

<https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2024-1-4>

УДК 338.24; 332.14

JEL L52, L60, C54

В. В. Акбердина^{а)} , А. Ф. Шориков^{б)} , Г. Б. Коровин^{в)} , Д. В. Сиротин^{г)}  

^{а, б, в, г)} Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Идентификация параметров агент-ориентированной модели управления промышленным комплексом региона¹

Аннотация. Новые вызовы, стоящие перед отечественной экономикой, требуют построения моделей, позволяющих адекватно оптимизировать процессы управления промышленностью на уровне региона. Данная работа посвящена разработке агент-ориентированной модели трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом. Целью настоящего исследования является разработка методики решения задачи идентификации параметров агент-ориентированной модели управления промышленным комплексом региона на примере Свердловской области. Для выполнения поставленной цели предложено теоретическое обоснование реализуемого подхода, приведена формализация задачи идентификации параметров системы управления промышленным комплексом региона, описан алгоритм построения и отбора моделей для оценки параметров системы управления. В качестве метода решения задачи идентификации выбран подход на базе линейного регрессионного анализа. Подготовка информационной базы для апробации подхода проводилась в условиях Свердловской области по 28 видам экономической деятельности, относящихся к промышленному производству, по данным за 2005–2021 гг. При построении статистических моделей идентификации фазовый вектор задается следующими параметрами: среднегодовая численность работников предприятий, основные фонды, валовая добавленная стоимость, объем отгруженных товаров, выполненных работ и услуг, сальдированный финансовый результат организаций, инвестиции в основной капитал, затраты на внедрение и использование цифровых технологий. Вектор управления задан факторами привлечения бюджетных средств, а также привлечения средств кроме бюджетных (из внешних источников). В результате исследования построено 125 моделей достаточно высокого качества, которые могут быть использованы в решении задачи идентификации параметров для построения агент-ориентированной модели управления процессами развития промышленности Свердловской области. Полученные статистические модели позволяют установить связь между агентами, уточнить их специфику, рассчитать и дать оценку результатов применения механизмов управления. Предложенный подход применим для построения прогнозов развития регионального промышленного комплекса в соответствии с планируемыми управляющими воздействиями, а также для вычисления оптимального набора управляющих воздействий для достижения промышленностью целевых параметров.

Ключевые слова: промышленность, агентное моделирование, регрессионный анализ, региональный промышленный комплекс, идентификация параметров системы управления, фазовый вектор, прогноз развития

Благодарность: Исследование выполнено в соответствии с госзаданием Института экономики УрО РАН на 2024–2026 гг.

Для цитирования: Акбердина, В. В., Шориков, А. Ф., Коровин, Г. Б., Сиротин, Д. В. (2024). Идентификация параметров агент-ориентированной модели управления промышленным комплексом региона. *Экономика региона*, 20(1), 48–62. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2024-1-4>

¹ © Акбердина В. В., Шориков А. Ф., Коровин Г. Б., Сиротин Д. В. Текст. 2024

RESEARCH ARTICLE

Victoria V. Akberdina^{a)} , Andrey F. Shorikov^{b)} ,
Grigoriy B. Korovin^{c)} , Dmitry V. Sirotnin^{d)}  

^{a, b, c, d)} Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

Parameter Identification of the Agent-Based Model for Managing a Regional Industrial Complex

Abstract. Current challenges facing the Russian economy require models to optimise industrial management processes at the regional level. Therefore, a three-level hierarchical agent-based model for min-max control of the regional industrial complex is considered in this research. The study aims to develop an approach to solving a parameter identification problem of the agent-based model for managing the industrial complex of Sverdlovsk oblast. To this end, the paper presents a theoretical justification for the implemented approach, a formalisation of the aforementioned problem, and an algorithm for constructing and selecting models to assess management system parameters. The method of linear regression analysis was applied to solve the identification problem. The proposed approach was tested using data on 28 types of industrial activity in Sverdlovsk oblast for 2005–2021. The phase vector of statistical identification models was defined by the following parameters: the average annual number of employees of enterprises; fixed assets; gross value added; volume of shipped goods, performed works and services; balanced financial results of enterprises; investment in fixed capital; costs of implementing and using digital technologies. The control vector was determined by the factors of attracting budgetary and other (external) funds. As a result, 125 high-quality models were built to solve parameter identification problems of the agent-based model used for managing the industrial complex of Sverdlovsk oblast. The obtained statistical models can be used to establish communication between agents, clarify their specificity, calculate and assess management performance. The proposed approach can be applied to predict the development of regional industrial complexes in accordance with planned control actions, as well as to calculate control actions necessary to achieve target parameters.

Keywords: industry, agent modelling, regression analysis, regional industrial complex, management system parameter identification, phase vector, forecast

Acknowledgments: The article has been prepared in accordance with the state order to the Institute of Economics of the Ural Branch of RAS for 2024–2026.

For citation: Akberdina, V. V., Shorikov, A. F., Korovin, G. B., & Sirotnin D. V. (2024). Parameter Identification of the Agent-Based Model for Managing a Regional Industrial Complex. *Ekonomika regiona / Economy of regions*, 20(1), 48-62. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2024-1-4>

Введение

Основу экономического развития Российской Федерации составляет промышленность. Несмотря на реализацию в последнее десятилетие масштабных федеральных и региональных программ развития промышленности России, а также региональных промышленных комплексов РФ, значимых положительных изменений в темпах их развития на сегодняшний день не произошло. Можно ожидать, что импульс, необходимый для ускорения развития приоритетных секторов промышленности (Песков, 2022), может быть задан реализацией крупных государственных программ (Романова & Пономарева, 2020), мегапроектов¹, развитием инструментария промыш-

ленной политики, в том числе нацеленного на выполнение задач импортозамещения. Рост числа факторов, в современных условиях все сильнее влияющих на результативность работы отраслей промышленности под влиянием геополитических, внешнеэкономических, технологических и иных условий, определяет усложнение систем моделирования объектов промышленности и управления ими. В связи с этим растут актуальность и востребованность в развитии аппарата моделирования сложных систем (Сморозинская, 2017), таких как промышленность. Промышленный комплекс как система является сложным объектом управления (Голова, 2021), что обуславливается наличием многоуровневой субъектно-объектной структуры и многомерной системой связей. Моделирование развития такой системы может базироваться на принципах управляемости, мультиагентности, учета семантиче-

¹ Концепция технологического развития на период до 2030 года. Утв. расп. Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-п. <http://government.ru/docs/48570/> (дата обращения: 05.06.2023).

ских соединений. При этом необходимо учитывать, что на нее оказывает непосредственное влияние множество технологических, экономических, экологических, социальных и иных факторов (Li & Zhuang, 2022; Qian et al., 2023; Zhang et al., 2022).

Данное исследование представляет собой следующий этап работы по построению агент-ориентированной модели трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом. На предыдущем этапе была обоснована целесообразность трехуровневой архитектуры управления, выделена структура объекта управления, установлены агенты управления, для каждого из которых сформирован состав фазового вектора (набора основных характеристик объекта), разработана иерархическая структура связей (управляющих и информационных) и алгоритм выбора оптимальных управляющих действий, выполняемых агентами. Для построения модели управления региональным промышленным комплексом заданы атрибуты, параметры, управляющие воздействия на федеральном и региональном уровнях, возмущения (риски), модель динамики параметров, модель данных об объекте, имеющихся у агента, целевая функция (Акбердина & Шориков, 2022). Целью настоящей работы является разработка и реализация методического подхода к нахождению неизвестных параметров (идентификации параметров) разрабатываемой агент-ориентированной модели управления развитием промышленности региона на основе статистических данных Свердловской области. Оцениваемые параметры характеризуют зависимости между социально-экономическими характеристиками промышленного комплекса, степень их реакции на управляющие воздействия на региональном и отраслевом уровнях. В рамках исследования предполагается проверка двух гипотез: 1) о возможности нахождения (в рамках задачи идентификации) достоверных коэффициентов, характеризующих взаимосвязи социально-экономических параметров промышленности региона и влияния на нее системы государственного управления, 2) о возможности рассмотрения в качестве фактора управления отдельными отраслями промышленности региона такого показателя, как «объемы государственных субсидий, направляемых на экономическое развитие субъекта Российской Федерации», данные по которому публикуются без учета отраслевой принадлежности (т. е. в целом по экономике региона),

но который, вероятно, имеет опосредованное влияние на отдельные виды экономической деятельности в регионе.

