}(t)U^{(i)}(t) + D^{(i)}(t)V^{(i)}(t) + E^{(i)}(t)S^{(i)}(t), X^{(i)}(0) = X_0^{(i)}, i \in \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $X^{(i)}(t)$ – фазовый вектор объекта I_i в период времени $t \in \overline{0, T-1}$, $X^{(i)}(t) \in R^{k_i}$, $k_i \in N$, $X_0^{(i)}$ – начальное значение фазового вектора; $U^{(i)}(t)$ – вектор управляющего воздействия (управления) агента E_i в период времени $t \in \overline{0, T-1}$, $U^{(i)}(t) \in R^{p_i}$, $p_i \in N$; $V^{(i)}(t)$ – вектор неконтролируемых возмущений и рисков в период времени $t \in \overline{0, T-1}$, влияющих на функционирование объекта I_i , $V^{(i)}(t) \in R^{q_i}$, $q_i \in N$; $S^{(i)}(t)$ – вектор спроса на продукцию объекта I_i в период времени $t \in \overline{0, T}$, $S^{(i)}(t) \in R^{s_i}$, $s_i \in N$; $A^{(i)}(t)$ – действительная матрица размерности $(k_i \times k_i)$, элементы которой характеризуют динамику и взаимовлияние показателей состояния фазового вектора i -го сектора регионального промышленного комплекса в период времени $t \in \overline{0, T-1}$; $B^{(i)}(t)$ – действительная матрица размерности $(k_i \times m)$, элементы которой характеризуют интенсивность и влияние управляющих воздействий федеральных органов власти – агента P на показатели состояния фазового вектора i -го сектора регионального промышленного комплекса в период времени $t \in \overline{0, T-1}$; $C^{(i)}(t)$ – действительная матрица размерности $(k_i \times p)$, элементы которой характеризуют интенсивность и влияние управляющих воздействий региональных органов власти – агента E на показатели состояния фазового вектора i -го сектора регионального промышленного комплекса; $\bar{C}^{(i)}(t)$ – действительная матрица размерности $(k_i \times p_i)$, элементы которой характеризуют интенсивность и влияние управляющих воздействий органов управления i -м сектором регионального промышленного комплекса – агента E_i на показатели состояния фазового вектора регионального промышленного комплекса; $D^{(i)}(t)$ – действительная матрица размерности $(k_i \times q)$, элементы которой характеризуют влияние неконтролируемых возмущений на показатели состояния фазового вектора регионального промышленного комплекса; $E^{(i)}(t)$ – действительная матрица размерности $(k_i \times s_i)$, элементы которой характеризуют влияние параметров спроса на продукцию на показатели состояния фазового вектора регионального промышленного комплекса.

Модель предполагает, что деятельность агента E , управляющего региональным промышленным комплексом – обобщенным основным объектом I , коор-

динируется федеральным органом управления промышленностью РФ – федеральным доминирующим агентом P , которому он подчиняется. Деятельность каждого подчиненного агента $E_i, i \in \overline{1, n}$, управляющего i -м видом деятельности регионального промышленного комплекса, координируется доминирующими агентами P и E , которым он подчиняется. Для агента E все агенты $E_i, i \in \overline{1, n}$, управляющие предприятиями, относящимися к i -му виду деятельности регионального промышленного комплекса, в рассматриваемой системе равнозначны.

АЛГОРИТМ ДЕЙСТВИЙ АГЕНТОВ АОМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ РЕГИОНА

Алгоритм решения рассматриваемой многошаговой задачи минимаксной оптимизации (оптимизации гарантированного результата) управления региональным промышленным комплексом можно представить в виде реализации последовательности одношаговых действий. Нужно отметить, что этот алгоритм сохраняется на всем временном периоде модели и на данный момент не предусматривает способности агентов обучаться и менять свои алгоритмы поведения.

Этап 1. Формирование исходных данных: определение числа учитываемых видов промышленной деятельности в регионе и числа периодов управления; определение учитываемых социально-экономических параметров промышленного комплекса, возможных управляющих воздействий со стороны региональных и федеральных органов власти, возмущений, рисков и объемов спроса; ввод начальных значений параметров фазовых векторов.

