

АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕГИОНА

AGENT-ORIENTED MODEL OF THE REGION'S INDUSTRY DIGITALIZATION



Г. Б. Коровин, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук
г. Екатеринбург
korovin.gb@uiec.ru

G. Korovin, Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Yekaterinburg

Статья посвящена разработке модели, описывающей процесс внедрения цифровых технологий в промышленность региона с учетом важнейших факторов – поведения фирм, отношения их к цифровым технологиям и влияния государственных субсидий. *Объектом исследований* является промышленный комплекс региона как сложная адаптивная система. *Предметом исследования* являются экономические отношения, складывающиеся в процессе цифровой трансформации промышленности. *Цель исследования* – моделирование процессов цифровизации промышленности в рамках регионального промышленного комплекса. В качестве *методического инструментария* исследования использовано агент-ориентированное моделирование. В качестве *теоретической основы* исследования выступает теория сложных систем, подходы теорий игр, теории диффузии инноваций. Модель реализуется в современной программной среде Anylogic. В результате исследования создана агент-ориентированная модель, реализованы алгоритмы принятия решений по поводу цифровизации промышленными предприятиями, учтены эффекты коллективной технологической трансформации. Созданный вариант модели позволяет в результате проведения сценарных имитаций оценивать значимость факторов, влияющих на интенсивность цифровизации – увеличение размера субсидий на цифровизацию, учет масштаба предприятий, отраслевых особенностей, информационного воздействия на руководителей промышленных предприятий и т. д. Модель позволяет наблюдать динамику процесса цифровой трансформации, выявить своеобразные волнообразные эффекты. Спецификой модели является учет ограниченной рациональности в поведении фирм, учет информационного взаимодействия промышленных предприятий, временных лагов во внедрении цифровых технологий. Результаты могут быть полезны исследователям, специалистам промышленных предприятий, представителям органов власти для формирования системы стимулов цифровой трансформации промышленности. Полученные результаты могут стать основой для дальнейшего развития модельного инструментария управления цифровизацией

Ключевые слова: цифровизация, промышленность, цифровая экономика, технологическое развитие, цифровая технология, агент-ориентированное моделирование, государственные субсидии, сценарные имитации, волнообразные эффекты, система стимулов

The article is devoted to the model of the digital technologies introducing in the region's industry. It takes into account the most important factors, such as the behavior of firms, their attitude to digital technologies and the impact of government subsidies. *The object of research* is the regional industrial complex as a complex adaptive system. *The subject of the research* is the economic relations emerging in the process of digital transformation of industry. *The purpose of the research* is to model the processes of digitalization of industry within the framework of the regional industrial complex. The author has used agent-oriented modeling as a methodological tool of the research. The theoretical basis of the research is the theory of complex systems, game theory, theory of diffusion of innovations. The model is implemented in the Anylogic modern software environment. As a result, an agent-oriented model was created; algorithms for digitalization decision-making by industrial enterprises were implemented. We take into account the effects of collective technological transformation. The created version of the model allows by scenario simulations to assess the significance of factors affecting the intensity of digitalization – an increase in the amount of subsidies for digitalization, taking into account the scale of enterprises, industry characteristics, information impact

on the heads of industrial enterprises, etc. The model allows us to observe the dynamics of the digital transformation process, to identify peculiar wave-like effects. The specifics of the model are taking into account limited rationality in the behavior of firms, the information interaction between industrial enterprises, time lags in the introduction of digital technologies. The results can be useful to researchers, specialists of industrial enterprises, representatives of government authorities for the formation of a system of incentives for the digital transformation of industry. The obtained results can become the basis for further development of model tools for digitalization management

Keywords: digitalization, industry, digital economy, technological development, digital technology, agent-oriented modeling, government subsidies, scenario simulations, wave-like effects, incentive system

Введение. Появление новых цифровых технологий вызвало революцию в промышленности, создало новые возможности для более быстрого развития экономики. Технологии передового поколения, несмотря на перспективы их использования, очевидно, будут встречать сопротивление в условиях доминирования традиционных производств. В этих условиях необходимо сформировать инструменты, которые позволят оценить динамику цифровизации, влияющие факторы, прогнозировать ее результаты, предложить финансовые модели.

