DOI: 10.29141/2218-5003-2026-17-5-3 **EDN:** WLXAJA
JEL Classification: L22, C63, M21

Формирование структуры цифровой промышленной экосистемы: агент-ориентированный подход

Г.Б. Коровин
Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, РФ

Аннотация. Цифровая трансформация промышленности повышает актуальность исследования способов формирования структуры межфирменных взаимодействий. Сочетание прямых и платформенно-опосредованных связей усложняет координацию предприятий и управление развитием промышленного комплекса. Статья направлена на выявление механизмов становления межфирменных связей и динамики распространения цифровых платформ в промышленности. Методологическую основу составляет агент-ориентированное моделирование, позволяющее учитывать ограниченную рациональность, гетерогенность агентов и эндогенное формирование сети взаимодействий. Информационной базой послужили результаты имитационных экспериментов с агент-ориентированной моделью цифровой промышленной экосистемы при различных институциональных и поведенческих параметрах. В авторской модели формализован минимальный набор факторов, влияющих на становление структуры межфирменной кооперации: ограниченность поиска контрагентов, доверие, репутация и издержки переключения, а также роль платформы как механизма снижения информационных и транзакционных издержек. Сценарный анализ на основе имитационного моделирования показал, что распространение платформенного режима носит нелинейный, пороговый характер и сопровождается S-образной динамикой. Установлено, что издержки переключения определяют инерционность сети и темпы цифровизации, тогда как расширение поиска и снижение барьеров входа ускоряют распространение платформы, но повышают волатильность. Разные конфигурации параметров формируют качественно различные режимы – от устойчивого смешанного взаимодействия до ускоренной, но менее стабильной платформизации. Установлено, что снижение издержек переключения оказывает наиболее сильное влияние на темпы платформизации, тогда как ужесточение репутационного отбора повышает качество взаимодействий без увеличения волатильности. Научная новизна исследования заключается в интеграции микроуровневых поведенческих механизмов в модель макродинамики транзакционной сети. Практическая значимость связана с применением модели для разработки стратегий развития платформ и регулирования цифровизации промышленности.

Ключевые слова: цифровая промышленная экосистема; агент-ориентированное моделирование; цифровые платформы; ограниченная рациональность; издержки переключения; доверие; репутация; сценарный анализ.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-28-01921 «Разработка и оптимизация модели цифровой экосистемы промышленности на основе агент-ориентированного подхода» (https://rscf.ru/project/25-28-01921/).

Информация о статье: поступила 17 апреля 2026 г.; доработана 31 мая 2026 г.; одобрена 18 июня 2026 г.

Ссылка для цитирования: Коровин Г.Б. (2026). Формирование структуры цифровой промышленной экосистемы: агент-ориентированный подход // Управленец. Т. 17, № 5. С. 33–51. DOI: 10.29141/2218-5003-2026-17-5-3. EDN: WLXAJA.

Forming a transaction structure of digital industrial ecosystems: An agent-based approach

G.B. Korovin
Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Digital transformation in industry has heightened the importance of studying the mechanisms through which the structure of inter-firm interactions is framed. The combination of direct and platform-mediated linkages makes it difficult to coordinate enterprises and manage industrial complex development. The article reveals the mechanisms underlying the emergence of inter-firm linkages and the dynamics of digital platform diffusion in industry. Agent-based modelling forms the methodological core of the research as it integrates bounded rationality, agent heterogeneity, and the endogenous nature of network. The study draws on the results of simulation experiments performed with an agent-based model of a digital industrial ecosystem under varying institutional and behavioural parameters. The model formalizes a minimal set of factors that shape the structure of inter-firm cooperation, namely limited search for partners, trust, reputation, and switching costs, as well as the role of platforms as mechanisms for reducing information and transaction costs. Scenario analysis based on simulation modelling demonstrates that platform diffusion exhibits nonlinear, threshold dynamics with an S-shaped pattern. Switching costs are found to determine network inertia and the pace of digitalization, while expanded search and lower entry barriers accelerate diffusion but increase volatility. Different parameter configurations generate distinct regimes, ranging from stable hybrid interactions to rapid but less stable platform adoption. Lower switching costs exert the strongest effect on the pace of platform adoption, while more stringent reputational screening enhances interaction quality without extra volatility. The contribution of the study lies in integrating micro-level behavioural mechanisms into the model of macro-level network dynamics. The results have practical implications for platform strategy and industrial digital policy.