Этап 2. Формирование переменных данных: создание матриц коэффициентов, характеризующих динамику социально-экономического развития регионального промышленного комплекса, взаимовлияние отдельных параметров, региональных и федеральных управляющих воздействий, возмущений и спроса – в виде матриц размерностей, которые определяют дискретные векторно-матричные рекуррентные уравнения (1), (2), описывающие динамику объектов l и $l_i, i \in \overline{1, n}$, модели. Дополнительно необходимо создать набор ограничений на параметры фазовых векторов всех объектов, управляющих воздействий, возмущений, рисков и спроса, имеющих в модели, в виде систем алгебраических уравнений и неравенств.

Этап 3. Для каждого периода времени $t \in \overline{0, T-1}$ на основании измерения реализации фазового вектора $X(t)$ объекта l для фиксированного управления $W(t)$ агента P решается задача 1 – формирование множества $U^{(e)}(t; X(t), W(t))$ – минимаксных управлений агента E , минимаксного результата, соответствующих набору $\{t; X(t), W(t)\}$ и целевой функции F_t .

Этап 4. Для каждого периода времени $t \in \overline{0, T-1}$ на основании измерения реализации фазового вектора $X(t)$ объекта l и решения задачи 1 решается задача 2 –

формирование множества $W^{(e)}(t; X(t)) \times \hat{U}^{(e)}(t; X(t), \bar{W}^{(e)}(t))$, где $W^{(e)}(t; X(t))$ – множество минимаксных управлений $\bar{W}^{(e)}(t)$ агента P , $\hat{U}^{(e)}(t; X(t), \bar{W}^{(e)}(t)) \subseteq U^{(e)}(t; X(t), \bar{W}^{(e)}(t))$ – множество минимаксных управлений $\bar{U}^{(e)}(t) \in U^{(e)}(t; X(t), \bar{W}^{(e)}(t))$ агента E , и числа $d^{(e)}(t+1; X(t))$ – минимаксного результата, соответствующих набору $\{t; X(t)\}$ и целевой функции F_t .

Этап 5. Для каждого периода времени $t \in \overline{0, T-1}$ на основании измерения реализации фазового вектора $X^{(i)}(t)$ объекта $l_i, i \in \overline{1, n}$, решения задач 1 и 2, реализаций минимаксных управлений $\bar{W}^{(e)}(t)$ и $\bar{U}^{(e)}(t)$ агентов P и E соответственно решается n задач 3 – формирование множеств $U_j^{(e)}(t; X^{(i)}(t), \bar{W}^{(e)}(t), \bar{U}^{(e)}(t)), i \in \overline{1, n}$ – минимаксных управлений $\bar{U}^{(i,e)}(t)$ агентов E_i , и чисел $c_j^{(e)}(t+1; X^{(i)}(t), \bar{W}^{(e)}(t), \bar{U}^{(e)}(t))$ – минимаксных результатов, соответствующих наборам $\{t; X^{(i)}(t), \bar{W}^{(e)}(t), \bar{U}^{(e)}(t)\}, i \in \overline{1, n}$, и целевым функциям $F_t^{(i)}, i \in \overline{1, n}$.

Этап 6. Формирование итоговых результатов решения задачи: для каждого периода времени $t \in \overline{0, T-1}$ и реализации набора допустимых вариантов фазовых векторов $X(t)$ и $X^{(i)}(t), i \in \overline{1, n}$, на основании реализации этапов 3–5 формируется набор минимаксных управляющих воздействий $\bar{W}^{(e)}(t), \bar{U}^{(e)}(t)$ и $\bar{U}^{(i,e)}(t)$ соответственно агентов P, E и $E_i, i \in \overline{1, n}$, для каждого уровня управления, который будет решением задачи минимаксного пошагового управления в трехуровневой мультиагентной иерархической интеллектуальной семантической сети. Алгоритмы решения задач 1–3 основываются на результатах монографии [Шориков, 1997].

Построенная архитектура модели управления имеет ряд преимуществ, связанных с использованием широкого набора инструментов агент-ориентированного подхода. В ходе разработки используется максимально гибкая архитектура, которая позволит в будущем изменять структуру фазового вектора путем корректировки набора социально-экономических показателей, применять новые варианты управляющих воздействий, изменять целевые функции для каждого уровня управления. Использование официальной статистики и структуры данных, собираемых во всех регионах, позволит выбирать в качестве объекта моделирования любой регион РФ.