На уровне предприятий, среди сфер, где проявляются эффекты цифровизации называют конкурентоспособность, гибкость, инновационность, качество, эффективность использования ресурсов [7]. Исследованиями подтверждается взаимосвязь между цифровизацией бизнеса и производительностью, а необходимость инвестирования в повышение уровня цифровизации называется существенной для роста эффективности работы компании [10]. Проникновение (диффузия) информационных технологий послужило формированию акселерационных эффектов, выраженных в наращивании темпов роста мировой экономики, что, в свою очередь, способствует новой волне развития цифровых технологий и активизации трансформационных процессов.

Статья посвящена разработке простой модели, представляющей процесс внедрения на примере цифровых технологий в промышленности с учетом важнейших факторов – поведения фирм, отношения их к цифровым технологиям и влияния государственных субсидий. Для определения параметров агент-ориентированной имитационной модели использованы фактические данные по цифровизации промышленных предприятий в рамках отдельного региона – Свердловской области.

Объект исследования – промышленный комплекс региона как система, отличается

гетерогенностью элементов, разнообразием поведенческих установок фирм, широкими возможностями по их адаптации и эволюционированию. При этом, в таких системах присутствуют и агенты высшего уровня, принимающие коллективные решения и структуры иерархического управления и координации. Региональный промышленный комплекс мы рассматриваем как сложную адаптивную систему, в которой можно наблюдать нелинейность, взаимодействие между гетерогенными агентами, управляющие механизмы, децентрализованные информационные потоки, обучение, разнообразие моделей поведения, способность к инновациям и т. д. Такие свойства промышленных территорий, включая сложную взаимосвязь между адаптацией на индивидуальном уровне и эволюцией системного уровня, отмечены в работе F. Squazzoni, R. Voero [13].

Предметом исследования являются экономические отношения, складывающиеся в процессе цифровой трансформации промышленности.

Цель исследования – моделирование процессов цифровизации промышленности в рамках региона.

В качестве *методического инструментария* исследования промышленного комплекса использовалось агент-ориентированное моделирование, которое может применяться для исследования сложных динамических систем, когда объект и исследуемая проблема с трудом поддаются формализации и моделированию с помощью аналитических и численных методов. Агентный подход представляется нам наиболее универсальным, поскольку он основан на моделировании агента, допускает широкий диапазон параметров, методов, законов поведения и иных характеристик. При этом, локальное поведение агентов, работающих по своим собственным правилам, формирует глобальное поведение системы в целом, позволяет наблюдать новые системные

эффекты, выявлять эмерджентные свойства [9]. Эмерджентность порождается взаимодействиями относительно простых агентов, в то время как структуры взаимодействия агентов становятся достаточно сложными.

В качестве *теоретической основы* исследования выступает теория сложных систем, объясняющая формирование особых свойств, структур, в результате взаимодействия простых агентов, а также подходы теорий игр, в рамках которых решения агентов опираются не только на внутреннюю логику, но и на действия других агентов. При формировании отношений агентов к новым технологиям будут использованы положения теории диффузии инноваций [12; 15].

Современные программные среды, такие как AnyLogic, позволяют на основе созданных моделей проводить сценарные имитационные расчеты, возможности детальной визуализации хода имитаций и фиксации параметров.

При моделировании процессов цифровизации в промышленности справедливо возникает вопрос о информационной базе и индикаторах, которые, с одной стороны, наиболее адекватно отражают процессы внедрения цифровых технологий, с другой стороны, имеют достаточную историю наблюдений. С. Г. Маричев справедливо отмечает, что в настоящее время цифровая экономика охватывает огромное количество технологий и способов их применения и включает искусственный интеллект, Интернет вещей, дополненную и виртуальную реальность, облачные вычисления, блокчейн, робототехнику и автономные транспортные средства [6]. В этих условиях дать оценку уровню цифровизации предприятия, опираясь на технические параметры, не представляется возможным.

Мы считаем, что показатели доли организаций, использующих отдельные виды ИКТ в общей численности, предлагаемые Росстатом, не отражают реальные масштабы цифровизации. На наш взгляд, этот показатель имеет скорее номинальный характер, поскольку любое современное предприятие, использующее компьютер и интернет может заявлять об использовании цифровых технологий. На наш взгляд, обобщающим показателем, наиболее адекватно отражающим масштаб и динамику внедрения цифровых технологий в экономике, мы считаем показатель Росстата «Затраты организаций на информационные и коммуни-

кационные технологии», который доступен в разрезе регионов и видов экономической деятельности. Исследование затрат на ИКТ в регионах РФ показывает их неустойчивую динамику, зависящую, в том числе, от специализации региона [5], от пространственных особенностей [2], от влияния информационных и финансовых мер поддержки.