Keywords: digital industrial ecosystem; agent-based modelling; digital platforms; bounded rationality; switching costs; trust; reputation; scenario analysis.

Funding: This research was supported by the Russian Science Foundation, grant no. 25-28-01921 "The development and optimization of an industrial digital ecosystem model based on an agent-based approach" (https://rscf.ru/project/25-28-01921/).

Article info: received April 17, 2026; received in revised form May 31, 2026; accepted June 18, 2026

For citation: Korovin G.B. (2026). Forming a transaction structure of digital industrial ecosystems: An agent-based approach. *Upravlenets / The Manager*, vol. 17, no. 5, pp. 33–51. DOI: 10.29141/2218-5003-2026-17-5-3. EDN: WLXAJA.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая трансформация промышленности сопровождается переходом от иерархических и линейных цепочек создания стоимости к сложным сетевым структурам взаимодействия, в рамках которых предприятия объединяются в цифровые промышленные экосистемы [Иванов, Шустова, 2020; Barykin et al., 2020; Гузь, Стефанова, 2025]. В отличие от традиционных производственных систем, где координация осуществляется через устойчивые вертикальные или горизонтальные связи, в экосистемной логике структура взаимодействий формируется эндогенно как результат децентрализованных решений множества экономических агентов, действующих в условиях ограниченной информации и неопределенности [Rochet, Tirole, 2003; Parker, Van Alstyne, Choudary, 2016]. Это делает ключевым вопрос о факторах, определяющих выбор режима взаимодействия и, как следствие, конфигурацию транзакционной сети.

Ключевую роль в данном переходе играют цифровые платформы, которые выступают не просто посредниками, а технологической инфраструктурой, обеспечивающей функционирование экосистем [Cutolo, Kenney, 2021]. Платформы формируют единое информационное и транзакционное пространство, в рамках которого осуществляется поиск контрагентов, координация сделок и распространение информации о технологиях и участниках. Таким образом, они изменяют базовые условия создания межфирменных связей, снижая издержки поиска и сопоставления альтернатив, расширяя доступное множество контрагентов и усиливая роль неформальных характеристик, таких как репутация.

В промышленном контексте эта трансформация имеет принципиальные особенности. В отличие от потребительских рынков, где взаимодействия носят преимущественно краткосрочный и стандартизированный характер, промышленные экосистемы характеризуются высокой степенью технологической взаимозависимости, ограниченной заменяемостью партнеров и значительными издержками переключения на других контрагентов. Это приводит к тому, что формирование и эволюция транзакционной сети определяются не только ценовыми факторами, но и поведенческими характеристиками агентов, включая доверие, накопленную репутацию и ограниченность информации об альтернативных решениях.

Таким образом, актуальным направлением исследования становится разработка подходов и моделей, объединяющих микроуровневые поведенческие механизмы: доверие, ограниченный поиск контрагентов и издержки переключения с анализом платформенно-опосредованных взаимодействий в рамках единой формализованной среды. Это направление может стать основой для управленческих решений, направленных на формирование и развитие цифровых платформ в промышленности, а также для выбора инструментов, стимулирующих участие предприятий в платформенных взаимодействиях.

Реализация подобных исследований требует подхода, позволяющего одновременно учитывать гетерогенность агентов, ограниченность информации и эндогенное формирование сети связей. Одним из таких подходов является агент-ориентированное моделирование (АОМ) [Tesfatsion, 2006; Макаров, Бахтизин, Эпштейн, 2022; Демиров, 2024]. С его помощью можно моделировать экономические системы с учетом сетевого характера взаимодействий, особенностей поведения отдельных агентов и возникающих при этом макроэкономических эффектов.