Для оптимизации процесса управления региональным промышленным комплексом применяется минимаксный подход, который позволяет сформировать управляющие воздействия, обеспечивающие гарантированный результат при наихудших внешних факторах – возможных реализациях возмущений, рисков и спроса на продукцию предприятий. При построении модели процесса оптимизации управления региональным промышленным комплексом в работе используется детерминированный подход, который позволит избавиться от недостатков вероятностного подхода, связанных с изменчивостью условий, ненормальностью вероятностных распределений априори неопределенных параметров, недостаточностью дан-

ных статистики и др. Архитектура АОМ предполагает пошаговое управление с обратной связью, что позволит обеспечить адаптивность управления и учитывать изменчивость внешних факторов.

К сложным для реализации особенностям модели управления можно отнести необходимость корректной обработки значительного объема статистических данных. Кроме того, в результате разработки архитектуры построена достаточно сложная модель взаимодействий, которая, вероятно, будет нуждаться в верификации и корректировке для получения на ее основе достаточно адекватных рассматриваемому процессу управления возможностей для решения задач анализа и прогнозирования состояния параметров модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования обобщен опыт и развитие подходов к применению АОМ для моделирования социально-экономических систем. На основе анализа литературы выделены преимущества применения агент-ориентированного подхода для изучения промышленных систем, главным из которых является возможность моделирования сложных систем с помощью имитации простого поведения взаимодействующих агентов в заданной среде. Обоснована целесообразность применения выбранного подхода для моделирования процессов управления региональным промышленным комплексом.

Предложена трехуровневая архитектура модели, для каждого уровня определены структура объектов управления и управляющие агенты. Для каждого агента определена структура его фазового вектора, включающая его атрибуты, основные параметры, используемые управляющие воздействия, возмущения и риски, модель его динамики, модель доступных агенту данных. Для каждого агента модели установлен соответствующий ему критерий качества для оценки состояния подконтрольного ему процесса – его целевая функция, а также его цель в процессе управления. Предложена структура управляющих и информацион-

ных связей модели, а также порядок действий агентов по выбору управляющих воздействий с учетом установленной иерархии. Математически формализованы три уровня управления, информационные и управленческие взаимодействия, сформулированы основные задачи формирования множеств минимаксных управляющих воздействий для каждого агента модели, предложен содержательный алгоритм функционирования модели.

Данная архитектура модели управления позволит реализовать ее в программной среде и создать основу для дальнейшего развития инструментария моделирования процессов управления региональным промышленным комплексом.

Следующий этап исследования будет связан с получением и обработкой статистических данных для оценки динамики и коэффициентов взаимосвязи основных параметров регионального промышленного комплекса. В модели управления будут точно отражены статистически подтвержденные полномочия субъектов РФ, а также специфицированы значимые внешние параметры среды. Для этого создается статистическая база, где официальные данные статистических органов будут дополнены данными Федерального казначейства РФ, Министерства промышленности и торговли РФ, Федеральной налоговой службы РФ, Государственной информационной системы промышленности, а также сведениями региональных органов власти. Исследовательская работа по созданию базы данных будет представлена позднее в отдельных публикациях.

Верификация предлагаемой агент-ориентированной модели позволит выявить неучтенные на данном этапе связи между агентами, уточнить их особенности, провести численную оценку результатов реализации рассматриваемых процессов управления. Итоги моделирования позволят создать адаптируемую методическую основу и гибкий расширяемый программный инструментарий для управления промышленностью на региональном уровне. ■

Источники

- Акбердина В.В., Шориков А.Ф. (2022). Иерархическая агент-ориентированная модель управления промышленным комплексом // *Управленец*. Т. 13, № 6. С. 2–14. <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2022-13-6-1>
- Бахтизин А.Р. (2007). Опыт разработки агент-ориентированной модели // *ЭНСР*. № 3. С. 104–116.
- Горчакова Д.А., Шабалов В.А. (2017). О применении имитационного моделирования для прогнозирования спроса на продукцию металлургической отрасли // *Экономика и управление в XXI веке: наука и практика*. № 4. С. 108–112.
- Ивантер В.В. (2016). Стратегия перехода к экономическому росту // *Проблемы прогнозирования*. № 1. С. 3–8.
- Кислицын Е.В., Городничев В.В. (2021). Имитационное моделирование развития отдельных отраслей тяжелой промышленности // *Бизнес-информатика*. Т. 15, № 1. С. 59–77. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.1.59.77>
- Клейнер Г.Б., Рыбачук М.А., Ушаков Д.В. (2019). Агент-ориентированная модель профессиональной экспертизы и принятия решений о поддержке индивидуальных общественно значимых инициатив // *Terra Economicus*. № 17(2). С. 23–39. <https://doi.org/10.23683/2073-6606-2019-17-2-23-39>