При построении модели мы будем опираться на финансовые показатели, в том числе на затраты на ИКТ, считая, что они в значительной степени характеризуют уровень и динамику внедрения ИКТ в промышленную сферу, влияют на эффективность национальных экономик и отдельных регионов.

Результаты исследования. Ранее, в ходе создания модели, нами сформирована архитектура и выделены основные субъекты промышленного развития. Единым агентом являются региональные органы власти, которые имеют возможность перераспределять федеральные и региональные субсидии на цифровизацию, а также внешний мир, определяющий основные внешние социально-экономические параметры развития региона (рис. 1).

Каждое из реальных промышленных предприятий имеет свою пространственно-отраслевую специфику, специфику конкурентных стратегий и бизнес-модели, особенности ресурсных возможностей. Мы будем использовать лишь основные финансовые и отдельные технологические показатели.

При оценке перспектив создания моделей внедрения технологий в промышленности мы сталкиваемся с проблемой оценки отношений фирм, их руководителей к цифровизации. В случае реализации стратегии цифровизации реальные фирмы должны инвестировать в физические и информационные активы, нести затраты на обучение. При этом эффект является результатом рыночного процесса и не является прямым следствием понесенных расходов. Следовательно, решения фирм должны быть смоделированы как ограниченно рациональные правила, с учетом межфирменного взаимодействия, элементов обучения [8].

В подобных моделях в качестве агентов могут быть выбраны отрасли и отдельные производители, домашние хозяйства, органы власти, внешний мир в целом, трудовой коллектив, теневой сектор, некоммерческие организации, банковский сектор и т. д. Свойства объекта для признания агентом – реактивность, проактивность, способность к обуче-



Рис. 1. Макромодель цифровизации промышленного комплекса /
Fig. 1. Macromodel of the industrial complex digitalization

нию, интеллект [4]. Мы считаем, что для модели в качестве множественного агента следует выбирать лишь те субъекты, которые имеют относительно сложные алгоритмы поведения и взаимодействия. Субъекты, которые действуют по простому алгоритму, можно не выделять из окружающей среды. Фактически (на данном этапе) в качестве агентов рационально моделировать лишь промышленные предприятия различных типов и масштаба, взаимодействующие с единым агентом, представляющим социально-экономическую среду, включая государство.

Агент-промышленное предприятие. В модели промышленность представлена искусственным сообществом, являющим собой совокупность предприятий видов деятельности, относящихся к промышленности. В качестве модельного региона мы берем Свердловскую область. Для формирования совокупности агентов-промышленных предприятий из региональной статистики (данные Управления Федеральной службы государственной статистики по Свердловской области и Курганской области, данные spark-interfax.ru) выделены базовые параметры (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Параметры промышленных организаций Свердловской области, 2020 г. /
Parameters of industrial organizations of the Sverdlovsk region, 2020

Показатель / Indicator	Всего / Total	В том числе: / Including:		
		добыча полезных ископаемых / Mining	обрабатывающие производства / Manufacturing industries	обеспечение электрической энергией, газом и паром / Provision of electric energy, gas and steam
Число предприятий и организаций, ед. / Number of enterprises and organizations, units	119138	514	10281	693
Оборот организаций, млн р. / Turnover of organizations, million rubles.	6629878	130674	2130924	367205
Среднегодовая численность работников организаций, тыс. чел. / Average annual number of employees of organizations, thousand people	1460	27,6	315,4	49,2
Основные фонды, млн р. / Fixed assets, million rubles	7944607	72971	1114380	724625

Окончание табл. 1

Показатель / Indicator	Всего / Total	В том числе: / Including:		
		добыча полезных ископаемых / Mining	обрабатывающие производства / Manufacturing industries	обеспечение электрической энергией, газом и паром / Provision of electric energy, gas and steam
Объем отгруженных инновационных товаров, работ, услуг, млн р. / Volume of shipped innovative goods, works, services, million rubles	185485	–	161144,1	5473,5
Сальдированный финансовый результат организаций, млн р. / Net financial result of organizations, million rubles	285747	39749,3	168909,8	11351,6
Сумма убытка организаций, млн р. / Amount of loss of organizations, million rubles	61131	1159,4	32275,8	3510
Удельный вес убыточных организаций, % / Share of unprofitable organizations, %	27,8	38,2	22,8	64,4
Расходы бюджета региона на национальную экономику, млн р. / Expenditures of the regional budget on the national economy, million rubles	54559			
Инвестиции в основной капитал, млн р. / Investments in fixed assets, million rubles	301834	8815,7	71034,2	21937,7