Методы исследования

1. Теоретическое обоснование подхода

Теоретическую базу исследования составляет концепция социально-экономической устойчивости, в частности положения, связанные с отбором индикаторов характеристики устойчивого развития объекта. Отмечается, что широко используемые сегодня индикаторы развития социально-экономических систем нельзя считать универсальными (Флуд, 2006). Подбор информационной базы исследования при моделировании развития объекта должен не только охватывать основные его параметры, но и учитывать внешние изменчивые условия, которые могут достаточно резко отличаться от периода к периоду в силу политической, экономической, технико-технологической, экологической, социальной и иных повесток. Теоретический базис усиливает теория сложных систем (Castelle et al., 2022; Karaca, 2022), объясняющая наличие особых свойств объекта и возможности формирования определенных структур на их основе, вопреки жестко детерминированным взглядам (Цветков, 2017). На основе данных положений может быть развит подход к решению задачи идентификации параметров модели промышленного комплекса региона как дискретной управляемой динамической системы.

Для моделирования развития промышленности в целом, а также отдельных ее отраслей, применяется множество подходов, чаще всего основанных на методах экстраполяции, имитационного моделирования, получения экспертных данных (Ивантер, 2016; Макаров и др., 2020; Широу и др., 2012). При этом выделяется методология агент-ориентированного моделирования (АОМ). В статье (Макаров & Бахтизин, 2009) авторы указывают, что АОМ — это модель, обладающая следующими основными свойствами:

1. Автономия агентов, отсутствие структуры, управляющей каждым агентом.
2. Неоднородность, обозначающая различия агентов по многим параметрам.
3. Ограниченная интеллектуальность (рациональность) агентов в рамках собственной информационной среды.
4. Расположение в некоторой «среде обитания».

Исходя из материалов работы (Vonabeau, 2002), к признакам таких моделей можно добавить нелинейность поведения индивида, влияние на него различных событий, демонстрацию памяти, обучение и наличие сетевых (горизонтальных) взаимодействий. Наиболее полный обзор литературы представлен в опубликованных ранее статьях (Акбердина & Шориков, 2022; Шориков и др., 2023). Тем не менее на данном этапе цель исследования ограничена решением задачи идентификации параметров такой дискретной управляемой динамической системы, как региональная промышленность, моделирование которой может строиться на основе метода регрессионного анализа, комбинированного итерационного метода либо на базе проведения экспертных оценок.

На статистические методы могут оказать влияние шоковые события, создающие негативные эффекты при построении оценки. Тем не менее, в сравнении с экспертными методами, статистические оценки являются более объективными. В рамках развития таких методов исследования, включая факторный и корреляционно-регрессионный анализ, значимый вклад внес ряд ученых (Harman, 2010; Kucheryavskiy et al., 2023; Rao & Toutenburg, 1995; Working & Hotelling, 1929). Методология регрессионного анализа в решении задач моделирования развития социально-экономических систем применяется особенно широко (Chen, 2023; Majumder, 2022; Pareto, 2022). В частности, за последнее десятилетие подходы на ее основе регулярно применялись в задачах прогнозирования развития промышленности в целом, а также в разрезе отдельных промышленных отраслей и территорий базирования (Гичиев, 2021; Lu, 2021; Togoontumur & Cooray, 2023; Yan et al., 2023).

Цель регрессионного анализа заключается в нахождении наиболее эффективным образом (с меньшими статистическими отклонениями) параметров $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ по наблюдениям $x_i, y_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ($n \in \mathbf{N}$ здесь и далее, \mathbf{N} — множество всех натуральных чисел) и построении доверительных интервалов (интервалов допустимой погрешности) для найденных параметров, в проверке гипотезы о достаточном уровне значимости коэффициентов регрессии и уравнения в целом, а также в оценке адекватности полученной зависимости (Haslwanter, 2022). Данный метод является междисциплинарным, отличается универсальностью и гибкостью реализации в программной среде, а результаты его применения имеют высокую надежность.

2. Задача идентификации параметров модели развития промышленного комплекса региона

Формализация задачи. В соответствии с математической теорией процессов управления мы рассматриваем процессы управления объектами в рамках ряда социально-экономических параметров, которые являются значимыми для рассматриваемых в АОМ объектов и образуют соответствующее «фазовое пространство». Вследствие чего векторы в этом пространстве определяются как фазовые, координаты которых включают параметры введенного нами фазового пространства. Формирование архитектуры модели, а также описание агентов, связей и алгоритмов приведены в статьях (Акбердина & Шориков, 2022; Шориков & Коровин, Сиротин, 2023).

Промышленный комплекс региона представляет собой мультиагентную систему, состоящую из r видов деятельности ($r \in \mathbf{N}$). На каждом этапе расчета последовательно принимается один из параметров фазового вектора каждого отдельного вида промышленной деятельности в следующий период времени, зависящий от его состояния и от комплекса управляющих воздействий в предыдущий период. Задача идентификации параметров такой линейной дискретной динамической системы сводится к описанию динамической системы в фазовом пространстве.

Исходная динамическая система, которая моделирует динамику объекта управления — промышленного комплекса региона — объекта I, описывается векторно-матричным дискретным рекуррентным уравнением вида:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= A(t)x(t) + B(t)u(t), \\ t &\in \overline{0, T-1} = \{0, 1, \dots, T-1\} (T \in \mathbf{N}); \\ x(t) &\in \mathbf{R}^n, t \in \overline{0, T}; u(t) \in \mathbf{R}^p, \\ t &\in \overline{0, T-1} (n, p \in \mathbf{N}), \end{aligned} \quad (1)$$

(здесь и далее, для $k \in \mathbf{N}$, \mathbf{R}^k — k -мерное векторное пространство векторов-столбцов), где $x(t)$ — обобщенный фазовый вектор системы, который задается параметрами «среднегодовая численность работников предприятий», «основные фонды», «валовая добавленная стоимость», «объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами», «сальдированный финансовый результат организаций; инвестиции в основной капитал», «затраты на внедрение и использование цифровых технологий». Он описывает состояние регионального промышленного комплекса в период вре-

мени t ; $u(t)$ — вектор управления — включает федеральные программы развития; региональные программы развития; налоговое стимулирование (федеральное, региональное); стимулирование технологического обновления; цифровизацию; $\{0, 1, \dots, T\}$ — целочисленный промежуток, определяющий периоды времени реализации процесса управления, определяемый на основе имеющихся статистических данных для каждого параметра.

Значения фазового вектора $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))'$ объекта I, $x(t) \in \mathbf{R}^n$, должны удовлетворять условию следующего заданного геометрического ограничения:

$$\forall t \in \overline{0, T}: x(t) \in \mathbf{X}_*(t) \subset \mathbf{R}^n,$$

$$\mathbf{X}_*(t) = \{x(t): x(t) \in \mathbf{R}^n, C(t)x(t) \leq c(t)\} \neq \emptyset, \quad (2)$$

то есть множество $\mathbf{X}_*(t)$ ограничивает допустимые значения реализации фазового вектора объекта I в период времени t ; в ограничении (2): $C(t)$ — заданная действительная матрица порядка $(m \times n)$ ($m \in \mathbf{N}$); $c(t)$ — заданный вектор, $c(t) \in \mathbf{R}^m$; здесь и далее в матричных неравенствах символы $\leq, =, \geq$ использованы для покомпонентного сравнения векторов; $u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t))'$ — управляющее воздействие субъекта управления — агента P, $u(t) \in \mathbf{R}^p$ ($p \in \mathbf{N}: p \leq n$), стесненное заданным ограничением

$$\forall t \in \overline{0, T-1}: u(t) \in \mathbf{U}_*(t) \subset \mathbf{R}^p$$

$$\mathbf{U}_*(t) = \{u(t): u(t) \in \mathbf{R}^p, D(t)u(t) \leq d(t)\} \neq \emptyset, \quad (3)$$

т. е. множество $\mathbf{U}_*(t)$ ограничивает допустимые значения реализации управляющего воздействия менеджера P в период времени t ; в ограничении (3): $D(t)$ — заданная действительная матрица порядка $(l \times p)$ ($l \in \mathbf{N}$); $d(t)$ — заданный вектор, $d(t) \in \mathbf{R}^l$; в уравнении (1) $A(t)$ и $B(t)$ есть действительные матрицы размерностей $(n \times n)$ и $(n \times p)$ соответственно. Предполагается, что для всех периодов времени $t \in \overline{0, T}$ множества $\mathbf{X}_*(t)$ и для всех периодов времени $t \in \overline{0, T-1}$ множества $\mathbf{U}_*(t)$, элементы которых представляют собой решения систем линейных алгебраических уравнений и неравенств, определяемые соотношениями (2) и (3) соответственно, есть непустые множества и являются выпуклыми многогранниками-компактами (с конечным числом вершин) в пространствах \mathbf{R}^n и \mathbf{R}^p соответственно.