- Коровин Г.Б. (2022). Агент-ориентированная модель цифровизации промышленности региона // Вестник Забайкальского государственного университета. Т. 28, № 7. С. 104–114. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2022-28-7-104-114>
- Лычкина Н.Н. (2009) Ретроспектива и перспектива системной динамики. Анализ динамики развития // Бизнес-информатика. № 3(9). С. 55–67.
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. (2009). Новый инструментарий в общественных науках – агент-ориентированные модели: общее описание и конкретные примеры // Экономика и управление. № 12. С. 13–25.
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бахтизина Н.В. (2005). CGE модель социально-экономической системы России со встроенными нейронными сетями. Москва: ЦЭМИ РАН.
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. (2015). Имитация особенностей репродуктивного поведения населения в агент-ориентированной модели региона // Экономика региона. № 3(43). С. 312–322.
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. (2017). Регулирование промышленных выбросов на основе агент-ориентированного подхода // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. Т. 10, № 6. С. 42–58. <https://doi.org/10.15838/esc/2017.6.54.3>
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. (2020). Агент-ориентированная модель как инструмент регулирования экологии региона // Журнал Новой экономической ассоциации. № 1(45). С. 151–171. <https://doi.org/10.31737/2221-2264-2020-45-1-6>
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Абрамов В.И. (2017). Компьютерное ситуационное моделирование в управлении экономикой // Государственный аудит. Право. Экономика. № 3–4. С. 31–40.
- Маковеев В.Н. (2016). Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. № 5(47). С. 272–289.
- Машкова А.Л., Савина О.А., Маматов А.В., Новикова Е.В. (2018). Компьютерное моделирование процессов экономической динамики в отраслевом разрезе // Известия Юго-Западного государственного университета. Т. 22, № 5. С. 96–108. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-5-96-108>
- Медведев С.Н., Аксенов К.А. (2012). Анализ применимости имитационного и мультиагентного моделирования в задачах планирования машиностроительного производства // Современные проблемы науки и образования. № 5. С. 101–106.
- Самков Т.Л., Швецов Я.П. (2017). О некоторых проблемах при построении агент-ориентированных моделей экономических процессов // Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса. № 2 (39). С. 85–87.
- Сиротин Д.В. (2019). Моделирование развития экономики региона в условиях Индустрии 4.0 // Наука Красноярья. Т. 8, № 3. С. 98–108. <https://doi.org/10.12731/2070-7568-2019-3-98-108>
- Сморodinская Н.В. (2017). Усложнение организации экономических систем в условиях нелинейного развития // Вестник Института экономики РАН. № 5. С. 104–115.
- Сушко Е.Д. (2012). Мультиагентная модель региона: концепция, конструкция и реализация: препринт WP/2012/292. Москва: ЦЭМИ РАН.
- Фролова Н.В., Селянинов А.В. (2012). Агент-ориентированная модель инновационного процесса появления, отбора и реализации инновационных идей // Вестник Пермского университета. Экономика. Спец. выпуск. С. 70–77.
- Цветков В.Я. (2017). Эмерджентизм // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. № 2-1. С. 137–138.
- Швецов А.Н., Дианов С.В. (2019). Методика разработки агент-ориентированных моделей сложных систем // Вестник Череповецкого государственного университета. № 1. С. 48–58.
- Широв А.А., Янговский А.А. (2017). Межотраслевая макроэкономическая модель RIM – развитие инструментария в современных экономических условиях // Проблемы прогнозирования. № 3. С. 3–19.
- Широв А.А., Гусев М.С., Янговский А.А. (2012). Обоснование возможных сценариев долгосрочного развития российской экономики // ЭКО. № 6. С. 60–80.
- Шориков А.Ф. (1997). Минимаксное оценивание и управление в дискретных динамических системах. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та.
- Шориков А.Ф. (2006). Методология моделирования многоуровневых систем: иерархия и динамика // Прикладная информатика. Т. 1, № 1. С. 136–141.
- Bonabeau E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99, no. 3, pp. 7280–7287. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.082080899>
- Chanas S., Myers M.D., Hess T. (2019). Digital transformation strategy making in pre-digital organizations: The case of a financial services provider. *The Journal of Strategic Information Systems*, vol. 28, issue 1, pp. 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2018.11.003>
- Cimoli M., Dosi G., Nelson R., Stiglitz J.E. (2006). *Institutions and policies shaping industrial development: An introductory note*. Initiative for Policy Dialogue. Laboratory of Economics and Management (LEM), Sant'Anna School of Advanced Studies.
- Cincotti S., Raberto M., Teglio A. (2010). Credit money and macroeconomic instability in the agent-based model and simulator EURACE. *Economics - The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, vol. 4, no. 2010-26.
- Cullen A.C., Alpcan T., Kalloniatis A.C. (2022). Adversarial decisions on complex dynamical systems using game theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 594, 126998. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.126998>
- Delli Gatti D., Gallegati M., Greenwald B., Russo A., Stiglitz J.E. (2010). The financial accelerator in an evolving credit network. *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 34, no. 9, pp. 1627–1650.