Искусственное сообщество будет состоять из трех групп предприятий, ориентированных на три промышленных вида деятельности. В модели за базовые условия мы взяли экономические показатели предприятий, основываясь на данных региона за 2020 г. Для сбережения вычислительных ресурсов количество предприятий каждого типа мы сократили в 100

раз. При этом, каждый агент будет обозначать 100 однотипных предприятий, иметь экономические параметры одного предприятия (табл. 2). При оценке макропараметров модели и размера мер по стимулированию мы будем учитывать необходимость 100-кратного увеличения параметров каждого агента.

Таблица 2 / Table 2

Параметры искусственного сообщества / Parameters of the artificial community

Показатель / Indicator	Обозначение в модели (если необходимо)	Добыча полезных ископаемых / Mining	Обрабатывающие производства / Manufacturing industries	Обеспечение электрической энергией, газом и паром / Provision of electric energy, gas and steam
Количество агентов, ед. / Number of agents, units	No	5	102	7
Оборот одного предприятия, млн р. / Turnover of one enterprise, million rubles	Turnover	261,3	208,9	524,6
Основные фонды одного предприятия, млн р. / Fixed assets of one enterprise, million rubles	FixedAssets	145,9	109,3	1035,2

Окончание табл. 2

Среднегодовая численность работников одного предприятия, чел. / Average annual number of employees of one enterprise, people	Employees	55	31	70
Сальдированный финансовый результат одного предприятия, млн р. / Net financial result of one enterprise, million rubles		79,5	16,6	16,2
Удельный вес убыточных организаций, % / Share of unprofitable organizations, %		38,2	22,8	64,4
Средняя годовая прибыль агента, млн р. / Average annual profit of the agent, million rubles	Profit			
Инвестиции в основной капитал одного предприятия, млн р. / Investments in the fixed capital of one enterprise, million rubles	Investments	17,6	7,0	31,3

Для создания совокупности агентов, в целях придания естественного разнообразия, средние значения параметров для каждого агента будут откорректированы в пределах 20 % с использованием случайных значений. В результате использования такого подхода сформированы характеристики совокупности из 114 агентов для загрузки в программную среду Anylogic. Одним из признаков агента будет принадлежность к соответствующему виду деятельности В, С, D в соответствии с классификатором ОКВЭД (ОК 029-2014). Среда Anylogic позволяет визуализировать предприятия, обозначить их текущее состояние цветом (рис. 3).

Агент-внешний мир представлен совокупностью федерального и региональных органов власти, финансовой, банковской системой. Для нашей модели актуальные параметры связаны, в первую очередь, с размерами программ финансирования цифровизации и информационным стимулированием внедрения цифровых технологий. На данном этапе значение этих параметров задается экзогенно на весь период моделирования. Изменение этих параметров позволяет отследить реакцию промышленности на отдельные действия государства по стимулированию цифровизации.

Сложность вызывает оценка реального объема субсидий государства промышленным предприятиям на проекты по цифровизации. Согласно установленным на 2021 г. объемам

финансирования Госпрограммы Свердловской области «Информационное общество Свердловской области до 2024 года», на цифровизацию будет потрачено более 2135 млн р. При этом в структуре программы большая часть средств направляется на создание и развитие информационной инфраструктуры, для государственного управления и в социальную сферу. В госпрограмме Свердловской области «Развитие промышленности и науки на территории Свердловской области до 2024 года» объем финансовой поддержки не обозначен. В Стратегии промышленного и инновационного развития Свердловской области на период до 2035 г. цифровизация рассматривается как «инструмент модернизации отраслей реального сектора экономики, создания условий для появления новых, еще не созданных в Российской Федерации передовых промышленных технологий», при этом размеры поддержки не утверждаются. В Стратегии в области цифровой трансформации отраслей экономики, социальной сферы и государственного управления Свердловской области процесс цифровой трансформации ограничивается развитием Государственной информационной системы промышленности и вовлечением в ее деятельность региональных промышленных предприятий.

Реальные проекты по цифровизации промышленности реализуются в рамках деятельности Фонда развития промышленности (ФРП),

который предоставляет льготные займы под 1 % и 3 % годовых. Программа предназначена для финансирования проектов, направленных на внедрение цифровых и технологических решений, призванных оптимизировать производственные процессы на предприятии. ФРП в 2020 г. поддержал два проекта по цифровизации на сумму около 200 млн р. Региональный фонд развития промышленности за 2020 г. проекты по цифровизации промышленных предприятий не поддерживал.