Разрабатываемый подход ориентирован прежде всего на цифровые платформы промышленной кооперации, в рамках которых предприятия ищут поставщиков, подрядчиков и производственных партнеров в условиях неполной информации и ограниченной наблюдаемости качества взаимодействий. Подобные механизмы характерны для промышленных плаформ, платформ управления цепочками поставок и цифровых экосистем производственной кооперации.

Целью нашей работы стала разработка агент-ориентированной модели формирования транзакционной структуры цифровой промышленной экосистемы, позволяющей анализировать управляемость параметров платформы и оценивать их влияние на развитие промышленной экосистемы. Для достижения поставленной цели в исследовании решаются следующие задачи:

- формализация механизма выбора контрагентов и взаимодействия предприятий через спецификацию функции полезности, а также моделирование роли платформы как посредника с учетом ограниченной рациональности, доверия, репутации и издержек переключения;
- разработка структуры агент-ориентированной модели, описывающей формирование и эволюцию сети межфирменных взаимодействий под влиянием поведенческих и институциональных факторов;

• составление набора сценариев и проведение имитационного моделирования с целью идентификации устойчивых режимов и параметрических зависимостей формирования транзакционной структуры.

Исследовательская гипотеза заключается в том, что параметры ограниченности поиска, различия в уровне доверия и величина издержек переключения выступают ключевыми детерминантами как структуры транзакционной сети, так и темпов развития платформ и привлечения их участников.

С прикладной точки зрения модель может рассматриваться как инструмент анализа последствий управленческих решений в сфере развития цифровых платформ и межфирменной кооперации. В частности, она позволяет оценивать влияние управляющих параметров платформы (уровень комиссий, барьеры подключения, требования к репутации и доступность поиска контрагентов) на структуру взаимодействий между промышленными предприятиями и темпы распространения цифровых платформ.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Агент-ориентированное моделирование в экономике. В отличие от неоклассических моделей, основанных на полных данных и равновесных предпосылках, АОМ позволяет учитывать ограниченную рациональность, адаптивное поведение и институциональную неоднородность [Tesfatsion, 2006]. Классические работы в данной области демонстрируют, что даже простые поведенческие правила на микроуровне способны порождать сложную макродинамику, включая формирование рынков, неравновесные состояния и циклические процессы [Epstein, Axtell, 1996]. Методологически агент-ориентированный подход позволяет учитывать гетерогенность агентов, локальность взаимодействий и структуру пространства, что делает его применимым к моделированию сложных экономических систем [Tsyplakov, Melnikova, Ibragimov, 2021]. Развитие АОМ в экономике привело к появлению моделей финансовых рынков, рынков труда и производственных систем, в которых особое внимание уделяется сетевой структуре взаимодействий и эндогенной динамике связей.

Исследования подчеркивают высокий потенциал АОМ для анализа промышленной динамики и инновационных систем, где взаимодействие агентов носит нелинейный характер и зависит от институциональной среды [Dosi, Fagiolo, Roventini, 2006]. Вместе с тем, несмотря на значительный прогресс, многие модели остаются абстрактными и недостаточно учитывают специфику цифровых платформ и транзакционных сетей. Трудности, связанные с экосистемными моделями, возникают при объединении разнородных алгоритмов и, как правило, обусловлены их сложностью [Luus, Robinson, Deadman, 2013].

Одной из важных работ, явно связывающих АОМ с цифровой промышленной экосистемой, является статья [Asad et al., 2023], где авторы в качестве инструмента управления промышленными системами используют комбинацию агент-ориентированного моделирования и цифровых двойников отдельных промышленных объектов. Предложена концептуальная модель, позволяющая выбирать управляющие воздействия для сложных промышленных систем. При этом цифровая платформа не выделяется как отдельный агент, а представляется как часть инфраструктуры.

В исследовании [Demartini, Tonelli, Bertani, 2018], посвященном интеграции АОМ и системной динамики, показано, как социальные факторы (доверие, структура сетей, распространение знаний) влияют на формирование сетевых симбиотических связей между промышленными агентами. Промышленные системы демонстрируют нелинейную динамику – после порогового уровня доверия и информационной прозрачности экосистема переходит в режим устойчивого развития.