- Dosi G., Fagiolo G., Roventini A. (2010). Schumpeter meeting Keynes: A policy-friendly model of endogenous growth and business cycles. *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 34, no. 9, pp. 1748–1767.
- Gabbi G., Iori G., Jafarey S., Porter J. (2015). Financial regulations and bank credit to the real economy. *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 50, pp. 117–143.
- Greenhalgh T., Robert G., Macfarlane F., Bate P., Kyriakidou O. (2004). Diffusion of innovations in service organizations: Systematic review and recommendations. *The Milbank Quarterly*, vol. 82, no. 4, pp. 597–598. <https://doi.org/10.1111/j.0887-378x.2004.00325.x>
- Gualdi S., Tarzia M., Zamponi F., Bouchaud J.-P. (2015). Tipping points in macroeconomic agent-based models. *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 50, pp. 29–61.
- Jensen T., Chappin É.J.L. (2017). Automating agent-based modeling: Data-driven generation and application of innovation diffusion models. *Environmental Modelling & Software*, vol. 92, pp. 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.018>
- Kiesling E., Günther M., Stummer C., Wakolbinger L.M. (2011). Agent-based simulation of innovation diffusion: A review. *Central European Journal of Operations Research*, vol. 20, no. 2, pp. 183–230. <https://doi.org/10.1007/s10100-011-0210-y>
- Maaouane M., Zouggar S., Krajačić G., Zahboune H. (2021). Modelling industry energy demand using multiple linear regression analysis based on consumed quantity of goods. *Energy*, vol. 225, 120270. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120270>
- Petrovic M., Ozel B., Teglio A., Raberto M., Cincotti S. (2017). *EURACE Open: An agent-based multi-country model*. Working Paper 2017/09. Economics Department, Universitat Jaume I, Castellon. Pp 1–74.
- Popoyan L., Napoletano M., Roventini A. (2017). Taming macroeconomic instability: Monetary and macro-prudential policy interactions in an agent-based model. *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 134, pp. 117–140.
- Raberto M., Teglio A., Cincotti S. (2012). Debt, deleveraging and business cycles: an agent-based perspective. *Economics – The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, vol. 6, no. 2012-27, pp. 1–49.
- Scheller F., Johanning S., Bruckner T. (2019). A review of designing empirically grounded agent-based models of innovation diffusion: Development process, conceptual foundation and research agenda. Preprint submitted to *Technological Forecasting and Social Change*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29711.94887>
- Stummer C., Kiesling E., Günther M., Vetschera R. (2015). Innovation diffusion of repeat purchase products in a competitive market: An agent-based simulation approach. *European Journal of Operational Research*, vol. 245, issue 1, pp. 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.03.008>
- Tian Y., Govindan K., Zhu Q. (2014). A system dynamics model based on evolutionary game theory for green supply chain management diffusion among Chinese manufacturers. *Journal of Cleaner Production*, vol. 80, pp. 96–105.
- Turgut Y., Bozdog C.E. (2022). A framework proposal for machine learning-driven agent-based models through a case study analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 123, 102707. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102707>
- Zhangqi Zh., Zhuli Ch., Lingyun H. (2022). Technological innovation, industrial structural change and carbon emission transferring via trade. An agent-based modeling approach. *Technovation*, vol. 110. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2021.102350>