Основная поддержка, связанная с льготным кредитованием в регионе, производится в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 5 декабря 2019 г. №1598. По данным Минпромторга РФ (digital.gov.ru), 85 регионов осуществляют 1 990 проектов по цифровой трансформации промышленности на общую сумму 430,6 млрд р. (56,9 млрд р. – средства бюджетов). Исходя из этих параметров, можно говорить, что поддержка цифровой трансформации в рамках региона со стороны бюджетов может исчисляться сотнями миллионов рублей. Средняя ставка банковского кредитования на начало 2022 г., по данным ЦБ РФ (cbr.ru), составляет около 11 %, средний курс доллара США по итогам 2021 г. составляет 73,6 р.

Моделирование цифровизации. При моделировании процесса цифровизации предприятия мы исходим из ряда предположений:

- бюджет агента-предприятия на цифровизацию формируется из прибыли за год, накопленной прибыли за предыдущие годы и субсидий от органов власти;
- стоимость внедряемой цифровой технологии связана с количеством работающих (рабочих мест) на предприятии;
- процесс цифровизации имеет определенную длительность, связанную с масштабом предприятия, количеством рабочих мест;
- переход к стратегии цифровизации зависит от мнения руководства и включает вероятностный элемент;
- завершение процесса цифровизации приводит к повышению экономических показателей предприятия;
- в качестве факторов, влияющих на принятие решения о начале цифровизации, принимается масштаб предприятия, финансовое состояние, влияние государства [8], а также влияние предприятий, реализовавших проекты по цифровой трансформации.

Мы будем рассматривать двухэтапный переход к процессу цифровизации. На первом этапе промышленные предприятия на каждом цикле работы модели могут выбрать переход к стратегии цифровизации, принимая в расчет действия других агентов промышленных предприятий и общий уровень цифровизации в регионе $DigLevel$ и исходя из вероятности принятия стратегии руководителем предприятия $Tendency_i$, которая устанавливается исходя из результатов опроса мнений промышленных предприятий Свердловской области. Логическая переменная $Strategy_i$ в модели отражает состояние принятия программы цифровизации (1)

$$Strategy_i = f(DigLevel, Tendency_i). \quad (1)$$

На втором этапе решение о старте проекта цифровизации принимается исходя из текущих финансовых возможностей конкретного предприятия $FinancialSources_i$, субсидиям со стороны государства $Subsudies_i$. Переменная $Decision_i$ также имеет логическое значение (2).

$$Decision_i = f(FinancialSources_i, Subsudies_i). \quad (2)$$

В среде Anylogic принятие решений реализовано в виде диаграммы состояний, от «предцифрового» этапа, через принятие стратегии по цифровизации, старта проекта цифровизации к трансформированному состоянию (рис. 2).

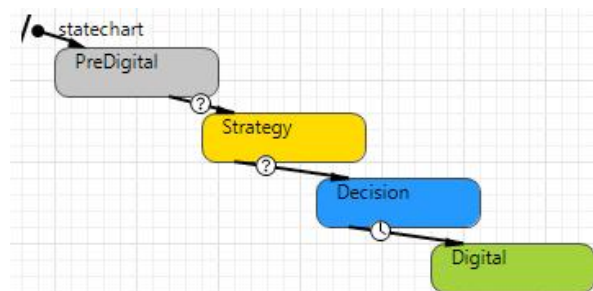


Рис. 2. Диаграмма состояний агента-промышленного предприятия / Fig. 2. State diagram of an agent-industrial enterprise

Вероятность принятия стратегии руководителем предприятия. Опрос регионального Союза промышленников и предпринимателей Свердловской области (sospr.ru) показал, что лишь у 26,8 % предприятий разработана комплексная программа цифровизации; 24,7 % планируют разработку подоб-

ных программ, в 32 % компаний реализуется только пакет пилотных проектов по внедрению отдельных цифровых решений. Это позволяет сформировать вероятностные характеристики факторов, влияющих на принятие решений. Исходя из анализа опроса, примем начальную долю фирм, принявших стратегическое решение о цифровизации для каждого масштаба в размере 26,8 %.