Неизвестны матрицы:

$A(t)$ — матрица порядка $(n \times n)$;

$B(t)$ — матрица порядка $(n \times p)$.

Известны наборы:

$$\{x_\tau(\cdot)\} = \{x(t)\}, t \in \overline{-\tau, 0}; \tau \in \mathbf{N}.$$

$$\{u_\tau(\cdot)\} = \{u(t)\}, t \in \overline{-\tau, -1}.$$

Полагается, что $\forall t \in \overline{0, T-1}$:

$$A(t) \equiv A, B(t) \equiv B.$$

Представим фазовый вектор $x(t) \in \mathbf{X}_*(t), t \in \overline{0, T}$ объекта I в виде набора векторов $x^{(j)}(t) = (x^{(j)}_1(t), x^{(j)}_2(t), \dots, x^{(j)}_s(t))'$, $j \in \overline{1, r}, x^{(j)}(t) \in \mathbf{R}^s$, каждый из которых является фазовым вектором j -го вида деятельности в региональном промышленном комплексе и значения его координат описывают основные параметры, характеризующие данный вид деятельности.

Тогда на основании уравнения (1), динамика фазового вектора $x^{(j)}(t)$ j -го вида деятельности — объекта II, $j \in \overline{1, r}$, описывается векторно-матричным дискретным рекуррентным уравнением вида:

$$x^{(j)}(t+1) = A^{(j)}(t)x^{(j)}(t) + B^{(j)}(t)u^{(j)}(t),$$

$$t \in \overline{0, T-1} (T \in \mathbf{N});$$

$$x^{(j)}(t) \in \mathbf{R}^s, t \in \overline{0, T}; u^{(j)}(t) \in \mathbf{R}^q,$$

$$t \in \overline{0, T-1} (s, q \in \mathbf{N});$$

$$(s \times r) = n; (q \times r) = p. \quad (4)$$

Значения фазового вектора $x^{(j)}(t)$ объекта II, должны удовлетворять следующему заданному геометрическому ограничению:

$$\forall t \in \overline{0, T}: x^{(j)}(t) \in \mathbf{X}^{(j)}(t) \subset \mathbf{R}^s,$$

$$\mathbf{X}^{(j)}(t) = \{x^{(j)}(t): x^{(j)}(t) \in \mathbf{R}^s,$$

$$C^{(j)}(t)x^{(j)}(t) \leq c^{(j)}(t)\} \neq \emptyset, \quad (5)$$

т. е. множество $\mathbf{X}^{(j)}(t)$ ограничивает допустимые значения реализации фазового вектора объекта II, j в период времени t ; в ограничении (4): $C^{(j)}(t)$ — заданная действительная матрица порядка $(m_j \times s)$ ($m_j \in \mathbf{N}$); $c^{(j)}(t)$ — заданный вектор, $c^{(j)}(t) \in \mathbf{R}^{m_j}$; $u^{(j)}(t) = (u^{(j)}_1(t), u^{(j)}_2(t), \dots, u^{(j)}_q(t))'$ — управляющее воздействие (управление) субъекта управления j -м видом деятельности — агента E_j , $u^{(j)}(t) \in \mathbf{R}^q$; ($q \in \mathbf{N}: q \times r = p$), стесненное заданным ограничением

$$\forall t \in \overline{0, T-1}: u^{(j)}(t) \in \mathbf{U}^{(j)}(t) \subset \mathbf{R}^q,$$

$$\mathbf{U}^{(j)}(t) = \{u^{(j)}(t): u^{(j)}(t) \in \mathbf{R}^q,$$

$$D^{(j)}(t)u^{(j)}(t) \leq d^{(j)}(t)\} \neq \emptyset, \quad (6)$$

т. е. множество $\mathbf{U}^{(j)}(t)$ ограничивает допустимые значения реализации управления агента E_j в период времени t ; в ограничении (6): $D^{(j)}(t)$ — заданная действительная матрица порядка $(l_j \times q)$ ($l_j \in \mathbf{N}$); $d^{(j)}(t)$ — заданный вектор, $d^{(j)}(t) \in \mathbf{R}^{l_j}$; в уравнении (4) $A^{(j)}(t)$ и $B^{(j)}(t)$ есть действительные матрицы размерностей

$(s \times s)$ и $(s \times q)$ соответственно. Предполагается, что для всех периодов времени $t \in \overline{0, T}$ множества $\mathbf{X}_s^{(j)}(t)$ и для всех периодов времени $t \in \overline{0, T-1}$ множества $\mathbf{U}_s^{(j)}(t)$, $j \in \overline{1, r}$, элементы которых представляют собой решения систем линейных алгебраических уравнений и неравенств, описываемые соотношениями (5) и (6) соответственно, есть непустые множества и являются выпуклыми многогранниками-компактами (с конечным числом вершин) в пространствах \mathbf{R}^s и \mathbf{R}^q соответственно.

В соответствии с уравнением (4), структура связей в мультиагентной модели управления региональным промышленным комплексом описывается набором уравнений:

$$\begin{aligned} x_1^{(j)}(t+1) &= a_{11}^{(j)}(t)x_1^{(j)}(t) + a_{12}^{(j)}(t)x_2^{(j)}(t) + \dots \\ &+ a_{1s}^{(j)}(t)x_s^{(j)}(t) + b_{11}^{(j)}(t)u_1^{(j)}(t) + b_{12}^{(j)}(t)u_2^{(j)}(t) + \dots \\ &\quad + b_{1q}^{(j)}(t)u_q^{(j)}(t); \\ x_2^{(j)}(t+1) &= a_{21}^{(j)}(t)x_1^{(j)}(t) + a_{22}^{(j)}(t)x_2^{(j)}(t) + \dots \\ &+ a_{2s}^{(j)}(t)x_s^{(j)}(t) + b_{21}^{(j)}(t)u_1^{(j)}(t) + b_{22}^{(j)}(t)u_2^{(j)}(t) + \dots \\ &\quad + b_{2q}^{(j)}(t)u_q^{(j)}(t), \\ &\dots\dots\dots \\ x_s^{(j)}(t+1) &= a_{s1}^{(j)}(t)x_1^{(j)}(t) + a_{s2}^{(j)}(t)x_2^{(j)}(t) + \dots \\ &+ a_{ss}^{(j)}(t)x_s^{(j)}(t) + b_{s1}^{(j)}(t)u_1^{(j)}(t) + b_{s2}^{(j)}(t)u_2^{(j)}(t) + \dots \\ &\quad + b_{sq}^{(j)}(t)u_q^{(j)}(t); \end{aligned} \tag{7}$$

фазовый вектор $x^{(j)}(t)$ характеризует состояние j -го вида экономической деятельности в рамках регионального промышленного комплекса в период времени $t \in \overline{0, T}$; $a_{i1}^{(j)}(t), a_{i2}^{(j)}(t), \dots, a_{is}^{(j)}(t)$ — фазовые коэффициенты i -й координаты фазового вектора $x^{(j)}(t) = (x_1^{(j)}(t), x_2^{(j)}(t), \dots, x_s^{(j)}(t))'$ объекта Π_j , $i \in \overline{1, s}$, $j \in \overline{1, r}$; $b_{i1}^{(j)}(t), b_{i2}^{(j)}(t), \dots, b_{iq}^{(j)}(t)$ — ресурсные коэффициенты для координат вектора управления $u^{(j)}(t) = (u_1^{(j)}(t), u_2^{(j)}(t), \dots, u_q^{(j)}(t))'$ агента E_j , относительно i -й координаты фазового вектора $x^{(j)}(t)$ объекта Π_j , $i \in \overline{1, s}$, $j \in \overline{1, r}$.