References

- Akberdina V.V., Shorikov A.F. (2022). Managing industrial complexes: A hierarchical agent-oriented model. *Upravlenets / The Manager*, vol. 13, no. 6, pp. 2–14. <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2022-13-6-1>. EDN: WNQLUI. (in Russ.)
- Bakhtizin A.R. (2007). Experience in developing an agent-based model. *Ekonomicheskaya nauka sovremennoy Rossii / Economics of Contemporary Russia*, no. 3, pp. 104–116. (in Russ.)
- Gorchakova D.A., Shabalov V.A. (2017). On the use of simulation modeling to forecast demand for metallurgical industry products. *Ekonomika i upravlenie v XXI veke: nauka i praktika / Economics and Management in the 21st Century: Science and Practice*, no. 4, pp. 108–112. (in Russ.)
- Ivanter V.V. (2016). Strategy for the transition to economic growth. *Problemy prognozirovaniya / Problems of Forecasting*, no. 1, pp. 3–8. (in Russ.)
- Kislitsyn E.V., Gorodnichev V.V. (2021). Simulation of development of individual heavy industry sectors. *Biznes-informatika / Business Informatics*, vol. 15, no. 1, pp. 59–77. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.1.59.77>. (in Russ.)
- Kleyner G.B., Rybachuk M.A., Ushakov D.V. (2019). Agent-oriented model of professional expertise and decision making on individual public significant initiatives support. *Terra Economicus*, vol. 17, no. 2, pp. 23–39. <https://doi.org/10.23683/2073-6606-2019-17-2-23-39>. (in Russ.)
- Korovin G.B. (2022). Agent-oriented model of the region's industry digitalization. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta / Bulletin of ZabGU*, vol. 28, no. 7, pp. 104–114. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2022-28-7-104-114>. (in Russ.)
- Lychkina N.N. (2009). Retrospective and perspective of system dynamics. Analysis of development dynamics. *Biznes-informatika / Business Informatics*, no. 3(9), pp. 55–67. (in Russ.)
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R. (2009). New tools in social sciences – agent-based models: General description and specific examples. *Ekonomika i upravlenie / Economics and Management*, no. 12, pp. 13–25. (in Russ.)
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Bakhtizina N.V. (2005). *CGE model of the Russian socio-economic system with built-in neural networks*. Moscow: CEMI of the RAS. (in Russ.)
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. (2015). Simulating the reproductive behavior of a region's population with an agent-based model. *Ekonomika regiona / Economy of Region*, no. 3(43), pp. 312–322. <https://doi.org/10.17059/2015-3-25>. (in Russ.)

- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. (2017). Regulation of industrial emissions based on the agent-based approach. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz / Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, vol. 10, no. 6, pp. 42–58. <https://doi.org/10.15838/esc.2017.6.54.3>. (in Russ.)
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. (2020). Agent-based model as a tool for controlling environment of the region. *Zhurnal Novoy ekonomicheskoy assotsiatsii / The Journal of the New Economic Association*, no. 1(45), pp. 151–171. <https://doi.org/10.31737/2221-2264-2020-45-1-6>. (in Russ.)
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Abramov V.I. (2017). Computer situational modeling in economic management. *Gosudarstvennyy audit. Pravo. Ekonomika / State Audit. Right. Economy*, no. 3-4, pp. 31-40. (in Russ.)
- Makoveev V.N. (2016). Using agent-based models in the analysis and forecast of socio-economic development of territories. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz / Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, no. 5(47), pp. 272–289. (in Russ.)
- Mashkova A.L., Savina O.A., Mamatov A.V., Novikova E.V. (2018). Computer modeling of sectoral economic dynamics. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta / Proceedings of the Southwest State University*, vol. 22, no. 5, pp. 96–108. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-5-96-108>. (in Russ.)
- Medvedev S.N., Aksenov K.A. (2012). Analysis of the applicability of simulation and multi-agent modeling in planning problems of mechanical engineering production. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya / Modern Problems of Science and Education*, no. 5, pp. 101–106. (in Russ.)
- Samkov T.L., Shvetsov Ya.P. (2017). On some issues of constructing the agent-oriented models of economic processes. *Biznes. Obrazovanie. Pravo. Vestnik Volgogradskogo instituta biznesa / Business. Education. Law. Bulletin of Volgograd Business Institute*, no. 2(39), pp. 85–87. (in Russ.)
- Sirotnin D.V. (2019). Development modeling of the regional economy in the Industry 4.0 conditions. *Nauka Krasnoyarska / Krasnoyarsk Science*, vol. 8, no. 3, pp. 98–108. <https://doi.org/10.12731/2070-7568-2019-3-98-108>. (in Russ.)
- Smorodinskaya N.V. (2017). Complication of the organization of economic systems in the conditions of nonlinear development. *Vestnik Instituta Ekonomiki Rossiyskoy Akademii Nauk / The Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, no. 5, pp. 104–115. (in Russ.)
- Sushko E.D. (2012). *Multi-agent model of the region: Concept, design and implementation*. Preprint WP/2012/292. Moscow: CEMI of the RAS. (in Russ.)
- Frolova N.V., Selyaninov A.V. (2012). Agent-based model of the innovation process of emergence, selection and implementation of innovative ideas. *Vestnik permskogo universiteta. Ekonomika. Spets. Vypusk / Perm University Herald. ECONOMY. Special Issue*. Pp. 70–77. (in Russ.)
- Tsvetkov V.Ya. (2017). Emergentism. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy / International Journal of Applied and Fundamental Research*, no. 2-1, pp. 137–138. (in Russ.)
- Shvetsov A.N., Dianov S.V. (2019). Methodology of development of agent-oriented models of complex systems. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta / Cherepovets State University Bulletin*, no. 1, pp. 48–58. (in Russ.)
- Shirov A.A., Yantovskiy A.A. (2017). Intersectoral macroeconomic model RIM – development of tools in modern economic conditions. *Problemy prognozirovaniya / Problems of Forecasting*, no. 3, pp. 3–19. (in Russ.)
- Shirov A.A., Gusev M.S., Yantovskiy A.A. (2012). Justification of possible scenarios for the long-term development of the Russian economy. *EKO / ECO*, no. 6, pp. 60–80. (in Russ.)
- Shorikov A.F. (1997). *Minimax estimation and control in discrete dynamic systems*. Ekaterinburg: USU Publ. (in Russ.)
- Shorikov A.F. (2006). Methodology for modeling multi-level systems: Hierarchy and dynamics. *Prikladnaya informatika / Applied Informatics*, vol. 1, no. 1, pp. 136–141. (in Russ.)
- Bonabeau E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99, no. 3, pp. 7280–7287. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.082080899>
- Chanias S., Myers M.D., Hess T. (2019). Digital transformation strategy making in pre-digital organizations: The case of a financial services provider. *The Journal of Strategic Information Systems*, vol. 28, issue 1, pp. 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2018.11.003>
- Cimoli M., Dosi G., Nelson R., Stiglitz J.E. (2006). *Institutions and policies shaping industrial development: An introductory note*. Initiative for Policy Dialogue. Laboratory of Economics and Management (LEM), Sant'Anna School of Advanced Studies.
- Cincotti S., Raberto M., Teglio A. (2010). Credit money and macroeconomic instability in the agent-based model and simulator EURACE. *Economics - The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, vol. 4, no. 2010-26.
- Cullen A.C., Alpcan T., Kalloniatis A.C. (2022). Adversarial decisions on complex dynamical systems using game theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 594, 126998. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.126998>
- Delli Gatti D., Gallegati M., Greenwald B., Russo A., Stiglitz J.E. (2010). The financial accelerator in an evolving credit network. *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 34, no. 9, pp. 1627–1650.
- Dosi G., Fagiolo G., Roventini A. (2010). Schumpeter meeting Keynes: A policy-friendly model of endogenous growth and business cycles. *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 34, no. 9, pp. 1748–1767.
- Gabbi G., Iori G., Jafarey S., Porter J. (2015). Financial regulations and bank credit to the real economy. *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 50, pp. 117–143.
- Greenhalgh T., Robert G., Macfarlane F., Bate P., Kyriakidou O. (2004). Diffusion of innovations in service organizations: Systematic review and recommendations. *The Milbank Quarterly*, vol. 82, no. 4, pp. 597–598. <https://doi.org/10.1111/j.0887-378x.2004.00325.x>