Модель должна включать, помимо индивидуальных параметров, влияние других фирм [11] – эффект коллективной диффузии технологий. Доля фирм, принявших решение о цифровизации, будет увеличиваться под влиянием межфирменных взаимодействий и соответствующего увеличения общего уровня цифровизации. В модели фирма по прохождению цифровизации отправляет всем агентам соответствующее «сообщение». В случае получения такого сообщения предприятие с коэффициентом вероятности k_{dig} (начальное значение 0,1) принимает решение о принятии стратегии цифровизации. Этот процесс в модели отражает реальное взаимодействие фирм и обмен результатами цифровизации, а коэффициент k_{dig} отражает интенсивность реакции на цифровизацию других фирм.

Финансовые возможности. Одним из главных барьеров 22 % участников опроса называют недостаток финансовых ресурсов (исследование российской компании Strategy Partners). Сложность для моделирования представляет оценка затрат на цифровизацию. Здесь мы взяли условную стоимость цифровизации одного рабочего места, ориентируясь на стоимость современных систем управления производством (в качестве условного значения нами принята стоимость 1С Предприятие 8. MES Оперативное управление производством – 200 тыс. р.) Общая стоимость для каждого предприятия будет рассчитана исходя из количества занятых. На данном этапе мы не берем в расчет затраты на физические активы (машины и оборудование), затраты на обучение, затраты на интеграцию, поддержку, обновление и др.

В модели действие государства реализуется в виде предоставления субсидий на цифровизацию. Алгоритм предоставления субсидии в модели основан на софинансировании и безвозвратности. При условии, что у компании есть половина средств на цифровизацию, бюджет предоставляет субсидию в размере половины общего бюджета на циф-

ровизацию на безвозвратной основе. Общий ежегодный объем субсидий ограничивается изначально.

В модели агент, находящийся в состоянии принятого стратегического решения о цифровизации рассчитывает предполагаемую стоимость проекта для своего предприятия, далее он, используя накопленные средства, кредитные ресурсы с установленной кредитной ставкой и государственные субсидии, начинает реализовать проект цифровизации. Прибыль предприятия за год не распределяется, а аккумулируется в переменной *accumulatedFunds*. Убыточные предприятия проекты цифровой трансформации не реализуют.

Эффекты цифровизации. Исходя из используемого опроса, руководители предприятий предполагают, что цифровизация может дать бизнесу новые конкурентные преимущества: рост производительности и снижение операционных затрат. Обзор аналитических материалов в качестве эффекта цифровизации для модели позволяет принять рост объема производимой продукции и рост прибыли на 10 %.

Анализ открытых данных показывает, что сроки внедрения сложных информационных систем для среднего предприятия (не более 250 работающих) составляют около 18 месяцев. Сроки зависят от сложности самой системы и размеров компании (от 6 месяцев до 5 лет). Для модели принимаем расчет срока в 6 месяцев плюс 1 месяц на каждые 20 работающих.

Логика модели считается нами начальной, отражающей основные закономерности изучаемого явления, которая должна быть откорректирована на ретроспективных данных в среде Anylogic.

Рабочее пространство выполнения модели в Anylogic включает область визуализации предприятий, состояние, которое обозначено цветом. Общее количество предприятий в каждом состоянии отражается на графике на пятилетней шкале. В нижней части окна находятся графики текущей общей прибыли предприятий региона, общих затрат предприятий на цифровизацию и размер выделяемых субсидий (рис. 3).

В ходе выполнения модели доступны к отслеживанию на шкале времени любые параметры, например, такие как объемы производства промышленных предприятий региона, совокупный финансовый результат, налоговые



Рис. 3. Рабочая область выполнения модели в среде Anylogic /
Fig. 3. Working area of the model execution in Anylogic environment

поступления, затраты предприятий на цифровизацию, изменение объема и обновление основных средств, инвестиции, распределение государственного (регионального) бюджета в области стимулирования цифровизации и др.

Заключение. Созданный вариант модели является начальным, но уже позволяет в результате проведения сценарных имитаций оценивать значимость факторов, влияющих на интенсивность цифровизации – увеличение размера субсидий на цифровизацию, учет масштаба предприятий, отраслевых особенностей и т. д. На графике динамики цифровизации можно заметить всплески, которые повторяются циклически, они связаны с массовыми сообщениями об успешных проектах цифровизации, предоставлением субсидий. Такие нелинейные эффекты представляют собой своеобразные волны цифровизации и отражают важность информационного воздействия на руководителей промышленных предприятий.