В ряде работ по АОМ в промышленности акцент делается на моделировании институциональных и контрактных механизмов, связывающих участников экосистемы. Так, в статье [Summad et al., 2024] показано, что разные правила платформы (ранжирование, вознаграждение, открытость информационных систем) приводят к различным уровням участия агентов и количеству успешных кооперационных проектов, а устойчивость экосистемы зависит от технической инфраструктуры, институциональных условий и правил.

В ряде исследований агент-ориентированный подход используется для анализа промышленных платформ и сетей промышленного симбиоза, где онлайн-платформа рассматривается как механизм информационного посредничества, а раскрытие информации о потенциальных партнерах повышает экономическую результативность взаимодействий [Fraccascia, 2020]. В более поздней статье моделируется процесс принятия решений о подключении к платформе компаниями с учетом экономии транзакционных издержек, ожиданий и прошлого опыта [Mollica, Fraccascia, Nastasi, 2025].

Исследования производственных платформ также используют многоагентное моделирование для анализа поведения участников в цифровой среде. В. Чен с соавторами встраивают стратегии динамического ценообразования в многоагентную имитационную модель, что позволяет оценить адаптивное поведение сервисных провайдеров в конкурентной платформенной среде [Chen et al., 2026]. Близкое направление представлено моделями эволюции платформенных экосистем, где цифровая платформа рассматривается как среда динамического сопоставления спроса и предложения. С. Чжоу с соавторами разработали

модель эволюции платформенной экосистемы с динамическим предложением и сервисами согласования цены, учитывая взаимодействия между поставщиками услуг, платформами, сервисами и потребителями [Zhou et al., 2024].

В технологической литературе агентный подход также рассматривается как один из значимых инструментов моделирования и разработки цифровых экосистем, поскольку он позволяет учитывать автономность, гетерогенность, распределенность и способность компонентов к самоорганизации [Savaglio et al., 2020].

Несмотря на рост числа исследований, посвященных цифровым платформам и промышленным экосистемам, значительная часть существующих моделей либо рассматривают платформу как элементы инфраструктуры обмена, либо используют агрегированное описание взаимодействий без явной формализации микроуровневых механизмов выбора контрагентов. В результате недостаточно исследованными остаются процессы эндогенного формирования транзакционной структуры промышленной платформенной экосистемы.

В рамках данного исследования АОМ используется как инструмент формализации процессов становления транзакционной сети цифровой промышленной экосистемы. Это позволяет описать выбор контрагентов и режима взаимодействия как результат индивидуальных решений, принимаемых гетерогенными агентами в условиях ограниченной информации, а также учесть внутреннюю динамику структуры связей, возникающую под воздействием платформенных механизмов координации.

Экосистемы и цифровые платформы. Изучение экосистем в экономике отвечает общему направлению развития экономической теории, связанному с переходом от механистического взгляда на экономику к органическому, в рамках которого экономика рассматривается как неоднородная, неравновесная система, а экономические агенты – как относительно самостоятельные элементы. Цифровые платформы обеспечивают взаимодействие между различными группами пользователей, при этом ценность участия определяется числом других участников, что формирует сетевые эффекты [Rochet, Tirole, 2003; Глухов и др., 2021; Меденников, 2021]. А.Л. Иванов и И.С. Шустова [2020] определяют цифровую экосистему как взаимозависимую группу предприятий, людей и объектов, которые совместно используют цифровые платформы для взаимовыгодных целей, таких как коммерческая польза, инновации или общие интересы. О.Е. Каленов [2022] дает следующее определение этого понятия: «Цифровая экосистема – это цифровое пространство, построенное на базе одной или нескольких цифровых платформ и включающее в себя совокупность сервисов, которые позволяют пользователям (клиентам) удовлетворять разнообразные потребности в рамках реализации единого бесшовного процесса».