Неизвестны матрицы:

$A^{(j)}(t)$ — матрица порядка $(s \times s)$;

$B^{(j)}(t)$ — матрица порядка $(s \times q)$.

Известны наборы:

$x^{(j)}(\cdot) = \{x^{(j)}(t)\}$, $t \in \overline{-\tau, 0}$; $\tau \in \mathbf{N}$;

$u^{(j)}(\cdot) = \{u^{(j)}(t)\}$, $t \in \overline{-\tau, -1}$.

Полагается, что $\forall t \in \overline{0, T-1}$:

$A^{(j)}(t) \equiv A^{(j)}$

$B^{(j)}(t) \equiv B^{(j)}$.

Целью решения задачи идентификации является нахождение неизвестных параметров для набора соотношений (7). Экономический смысл достижения этой цели состоит в получении динамической модели для построения возможных траекторий социально-экономического развития промышленности региона, как объекта управления, и на основе которой

могут выполняться задачи принятия управленческих решений и оптимизации производств. Одним из возможных путей решения задачи идентификации параметров динамической модели (1)–(6) является метод формирования линейных регрессионных уравнений. Полученные на их основе оценки могут быть использованы в качестве коэффициентов взаимосвязи основных параметров модели регионального промышленного комплекса вида (1)–(6), включая фазовый вектор $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))'$ объекта I и вектор управления $u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t))'$ агента P ; фазовый вектор $x^{(j)}(t) = (x_1^{(j)}(t), x_2^{(j)}(t), \dots, x_s^{(j)}(t))'$ объекта Π_j и вектор управления $u^{(j)}(t) = (u_1^{(j)}(t), u_2^{(j)}(t), \dots, u_q^{(j)}(t))'$ агента E_j , $j \in \overline{1, r}$. Данный метод взят за основу для решения поставленной задачи.

Выборка данных для апробации подхода.

В рамках предлагаемого подхода пространственную выборку для построения регрессионных моделей образует набор данных, описывающих параметры фазового вектора и управления. В качестве такого объекта управления рассматривается промышленность Свердловской области, отличающаяся развитым комплексом обрабатывающих отраслей (Романова & Пономарева, 2022; Ускова & Саломатова, 2023).

В рамках общего исследования предлагается трехуровневая архитектура управления промышленным комплексом региона. Доминирует в этой системе федеральный уровень управления, которому подчиняется региональный уровень, который, в свою очередь, стоит над уровнем управления видами деятельности. На данном этапе работы целевая задача сводится к установлению оптимальных параметров системы управления на региональном уровне на основе данных по отдельным отраслям промышленности (ОКВЭД 2: раздел В, в т. ч. 05–09; раздел С: 10–32; разделы D и E). На основе полученных данных будут сформированы рычаги управления промышленной системой региона.

Выбор отдельных видов деятельности в качестве объектов и соответствующих им агентов в модели обоснован, поскольку эти сектора в значительной степени автономны, взаимодействуют друг с другом на горизонтальном уровне, имеют собственные стратегии развития, собственную производственную и технологическую базу, имеют различную степень интеграции в различные производственные цепочки и финансово-промышленные структуры, выпускают продукцию различного рода и имеют различные показатели эффектив-

ности функционирования. Подобный подход был ранее использован в работе (Кислицын & Городничев, 2021).

Значимость параметров фазового вектора в каждый период времени задается исходя из их значений за предыдущий период. Для описания модели динамики объекта управления параметры его фазового вектора и системы управления задаются коэффициентами, определяющими их значимость и взаимосвязанность. Коэффициенты находятся путем решения задачи идентификации параметров дискретной управляемой динамической системы на основе метода регрессионного анализа.

В качестве одного из управляющих факторов рассматривалась возможность принятия показателя объемов субсидий, выделяемых на развитие промышленности региона в целом. В ходе анализа такой возможности была установлена их слабая корреляционная зависимость с предикторами при оценке параметров отраслей промышленности. В связи с этим было принято решение об исключении из исследования переменных, значения по которым имеются в доступе только по одному знаку ОКВЭД (т. е. по разделу).

Результаты. Алгоритм реализации подхода к оценке параметров системы управления

На первом шаге предлагаемого методического подхода формируется временной ряд, смещенный на один шаг (лаг) вперед для каждого показателя, рассматриваемого в дальнейшем регрессионном анализе в качестве зависимой переменной: $y = x_i(t + 1)$, $i \in \overline{1, n}$; $y(j) = x_k^j(t + 1)$, $j \in \overline{1, r}$, $k \in \overline{1, s}$. Эта процедура делается последовательно для всех переменных в рамках каждого j -го вида экономической деятельности, согласно общему алгоритму построения агентной модели управления промышленным комплексом (Акбердина & Шорикив, 2022).

Фазовый вектор задается параметрами, характеризующими производственную, финансовую, экономическую, цифровую, социальную и др. составляющие развития промышленной системы. Для этого был отобран ряд показателей, рассматриваемых в разрезе отдельных отраслей, относящихся к промышленному производству по Свердловской области за период с 2005 г. по 2021 г. Данные ограничены 2021 г., поскольку включают структурированные по подвидам промышленной деятельности (по классам и подклассам ОКВЭД) региональные данные, полученные по допол-

нительным запросам в органы региональной статистики. Более поздние данные в соответствии с требуемой структурой не были доступны на момент написания статьи. В выборку вошли показатели «отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами» (млн руб.), «инвестиции в основной капитал» (млн руб., «затраты на внедрение и использование цифровых технологий» (млн руб., «прибыль (убыток) до налогообложения» (млн руб., «фонд оплаты труда» (млн руб., «количество организаций по данным государственной регистрации» (ед.). Показатель «фонд оплаты труда» рассчитывался вручную как произведение среднесписочной численности работников организаций и среднемесячной номинальной начисленной заработной платы на одного работника.

В качестве управляющих факторов использованы объемы привлеченных бюджетных средств, а также привлеченных средств кроме бюджетных. К последним относятся кредиты банков и заемные средства других организаций, средства внебюджетных фондов, средства организаций и населения для долевого строительства и прочие источники кроме собственных. Показатель «объемы привлеченных средств кроме бюджетных» не является прямым индикатором оказания финансовой помощи отраслям промышленности государством, тем не менее он отражает объемы денежных средств, которые предприятия вынуждены выискивать, что можно рассматривать как потенциальную возможность для оказания дополнительной финансовой помощи со стороны правительства посредством субсидий, налоговых вычетов, льготного налогообложения и кредитования, финансирования через ФРП и др.

В процессе обработки исходных данных в целях приведения стоимостных показателей к сопоставимому виду проведено их дефлирование на основе индексов цен производителей. На этапе анализа подготовленных данных для построения регрессионных моделей были выявлены случаи наличия мультиколлинеарности. Для устранения линейной зависимости между объясняющими переменными использован метод их пошагового исключения из модели. Фрагмент результатов регрессионного анализа по данным на примере вида экономической деятельности «Производство бумаги и бумажных изделий» по Свердловской области приведен в таблице 1, где $x_k^j(t + 1)$, $k \in \overline{1, s}$ — k -й параметр фазового вектора объекта Π_j — j -го вида деятельности, в период времени $(t + 1)$ ($s = 6$).