- Gualdi S., Tarzia M., Zamponi F., Bouchaud J.-P. (2015). Tipping points in macroeconomic agent-based models. *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 50, pp. 29–61.
- Jensen T., Chappin É.J.L. (2017). Automating agent-based modeling: Data-driven generation and application of innovation diffusion models. *Environmental Modelling & Software*, vol. 92, pp. 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.018>
- Kiesling E., Günther M., Stummer C., Wakolbinger L.M. (2011). Agent-based simulation of innovation diffusion: A review. *Central European Journal of Operations Research*, vol. 20, no. 2, pp. 183–230. <https://doi.org/10.1007/s10100-011-0210-y>
- Maouane M., Zouggar S., Krajačić G., Zahboune H. (2021). Modelling industry energy demand using multiple linear regression analysis based on consumed quantity of goods. *Energy*, vol. 225, 120270. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120270>
- Petrovic M., Ozel B., Teglio A., Raberto M., Cincotti S. (2017). *EURACE Open: An agent-based multi-country model*. Working Paper 2017/09. Economics Department, Universitat Jaume I, Castellon. Pp 1–74.
- Popoyan L., Napoletano M., Roventini A. (2017). Taming macroeconomic instability: Monetary and macro-prudential policy interactions in an agent-based model. *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 134, pp. 117–140.
- Raberto M., Teglio A., Cincotti S. (2012). Debt, deleveraging and business cycles: an agent-based perspective. *Economics – The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, vol. 6, no. 2012-27, pp. 1–49.
- Scheller F., Johanning S., Bruckner T. (2019). A review of designing empirically grounded agent-based models of innovation diffusion: Development process, conceptual foundation and research agenda. Preprint submitted to *Technological Forecasting and Social Change*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29711.94887>
- Stummer C., Kiesling E., Günther M., Vetschera R. (2015). Innovation diffusion of repeat purchase products in a competitive market: An agent-based simulation approach. *European Journal of Operational Research*, vol. 245, issue 1, pp. 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.03.008>
- Tian Y., Govindan K., Zhu Q. (2014). A system dynamics model based on evolutionary game theory for green supply chain management diffusion among Chinese manufacturers. *Journal of Cleaner Production*, vol. 80, pp. 96–105.
- Turgut Y., Bozdogan C.E. (2022). A framework proposal for machine learning-driven agent-based models through a case study analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 123, 102707. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102707>
- Zhangqi Zh., Zhuli Ch., Lingyun H. (2022). Technological innovation, industrial structural change and carbon emission transferring via trade. An agent-based modeling approach. *Technovation*, vol. 110. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2021.102350>

Информация об авторах**Information about the authors****Шориков Андрей Федорович**

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Центра структурной политики. **Институт экономики УрО РАН**, г. Екатеринбург, РФ. E-mail: shorikov.af@uiec.ru

Коровин Григорий Борисович

Кандидат экономических наук, руководитель сектора экономических проблем отраслевых рынков. **Институт экономики УрО РАН**, г. Екатеринбург, РФ. E-mail: korovin.gb@uiec.ru

Сиротин Дмитрий Владимирович

Кандидат экономических наук, старший научный сотрудник. **Институт экономики УрО РАН**, г. Екатеринбург, РФ. E-mail: sirotin.dv@uiec.ru

Andrey F. Shorikov

Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Leading Research Fellow of the Center for Structural Policy. **Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences**, Ekaterinburg, Russia. E-mail: shorikov.af@uiec.ru

Grigory B. Korovin

Cand. Sc. (Econ.), Head of the Sector of Economic Problems of Industrial Markets. **Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences**, Ekaterinburg, Russia. E-mail: korovin.gb@uiec.ru

Dmitry V. Sirotin

Cand. Sc. (Econ.), Senior Researcher. **Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences**, Ekaterinburg, Russia. E-mail: sirotin.dv@uiec.ru