Роль цифровых платформ как координаторов взаимодействия и одновременно как самостоятельных экономических агентов, реализующих стратегии монетизации и управления пользовательской базой, отмечена и в других исследованиях [Armstrong, 2006; Клейнер, 2019]. Платформы способны существенно снижать транзакционные издержки поиска и координации, однако одновременно усиливают эффекты концентрации и могут приводить к доминированию отдельных игроков [Emery, 2025]. Современные работы акцентируют внимание на роли данных, алгоритмов и цифровой инфраструктуры в формировании конкурентных преимуществ платформ, а также на проблемах регулирования, связанных с их рыночной властью [Parker, Van Alstyne, Choudary, 2016].

В отличие от классической трактовки цифровых платформенных экосистем, ориентированной на взаимодействие между комплементерами (производителями) и потребителями [Hein et al., 2020], в промышленной экосистеме предприятия выступают как строго технологически взаимосвязанные контрагенты, формирующие сеть на основе вертикальных производственных и транзакционных цепочек и горизонтальных информационных взаимодействий. Цифровая платформа в экосистеме выступает как институционализированный механизм, компенсирующий информационные ограничения и влияющий на структуру образуемой промышленной экосистемы.

В более близких предлагаемому подходу исследованиях [Глухов и др., 2025] цифровая промышленная экосистема рассматривается как эволюционный этап развития промышленной экосистемы (в основе которой производственная кооперация, цепочки поставок и институциональные рамки) за счет применения цифровых инструментов для координации и автоматизации индустриальной кооперации: «Цифровая промышленная экосистема формируется через встраивание продвинутых цифровых инструментов ... в производственные и управленческие контуры».

Опираясь на существующие взгляды на цифровые экосистемы и учитывая специфику промышленных цифровых платформ, в нашем исследовании предлагаем цифровую промышленную экосистему понимать как систему взаимосвязанных промышленных предприятий и других заинтересованных агентов, формирующих сеть материальных и информационных взаимодействий в рамках продуктовых цепочек, координируемых с использованием цифровых платформ как институциональной инфраструктуры, что обеспечивает совместное создание, обмен и распределение экономической ценности между участниками.

В практическом смысле цифровая промышленная экосистема может объединять предприятия, поставщиков, потребителей, сервис-провайдеров, научные

и образовательные центры, которые взаимодействуют посредством цифровой платформы, обмениваясь финансовой, производственной, технологической, репутационной информацией через цифровые сервисы.

На данном этапе исследования реализуется первый механизм создания дополнительной ценности цифровыми промышленными платформами [Hein, 2020] – транзакционный, когда цифровые платформы выступают посредником, предлагают возможные транзакции либо предоставляют удобные инструменты поиска, с помощью которых пользователи могут находить партнеров для взаимодействия.

Факторы, влияющие на структуру межфирменных взаимодействий. Выбор факторов модели определялся не стремлением охватить все характеристики цифровых экосистем, а необходимостью формализации минимального набора механизмов, способных создавать структуру межфирменных взаимодействий. В связи с этим в модель были включены факторы, непосредственно влияющие на процесс выбора контрагентов, устойчивость связей и динамику распространения платформенного режима.

Согласно принципу ограниченной рациональности экономические субъекты принимают решения в условиях неполной информации и ограниченной видимости альтернативных вариантов [Tesfatsion, 2006; Giarlotta, Petralia, Watson, 2022]. Агент выбирает лишь среди лимитированного множества потенциальных контрагентов, в результате транзакционная сеть возникает как следствие локальных взаимодействий агентов, а не глобальной оптимизации [Jackson, 2008]. Фактор ограниченности круга обзора усиливает значимость посреднических механизмов, прежде всего цифровых платформ, которые расширяют доступное множество контрагентов и снижают издержки поиска. В рамках модели данный механизм формализуется через параметр «радиуса» поиска, определяющий долю популяции агентов, доступную для рассмотрения при выборе контрагента. Расширение этого параметра при использовании платформы позволяет анализировать влияние информационной доступности на структуру формируемой транзакционной сети и динамику цифровой промышленной экосистемы.