Таблица 1

Матрица коэффициентов для $x_k^{(j)}(t+1)$, $k \in \overline{1,6}$, полученных в ходе регрессионного анализа по виду экономической деятельности «Производство бумаги и бумажных изделий» по Свердловской области

Table 1

Matrix of coefficients for $x_k^{(j)}(t+1)$, $k \in \overline{1,6}$ resulting from the regression analysis for the type of economic activity "Production of paper and paper products" in Sverdlovsk oblast

Фазовый вектор в период $(t+1)$	Коэффициент а параметров фазового вектора							Коэффициент b параметров управляющих факторов	
	свободный член	отгружено товаров	инвестиции в основной капитал	затраты на цифровые технологии	прибыль (убыток)	фонд оплаты труда	количество организаций	привлеченные средства кроме бюджетных	привлеченные бюджетные средства
$y^{(j)}$	$a_0^{(j)}$	$x_1^{(j)}$	$x_2^{(j)}$	$x_3^{(j)}$	$x_4^{(j)}$	$x_5^{(j)}$	$x_6^{(j)}$	$u_1^{(j)}$	$u_2^{(j)}$
Отгружено товаров $x_1^{(j)}(t+1)$	727,72	0,5705	0	0	0	0	0	0	0
Инвестиции в основной капитал $x_2^{(j)}(t+1)$	1311,5	-0,128	1,079	25,339	0	-4,344	-7,501	18,413	-14,583
Затраты на цифровые технологии $x_3^{(j)}(t+1)$	4,047	0	0	0	0	0	0	-0,226	0
Прибыль (убыток) $x_4^{(j)}(t+1)$	39,552	-0,110	0,616	57,474	0	0	0	0	0
Фонд оплаты труда $x_5^{(j)}(t+1)$	26,223	0,005	0	0	0	0	0	0	0
Количество организаций $x_6^{(j)}(t+1)$	-74,568	0	0,146	8,778	-0,097	0	1,283	4,088	-4,042

Источник: Составлено авторами на основе данных регрессионного анализа, полученных в среде программного комплекса Statistica

Приведенные в таблице 1 данные могут быть интерпретированы следующим образом. В рамках производства в регионе бумаги и бумажных изделий, объема отгруженных товаров и выполненных услуг в следующем периоде времени напрямую зависит от их объемов, полученных (выполненных) в текущем году. На рост инвестиций в среднесрочной перспективе прямое влияние оказывают текущие объемы инвестиций в основной капитал, затраты на цифровые технологии и привлеченные внебюджетные средства, обратная зависимость здесь наблюдается от объемов отгруженной продукции и выполненных услуг, роста фонда оплаты труда и численности организаций, а также привлеченных бюджетных средств. Из этого следует, что рост инвестиций (за счет собственных и привлеченных средств, кроме бюджетных) является следствием ослабления темпов развития организаций отрасли. Будущие затраты на цифровые технологии с отрицательным знаком зависят от привлеченных

в настоящее время средств, кроме бюджетных, что может говорить о том, что стратегии цифровизации руководства компаний по производству бумаги планируют осуществлять преимущественно за счет собственных средств. Прибыль организаций в следующий отчетный год зависит от роста вкладываемых в текущем году инвестиций в основной капитал, а также затрат на цифровые технологии, при этом отрицательная зависимость наблюдается от объемов произведенных бумажных изделий (в стоимостном выражении), что можно объяснить влиянием роста удельных затрат на единицу продукции. Объемы фонда оплаты труда в следующем году имеют линейную зависимость с текущими объемами отгруженной бумажной продукции, что может быть обосновано условиями развития рынка. На увеличение числа организаций, задействованных в производстве бумаги и изделий из нее, положительное влияние оказывают рост инвестиций в основной капитал, затраты на цифровизацию, текущий

Таблица 2

Качественные показатели регрессионных моделей (доля охвата, статистическая значимость) для $x_i(t+1)$, $i \in \overline{1,6}$, по виду экономической деятельности «Производство бумаги и бумажных изделий» по Свердловской области

Table 2

Qualitative indicators of regression models (share of coverage, statistical significance) for $x_i(t+1)$, $i \in \overline{1,6}$ by type of economic activity «Production of paper and paper products» in Sverdlovsk oblast

Функция по предиктору	Качественные показатели модели			
	Multiple R^2	F_p	p	Std.Err. of Estimate
$x_1(t+1)$	0,7952997	$F(1,14) = 54,393$	0,00000348	377,013332
$x_2(t+1)$	0,9958647	$F(7,3) = 103,208$	0,00143572	6,654699
$x_3(t+1)$	0,5890285	$F(1,9) = 12,899$	0,00582454	1,265313
$x_4(t+1)$	0,6541313	$F(3,12) = 7,565$	0,00420895	61,204241
$x_5(t+1)$	0,3783973	$F(1,14) = 8,522$	0,01120583	7,772437
$x_6(t+1)$	0,9781451	$F(6,3) = 22,378$	0,01376733	4,296181

Источник: Составлено авторами на основе данных регрессионного анализа, полученных в среде программного комплекса Statistica

уровень конкуренции на локальном рынке (количество работающих организаций), объемы привлеченных внебюджетных средств. При этом отрицательное влияние на рост количества организаций оказывают прибыльность их деятельности и привлечение дополнительных бюджетных средств, что может быть объяснено актуализацией процессов горизонтальной интеграции (в формате поглощений) при увеличении объемов свободных денежных средств преимущественно крупных компаний отрасли. Наличие в матрице коэффициентов с нулевыми значениями обусловлено отсутствием линейной зависимости между соответствующими базовыми переменными и предикторами.

В ходе регрессионного анализа для оценки качества полученных моделей учитывались множественный коэффициент детерминации ($Multiple R^2$), критерий F -статистики Фишера, значения p -level, размеры стандартной ошибки коэффициентов уравнений (Std. Error) (табл. 2). При проведении анализа проверялось наличие и, при необходимости, устранялась мультиколлинеарность.

Множественный коэффициент детерминации R^2 — отражает долю разброса выборочного среднего значения предиктора (зависимой переменной), что определяет степень его линейной зависимости от переменных модели (Pascala, 2023). Согласно критерию Чеддока, сила связи является высокой при нахождении R^2 в пределах 0,7–0,9 и очень высокой (или

функциональной) в интервале от 0,9 до 0,99 (Zolotarev et al., 2016). Саму долю неучтенных факторов характеризует величина σ :

$$\sigma = (1 - R^2) \cdot 100 \%$$

Так, например, увеличение количества организаций в следующий период зависит от разнонаправленных изменений комплекса учитываемых показателей в текущий период времени на 97,8 %. Остальные 2,2 % показателей, образующих прямую линейную зависимость, моделью не учтены.

Статистическая значимость моделей определяется сопоставлением табличного F_T и расчетного F_p — значений критерия Фишера — Снедекора, которые должны удовлетворять условию $F_p > F_T$. Из приведенных в таблице 2 данных видно, что все регрессионные уравнения, построенные для отрасли «Производство бумаги и бумажных изделий», являются статистически значимыми. Подтверждают это и значения p -level. В целом из общего числа построенных моделей статистически незначимыми признаны 19, что составляет 11 % от их общей совокупности.

На рисунке приведены графики, на которых отображено сопоставление исходных рядов $x_1(t+1)$, ..., $x_6(t+1)$ с рядами прогнозной оценки соответствующих функций регрессии.