Реализуемая модель опирается на реальные параметры промышленного комплекса Свердловской области и после калибровки может иметь прикладное значение. Следующим этапом должна стать доработка модели, усложнение алгоритмов принятия решений, учет новых значимых факторов, коррекция параме-

тров на основе построения ретроспективного прогноза.

В качестве дополняемых элементов могут выступить модели поведения фирм по поводу внедрения инноваций (агрессивные, пассивные, оптимизаторы, последователи и т. д.) [8; 15], развитие возможностей банковского и иного кредитования, дифференцированная поддержка отдельных отраслей, субсидирования не только потребителей, но и производителей средств цифровизации [14], возможностей нефинансового (например, информационного) стимулирования цифровизации со стороны государства, внешнего взаимодействия, усложнение структуры и стоимости трансформационного перехода (ПО, оборудование, обучение, обслуживание и т. д.), детализация оценки социальных, технологических, финансовых [1] последствий цифровизации, применение нейронных сетей, экспертных систем, нечеткой логики для моделирования принятия решений о цифровизации [3] и др.

Созданная модель предназначена для реалистичного моделирования поведения промышленных предприятий в области цифровизации. При этом, с помощью модели можно получить количественные оценки эффекта от поддержки процессов цифровизации со стороны государства. Спецификой модели, на

наш взгляд, является реализация процессов информационного обмена между фирмами, использование элементов ограниченной раци-

ональности в поведении фирм, учет временных лагов во внедрении цифровых технологий и разнообразия промышленных предприятий.

Список литературы

1. Акиншин А. А., Кузнецова О. И., Хачатрян Н. К. Имитационная модель российского общества. Создание и анализ виртуальной популяции // *Искусственные общества*. 2020. Т. 15, № 4. DOI: 10.18254/S207751800012620-1.
2. Арженовский С. В., Сунтура Л. Экономико-статистический анализ структуры региональных затрат на информационные и коммуникационные технологии // *Экономический анализ: теория и практика*. 2014. № 28. С. 10–14.
3. Бахтизин А. Р. Агент-ориентированные модели экономики. М.: Экономика, 2008. 279 с.
4. Кислицын Е. В. Разработка архитектуры агентной имитационной модели конкурентоспособности промышленного предприятия // *Вестник Челябинского государственного университета*. 2020. № 10. С. 129–136.
5. Кузнецов Ю. А., Перова В. И., Семиков Д. С. Информационные и коммуникационные технологии как фактор развития цифровой экономики // *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Социальные науки*. 2017. № 4. С. 38–47.
6. Маричев С. Г. Роль государства в цифровой трансформации национальной экономики в России // *Искусственные общества*. 2020. Т. 15, № 4. DOI: 10.18254/S207751800012641-4.
7. Alsufyani N., Gill A. Q. Digitalisation performance assessment // *A systematic review. Technology in Society*. 2022. Vol. 68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101894>.
8. Ballot G., Taymaz E. Technological change, learning and macro-economic coordination: An evolutionary model. Текст: электронный // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 1999. vol. 2. no. 2. URL: <https://www.jasss.org/2/2/3.html> (дата обращения: 12.06.2022).
9. Bonabeau E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. Текст: электронный // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2002. № 99. 3. P. 7280-7287. URL: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.082080899> (дата обращения: 12.06.2022).
10. Fernández-Portillo A., Almodóvar-González M., Sánchez-Escobedo V. C., Coca-Pérez J. L. The role of innovation in the relationship between digitalisation and economic and financial performance. A company-level research // *European Research on Management and Business Economics*. 2022. Vol. 28, Issue 3. DOI: [org/10.1016/j.iedeen.2021.100190](https://doi.org/10.1016/j.iedeen.2021.100190).
11. Haag G., Liedl Ph. Modelling and Simulating Innovation Behaviour within Micro-based Correlated Decision Processes. Текст: электронный // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2001. vol. 4, no. 3. URL: <https://www.jasss.org/4/3/3.html> (дата обращения: 12.06.2022).
12. Kiesling E., Günther M., Stummer C. Agent-based simulation of innovation diffusion // *A review. Cent Eur J Oper Res* 20, 2012. P. 183–230. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10100-011-0210-y>.
13. Squazzoni F., Boero R. Economic Performance. Inter-Firm Relations and Local Institutional Engineering in a Computational Prototype of Industrial Districts. Текст: электронный // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2002. Vol. 5, no. 1. URL: <https://www.jasss.org/5/1/1.html>. (дата обращения: 12.06.2022).
14. Sun X., Liu X., Wang Yu., Yuan F. The effects of public subsidies on emerging industry: An agent-based model of the electric vehicle industry // *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, Vol. 140. P. 281–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.12.013>.
15. Zhangqi Zh., Zhuli Ch, Lingyun H. Technological innovation, industrial structural change and carbon emission transferring via trade // *An agent-based modeling approach, Technovation*. 2022. Vol. 110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2021.102350>.