В графическом виде наглядно прослеживается качество построенных моделей. Стоит отметить модель ряда $x_1(t+1)$, которая является статистически значимой

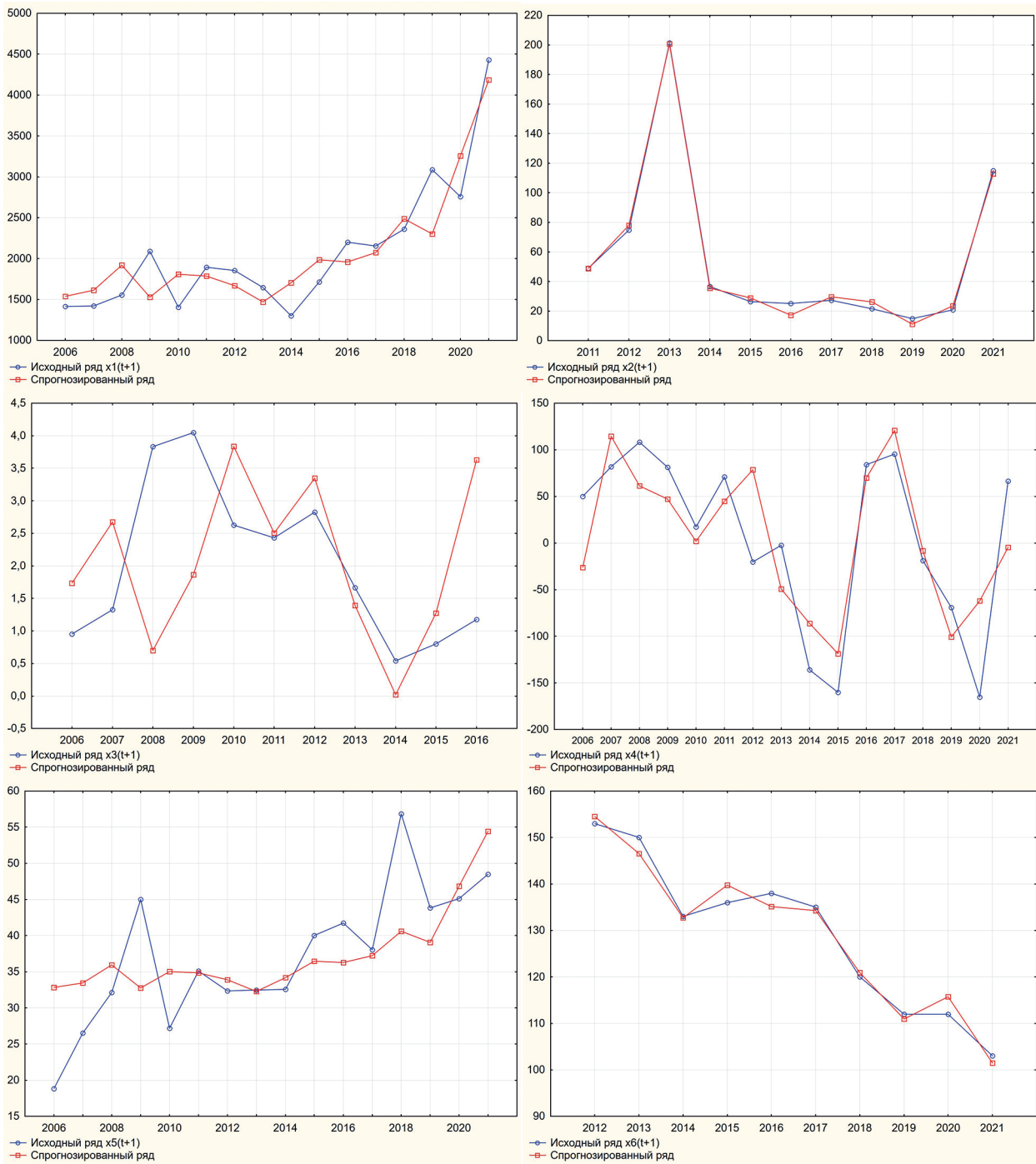


Рис. Графики сопоставления исходных и прогнозных рядов (источник: составлено авторами в программном комплексе Statistica)

Fig. Comparison of original and forecast series

по критериям F -статистика и p -level, но согласно σ -критерию — 20,5 % показателей, образующих прямую линейную зависимость, моделью не учтены. Данный фактор снижает качество прогноза, выдаваемого моделью, тем не менее она отвечает условиям решения поставленных задач и может быть использована для идентификации параметров системы управления промышленным комплексом

Свердловской области. Прогноз, выстраиваемый функциями предикторов $x_3(t+1)$, $x_4(t+1)$ и $x_5(t+1)$ еще менее точен, в то время как наилучшим качеством оценки отличаются модели по $x_2(t+1)$ и $x_6(t+1)$.

Обсуждение

В результате проделанной работы всего было получено 168 регрессионных моде-

лей, распределенных на три группы. В первую вошли 92 модели, показавшие высокие качественные характеристики (в т. ч. статистическую значимость и уровень множественной детерминации выше 0,7) и точность прогноза. Во вторую группу включены 33 модели качества выше среднего, значение R^2 которых находится в пределах 0,5–0,7, но при этом сохраняется высокая статистическая значимость. По критерию отклонений оценки от исходного ряда модели данной группы непригодны для построения качественного прогноза на продолжительный период, тем не менее они могут быть использованы для принятия управленческих решений, а также идентификации параметров системы управления промышленным комплексом региона. В последнюю группу вошли 43 модели, которые либо статистически незначимы, либо значимы, но при этом доля неучтенных ими факторов составляет менее 50 %. Модели данной группы исключены из дальнейшей работы.

В силу установления подавляющего большинства коэффициентов b параметров фазового вектора и управляющих факторов задачу идентификации параметров предлагаемой агент-ориентированной модели можно считать решенной. Следующим этапом исследования будут построение агентной модели управления промышленным комплексом на региональном уровне и ее апробация в условиях Свердловской области на основе разработанной ранее архитектуры.

Проверяемая в ходе исследования гипотеза о возможности нахождения (в рамках задачи идентификации) достоверных коэффициентов, характеризующих взаимосвязи социально-экономических параметров промышленности региона и влияния на нее системы государственного управления, подтверждена. Условием для принятия таких коэффициентов является соответствие содержащих их регрессионных моделей основным критериям качества. Вторая гипотеза — о возможности рассмотрения в качестве фактора управления отдельными отраслями промышленности региона такого показателя, как объемы государственных субсидий, направляемых на экономическое развитие субъекта Российской Федерации, данные по которому публикуются без учета отраслевой принадлежности, — опровергнута. В рамках регрессионного анализа влияние такого показателя на параметры отдельных видов деятельности носит рассеянный характер, что сопрово-

ждается слабыми корреляционными связями с предикторами моделей.

Заключение

В результате исследования построено 125 статистических моделей достаточно высокого качества, которые могут быть использованы в решении задачи идентификации параметров системы промышленного комплекса Свердловской области. Основной причиной появления моделей, не соответствующих критериям отбора, послужило исключение из анализа ряда показателей, не соответствующих структурной детализации информационной базы. Тем не менее в силу подавляющего большинства качественных моделей в числе построенных (74 %) можно говорить о достижении поставленной цели работы.

Предложенный подход дополняет авторскую концепцию агент-ориентированного моделирования системы трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом. В рамках общей задачи построения мультиагентной модели полученные результаты позволяют установить связь между агентами, уточнить их специфику, рассчитать и дать оценку результатов применения механизмов управления. Использованный подход отличается гибкостью реализации в программной среде и адаптивностью и развивает методическую основу для построения систем управления региональными промышленными комплексами.

Построенная и верифицированная модель может быть использована органами власти региона для управления региональным промышленным комплексом, а именно для построения прогнозов в соответствии с планируемыми управляющими воздействиями, вычисления оптимальных управляющих воздействий в соответствии с планами по развитию регионального промышленного комплекса, вычисления оптимальных управляющих воздействий на промышленность в соответствии с различными целями (целевыми функциями).

Попутным результатом исследования стало выявление множества негативных факторов, связанных с развитием системы статистического учета России, в том числе работы региональных управлений Федеральной службы государственной статистики. Доступная на сегодняшний день учреждениям науки статистическая база затрудняет проведение эконометрических и статистических исследований.

Список источников

- Акбердина, В. В., Шориков, А. Ф. (2022). Управление промышленными комплексами: иерархическая агент-ориентированная модель. *Управленец*, 13(6), 2–14. <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2022-13-6-1>
- Гичиев, Н. С. (2021). Влияние инвестиций в основной капитал на экономический рост: региональный аспект. *Региональные проблемы преобразования экономики*, 7, 121–128. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2021-7-121-128>
- Голова, И. М. (2021). Экосистемный подход к управлению инновационными процессами в российских регионах. *Экономика региона*, 17(4), 1346–1360. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-21>
- Ивантер, В. В. (2016). Стратегия перехода к экономическому росту. *Проблемы прогнозирования*, 1, 3–8.
- Кислицын, Е. В., Городничев, В. В. (2021). Имитационное моделирование развития отдельных отраслей тяжелой промышленности. *Бизнес-информатика*, 15(1), 59–77. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.1.59.77>
- Макаров, В. Л., Бахтизин, А. Р. (2009). Новый инструментарий в общественных науках — агент-ориентированные модели: общее описание и конкретные примеры. *Экономика и управление*, 12, 13–25.
- Макаров, В. Л., Бахтизин, А. Р., Сушко, Е. Д. (2020). Агент-ориентированная модель как инструмент регулирования экологии региона. *Журнал Новой экономической ассоциации*, 1(45), 151–171. <https://doi.org/10.31737/2221-2264-2020-45-1-6>
- Песков, Д. (2022). Условия технологического суверенитета. *Экономист*, 6, 30–32.
- Романова, О. А., Пономарева, А. О. (2020). Многовекторная промышленная политика России в условиях формирования нового индустриального ландшафта. *Журнал экономической теории*, 17(2), 276–291. <https://doi.org/10.31063/2073-6517/2020.17-2.3>
- Романова, О. А., Пономарева, А. О. (2022). Индустриальный регион в условиях санкций: риски и возможности развития. В: *Актуальные проблемы экономики и управления: сборник статей Десятой всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 20–21 октября 2022 г.* (с. 106–112). Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 194.
- Смородинская, Н. В. (2017). Усложнение организации экономических систем в условиях нелинейного развития. *Вестник Института экономики РАН*, 5, 104–115.
- Ускова, А. Ю., Саломатова, Ю. В. (2023). Оценка факторов устойчивости обрабатывающих производств в индустриальных регионах России. *Экономика промышленности*, 16(1), 77–85. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-1-77-85>
- Флуд, Н. А. (2006). Как измерить «устойчивость развития»? *Вопросы статистики*, 10, 19–29.
- Цветков, В. Я. (2017). Эмерджентизм. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2–1, 137–138.
- Широв, А. А., Гусев, М. С., Янговский, А. А. (2012). Обоснование возможных сценариев долгосрочного развития российской экономики. *ЭКО*, 6, 60–80.
- Шориков, А. Ф., Коровин, Г. Б., Сиротин, Д. В. (2023). Управление промышленным комплексом региона: архитектура агент-ориентированной модели. *Управленец*, 14(6), 63–76. <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2023-14-6-5>
- Bonabeau, E. (2002). Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(3), 7280–7287. <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- Castelle, K., Bradley, J., & Chesterman, Ch. (2022). Systems Theory for Complex System Governance. In: C. B. Keating, P. F. Katina, C. W. Chesterman Jr., J. C. Pyne (Eds.), *Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality* (pp. 97–118). Springer, Ch-am. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93852-9_4
- Chen, Z. (2023). Analysis of economic growth forecast based on regression model. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 42, 91–98. <https://doi.org/10.54097/hset.v42i.7068>
- Harman, G. (2010). Diophantine approximation with multiplicative functions. *Monatshefte für Mathematik*, 160, 51–57.
- Haslwanter, Th. (2022). Linear Regression Models. *An Introduction to Statistics with Python*, 1651, 229–263. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97371-1_12
- Karaca, Y. (2022). Theory of complexity, origin and complex systems. In: *Multi-Chaos, Fractal and Multi-fractional Artificial Intelligence of Different Complex Systems* (pp. 9–20). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90032-4.00003-1>
- Kucheryavskiy, S., Rodionova, O., & Pomerantsev, A. (2023). Procrustes cross-validation of multivariate regression models. *Analytica Chimica Acta*, 1255, 341096. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341096>
- Li, X., & Zhuang, X. (2022). Eco-City Problems: Industry–City–Ecology, Urbanization Development Assessment in Resource-Exhausted Cities. *Sustainability*, 15(1), 166. <https://doi.org/10.3390/su15010166>
- Lu, Y. (2021). Empirical Analysis on the Relationship Between Tertiary Industry Structure and Economic Growth Based on Multiple Regression — A Case Study of Henan Province. *E3S Web of Conferences*, 235, 02019. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202123502019>
- Majumder, Sh. (2022). Economic and non-economic determinants of economic growth in Bangladesh: multivariate regression analysis. *Independent Journal of Management & Production*, 13, 693–718. <https://doi.org/10.14807/ijmp.v13i2.1545>
- Pacala, F. A. (2023). A multiple regression analysis of economic outputs as a factor in TIMSS score in science among selected countries in Asia. *International Journal of Humanities, Social Sciences and Business (INJOSS)*, 2(2), 218–224. <https://doi.org/10.54443/injoss.v2i2.51>

- Pareto, A. (2022). A robust method for regression and correlation analysis of socio-economic indicators. *Quality & Quantity*, 57, 5035–5053. <https://doi.org/10.1007/s11135-022-01599-z>
- Qian, F., Tang, Y., & Yu, X. (2023). The Future of Process Industry: A Cyber-Physical-Social System Perspective. *IEEE transactions on cybernetics*, 37607148. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2023.3298838>
- Rao, C., & Toutenburg, H. (1995). Exact and Stochastic Linear Restrictions. In: *Linear Models* (pp. 111–154). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0024-1_5
- Togoontumur, T., & Cooray, N. (2023). Does Collaboration Matter: The Effect of University-industry R&D Collaboration On Economic Growth. *Journal of the Knowledge Economy*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13132-023-01469-5>
- Working, H., & Hotelling, H. (1929). Applications of the Theory of Error to the Interpretation of Trends. *Journal of the American Statistical Association*, 24(165A), 73–85. <https://doi.org/10.1080/01621459.1929.10506274>
- Yan, B., Yao, B., & Zhang, Ch. (2023). Industrial structure, high-quality development of logistics industry and the economy. *PLoS ONE*, 18(5), e0285229. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285229>
- Zhang, W., Zhang, T., Li, H., & Zhang, H. (2022). Dynamic spillover capacity of R&D and digital investments in China's manufacturing industry under long-term technological progress based on the industry chain perspective. *Technology in Society*, 71, 102129. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102129>
- Zolotarev, K., Belyaeva, N., Mikhailov, A. N., & Mikhailova, M. (2016). Dependence between LD50 for Rodents and LC50 for Adult Fish and Fish Embryos. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 162, 439–444. <https://doi.org/10.1007/s10517-017-3636-y>

References

- Akberdina, V. V., & Shorikov, A. F. (2022). Managing industrial complexes: A hierarchical agent-oriented model. *Upravlenets [The Manager]*, 13(6), 2–14. <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2022-13-6-1> (In Russ.)
- Bonabeau, E. (2002). Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(3), 7280–7287. <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- Castelle, K., Bradley, J., & Chesterman, Ch. (2022). Systems Theory for Complex System Governance. In: C. B. Keating, P. F. Katina, C. W. Chesterman Jr., J. C. Pyne (Eds.), *Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality* (pp. 97–118). Springer, Ch-am. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93852-9_4
- Chen, Z. (2023). Analysis of economic growth forecast based on regression model. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 42, 91–98. <https://doi.org/10.54097/hset.v42i.7068>
- Flud, N. A. (2006). How to measure “sustainability of development”? *Voprosy statistiki*, 10, 19–29. (In Russ.)
- Gichiev, N. S. (2021). Impact of fixed capital investment for economic growth: regional aspect. *Regionalnye problemy preobrazovaniya ekonomiki [Regional problems of economic transformation]*, 7, 121–128. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2021-7-121-128>. (In Russ.)
- Golova, I. M. (2021). Ecosystem Approach to Innovation Management in Russian Regions. *Ekonomika regiona [Economy of regions]*, 17(4), 1346–1360. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-21> (In Russ.)
- Harman, G. (2010). Diophantine approximation with multiplicative functions. *Monatshefte für Mathematik*, 160, 51–57.
- Haslwanter, Th. (2022). Linear Regression Models. *An Introduction to Statistics with Python*, 1651, 229–263. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97371-1_12
- Ivanter, V. V. (2016). Strategy of transition to economic growth. *Problemy prognozirovaniya [Studies on Russian economic development]*, 1, 3–8. (In Russ.)
- Karaca, Y. (2022). Theory of complexity, origin and complex systems. In: *Multi-Chaos, Fractal and Multi-fractional Artificial Intelligence of Different Complex Systems* (pp. 9–20). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90032-4.00003-1>
- Kislitsyn, E. V., & Gorodnichev, V. V. (2021). Simulation of development of individual heavy industry sectors. *Biznes-informatika [Business Informatics]*, 15(1), 59–77. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.1.59.77> (In Russ.)
- Kucheryavskiy, S., Rodionova, O., & Pomerantsev, A. (2023). Procrustes cross-validation of multivariate regression models. *Analytica Chimica Acta*, 1255, 341096. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341096>
- Li, X., & Zhuang, X. (2022). Eco-City Problems: Industry–City–Ecology, Urbanization Development Assessment in Resource-Exhausted Cities. *Sustainability*, 15(1), 166. <https://doi.org/10.3390/su15010166>
- Lu, Y. (2021). Empirical Analysis on the Relationship Between Tertiary Industry Structure and Economic Growth Based on Multiple Regression — A Case Study of Henan Province. *E3S Web of Conferences*, 235, 02019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123502019>
- Majumder, Sh. (2022). Economic and non-economic determinants of economic growth in Bangladesh: multivariate regression analysis. *Independent Journal of Management & Production*, 13, 693–718. <https://doi.org/10.14807/ijmp.v13i2.1545>
- Makarov, V. L., & Bakhtizin, A. R. (2009). New tools in social sciences — agent-oriented models: General description and specific examples. *Ekonomika i upravlenie [Economics and Management]*, 12, 13–25. (In Russ.)