References

1. Akinshin A. A., Kuznetsova O. I., Khachatryan N. K. *Iskusstvennye obshestva* (Artificial societies), 2020, vol. 15, no 4. DOI: 10.18254/S207751800012620-1
2. Arzhenovsky S.V., Suntura L. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika* (Economic analysis: theory and practice), 2014, no. 28, pp. 10–14.
3. Bahtizin A. R. *Agent-orientirovannye modeli ekonomiki* (Agent-oriented models of the economy). Moscow: Ekonomika, 2008. 279 p.
4. Kislicyn E. V. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta* (Bulletin of the Chelyabinsk State University), 2020, no. 10, pp. 129–136.

5. Kuznetsov Yu. A., Perova V. I., Semikov D.S. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta* (Bulletin of the Nizhny Novgorod University), 2017, № 4, pp. 38–47.
6. Marichev S. G. *Iskusstvennye obshestva* (Artificial societies), 2020, vol. 15, no. 4. DOI: 10.18254/S207751800012641-4.
7. Alsufyani N., Gill A. Q. *A systematic review, Technology in Society* (A systematic review, Technology in Society), 2022, Vol. 68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101894>.
8. Ballot G., Taymaz E. *An evolutionary model Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (An evolutionary model Journal of Artificial Societies and Social Simulation), 1999. vol. 2. no. 2. Available at: <https://www.jasss.org/2/2/3.html> (date of access: 06/12/2022). Text: electronic.
9. Bonabeau E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems 2002 Proceedings of the National Academy of Sciences. 99/3. Pp. 7280–7287. Available at: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.082080899> (date of access: 06/12/2022). Text: electronic.
10. Fernández-Portillo A., Almodóvar-González M., Sánchez-Escobedo V. C., Coca-Pérez J. L. *European Research on Management and Business Economics* (European Research on Management and Business Economics), 2022, vol. 28, Issue 3, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iemeen.2021.100190>.
11. Haag G., Liedl Ph. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (Journal of Artificial Societies and Social Simulation), 2001, vol. 4, no. 3. Available at: <https://www.jasss.org/4/3/3.html> (date of access: 06/12/2022). Text: electronic.
12. Kiesling E., Günther M., Stummer C. *A review. Cent Eur J Oper Res* (20A review. Cent Eur J Oper Res 20), 2012, pp. 183–230. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10100-011-0210-y>.
13. Squazzoni F., Boero R. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (Journal of Artificial Societies and Social Simulation). 2002, vol. 5, no. 1. Available at: <https://www.jasss.org/5/1/1.html> (date of access: 06/12/2022). Text: electronic.
14. Sun X., Liu X., Wang Yu., Yuan F. *Technological Forecasting and Social Change* (Technological Forecasting and Social Change), 2019, vol. 140, pp. 281–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.12.013>.
15. Zhangqi Zh., Zhuli Ch, Lingyun H. *An agent-based modeling approach, Technovation* (An agent-based modeling approach, Technovation), 2022, vol. 110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2021.102350>.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-28-01868
«Разработка агент-ориентированной модели сетевого промышленного комплекса
в условиях цифровой трансформации»

Информация об авторе

Information about the author

Коровин Григорий Борисович, канд. экон. наук, зав. сектором экономических проблем отраслевых рынков, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: промышленность, промышленная политика, цифровизация
korovin.gb@uiec.ru

Grigoriy Korovin, candidate of economic sciences, head of the sector; Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Yekaterinburg, Russia. Scientific interests: industry, industrial policy, digitalization

Для цитирования

Коровин Г. Б. Агент-ориентированная модель цифровизации промышленности региона // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 7. С. 104–114. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-7-104-114.

Korovin G. Agent-oriented model of the region's industry digitalization // Transbaikal State University Journal, 2022, vol. 28, no. 7, pp. 104–114. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-7-104-114.

Статья поступила в редакцию: 07.06.2022 г.
Статья принята к публикации: 01.07.2022 г.