- Makarov, V. L., Bahtizin, A. R., & Sushko, E. D. (2020). Agent-based model as a tool for controlling environment of the region. *Zhurnal Novoy ekonomicheskoy assotsiatsii [Journal of the New Economic Association]*, 1(45), 151–171. <https://doi.org/10.31737/2221-2264-2020-45-1-6> (In Russ.)
- Pacala, F. A. (2023). A multiple regression analysis of economic outputs as a factor in TIMSS score in science among selected countries in Asia. *International Journal of Humanities, Social Sciences and Business (INJOSS)*, 2(2), 218–224. <https://doi.org/10.54443/injoss.v2i2.51>
- Pareto, A. (2022). A robust method for regression and correlation analysis of socio-economic indicators. *Quality & Quantity*, 57, 5035–5053. <https://doi.org/10.1007/s11135-022-01599-z>
- Peskov, D. (2022). Conditions of technological sovereignty. *Ekonomist [Economist]*, 6, 30–32. (In Russ.)
- Qian, F., Tang, Y., & Yu, X. (2023). The Future of Process Industry: A Cyber-Physical-Social System Perspective. *IEEE transactions on cybernetics*, 37607148. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2023.3298838>
- Rao, C., & Toutenburg, H. (1995). Exact and Stochastic Linear Restrictions. In: *Linear Models* (pp. 111–154). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0024-1_5
- Romanova, O. A., & Ponomareva, A. O. (2020). Multi-vector Industrial Policy in Russia in an Emerging New Industrial Landscape. *Zhurnal ekonomicheskoy teorii [Russian Journal of Economic Theory]*, 17(2), 276–291. <https://doi.org/10.31063/2073-6517/2020.17-2.3>. (In Russ.)
- Romanova, O. A., & Ponomareva, A. O. (2022). Industrial region under sanctions: risks and opportunities for development. In: *Aktualnye problemy ekonomiki i upravleniya. V: sbornik statey Desyatoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, 20–21 oktyabrya 2022 g. [Current problems of economics and management: collection of articles of the Tenth All-Russian scientific and practical conference with international participation]* (pp. 106–112). Ekaterinburg: Publishing house USGU. (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]*, 6, 60–80. (In Russ.)
- Shorikov, A. V., Korovin, G. B., & Sirotnin, D. V. (2023). Methodology for regional industrial complex management: Architecture of an agent-based model. *Upravlenets [The Manager]*, 6, 63–76. <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2023-14-6-5> (In Russ.)
- Smorodinskaya, N. V. (2017). Complication of the organization of economic systems in the conditions of nonlinear development. *Vestnik Instituta ekonomiki RAN [The Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences]*, 5, 104–115. (In Russ.)
- Togoontumur, T., & Cooray, N. (2023). Does Collaboration Matter: The Effect of University-industry R&D Collaboration On Economic Growth. *Journal of the Knowledge Economy*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13132-023-01469-5>
- Tsvetkov, V. Ya. (2017). Emergentism. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy [International Journal of Applied and Basic Research]*, 2-1, 137–138. (In Russ.)
- Uskova, A. Yu., & Salomatova, J. V. (2023). Assessment of factors of sustainability of manufacturing sector in industrial regions of Russia. *Ekonomika promyshlennosti [Russian Journal of Industrial Economics]*, 16(1), 77–85. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-1-77-85> (In Russ.)
- Working, H., & Hotelling, H. (1929). Applications of the Theory of Error to the Interpretation of Trends. *Journal of the American Statistical Association*, 24(165A), 73–85. <https://doi.org/10.1080/01621459.1929.10506274>
- Yan, B., Yao, B., & Zhang, Ch. (2023). Industrial structure, high-quality development of logistics industry and the economy. *PloS ONE*, 18(5), e0285229. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285229>
- Zhang, W., Zhang, T., Li, H., & Zhang, H. (2022). Dynamic spillover capacity of R&D and digital investments in China's manufacturing industry under long-term technological progress based on the industry chain perspective. *Technology in Society*, 71, 102129. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102129>
- Zolotarev, K., Belyaeva, N., Mikhailov, A. N., & Mikhailova, M. (2016). Dependence between LD50 for Rodents and LC50 for Adult Fish and Fish Embryos. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 162, 439–444. <https://doi.org/10.1007/s10517-017-3636-y>

Информация об авторах

Акбердина Виктория Викторовна — доктор экономических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, заместитель директора по науке, Институт экономики УрО РАН; <https://orcid.org/0000-0002-6463-4008> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29; e-mail: akberdina.vv@uiec.ru).

Шориков Андрей Федорович — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Центра структурной политики, Институт экономики УрО РАН; <https://orcid.org/0000-0003-1255-0862> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29; e-mail: shorikov.af@uiec.ru).

Коровин Григорий Борисович — кандидат экономических наук, руководитель сектора экономических проблем отраслевых рынков, Институт экономики УрО РАН; <https://orcid.org/0000-0003-1606-6963> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29; e-mail: korovin.gb@uiec.ru).

Сиротин Дмитрий Владимирович — кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Институт экономики УрО РАН; <https://orcid.org/0000-0002-3794-3956> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29; e-mail: sirotnin.dv@uiec.ru).

About the authors

Victoria V. Akberdina — Dr. Sci. (Econ.), Professor of RAS, Corresponding Member of RAS, Deputy Director for Science, Institute of Economics of the Ural Branch of RAS; <https://orcid.org/0000-0002-6463-4008> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: akberdina.vv@uiec.ru).

Andrey F. Shorikov — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Research Associate, Center for Structural Policy, Institute of Economics of the Ural Branch of RAS; <https://orcid.org/0000-0003-1255-0862> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: shorikov.af@uiec.ru).

Grigoriy B. Korovin — Cand. Sci. (Econ.), Head of the Sector of Economic Problems of Sectoral Markets, Institute of Economics of the Ural Branch of RAS; <https://orcid.org/0000-0003-1606-6963> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: korovin.gb@uiec.ru).

Dmitry V. Sirotnin — Cand. Sci. (Econ.), Senior Research Associate, Center for Structural Policy, Institute of Economics of the Ural Branch of RAS; <https://orcid.org/0000-0002-3794-3956> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: sirotnin.dv@uiec.ru).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Дата поступления рукописи: 08.06.2023.

Прошла рецензирование: 27.07.2023.

Принято решение о публикации: 21.12.2023.

Received: 08 Jun 2023.

Reviewed: 27 Jul 2023.

Accepted: 21 Dec 2023.