Фактор доверия и репутации включен в модель как значимый, поскольку в промышленной экосистеме межфирменные взаимодействия связаны с высокой неопределенностью, зависимостью от качества продукции, надежности поставок и необходимостью долгосрочной координации, вследствие чего доверие и накопленная репутация становятся механизмами снижения транзакционных рисков и стабилизации производственных связей [Granovetter, 1985; Williamson, 1985]. Эмпирические исследования показывают, что репутационные механизмы способствуют стабилизации межфирменных связей и повышают устойчивость кооперации, особенно в условиях неполной информации и ограниченной наблюдаемости качества взаимодействий [Blut et al., 2016].

Издержки переключения рассматриваются как значимый фактор инерционности транзакционной структуры. В промышленной экосистеме смена контрагента сопровождается затратами на перенастройку производственных процессов, адаптацию логистики, интеграцию информационных систем нового партнера, что формирует инерционность межфирменных связей и влияет на темпы перестройки транзакционной сети [Farrell, Klemperer, 2007; Blut et al., 2016]. Таким образом, доверие и издержки переключения выступают взаимодополняющими механизмами, одновременно снижающими неопределенность и ограничивающими динамику перестройки сети взаимодействий.

Цифровая платформа в модели выполняет роль институционального механизма координации, снижающего издержки поиска и взаимодействия между участниками [Rochet, Tirole, 2003; Hein et al., 2020]. Платформа расширяет доступное множество контрагентов, обеспечивает инфраструктуру транзакций и формирует правила доступа участников к взаимодействию. Тем самым она влияет не только на интенсивность связей, но и на саму структуру сети межфирменных отношений.

Совокупность указанных факторов позволяет воспроизводить основные механизмы формирования транзакционной сети цифровой промышленной экосистемы. В рамках модели доверие, репутация и издержки переключения включаются в функцию полезности при выборе контрагента, что позволяет одновременно учитывать склонность агентов к сохранению устойчивых связей, влияние неопределенности и возможность перестройки сети. При этом текущая версия модели представляет базовую конфигурацию и допускает дальнейшее расширение состава факторов и механизмов, включая более детальный учет технологической совместимости, отраслевой специализации, пространственных ограничений и более сложных институциональных механизмов регулирования.

Проблема эмпирической параметризации АОМ. Эмпирическая параметризация поведенческих реакций агентов в АОМ является сложной задачей, связанной с необходимостью количественного описания процессов принятия решений и факторов, влияющих на него.

В существующих исследованиях для калибровки моделей используются методы поведенческой экономики, включая экспертные оценки, опросы, эксперименты и анализ данных, позволяющие определить диапазоны параметров и структуру поведенческих зависимостей [Smajgl et al., 2011].

В частности, применяются экспертные методы, концептуальное картирование и фокус-группы, а также

опросы и интервью, выявляющие предпочтения, восприятие риска и доверие агентов [Harrison, List, 2004]. В последние годы особое внимание уделяется использованию больших данных, расширяющих возможности калибровки и валидации моделей на основе наблюдаемого поведения [Smajgl et al., 2011; Yang et al., 2017]. Вместе с тем, несмотря на развитие указанных подходов, эмпирическая параметризация остается ограниченной, особенно в отношении промышленных экосистем, где данные о межфирменных взаимодействиях носят фрагментарный характер. В связи с этим в данном исследовании модель носит концептуальный характер, а параметры задаются в относительных величинах, что позволяет сосредоточиться на определении качественных закономерностей и сравнительном анализе сценариев.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ

Общая логика агент-ориентированной модели. Разрабатываемая модель основана на подходе АОМ, в рамках которого экономическая система рассматривается как совокупность гетерогенных агентов, взаимодействующих в условиях ограниченной рациональности и неполной информации. В отличие от равновесных моделей структура взаимодействий в системе не задается экзогенно, а формируется эндогенно как результат решений агентов.

Динамика системы определяется итеративным процессом, в рамках которого агенты наблюдают среду, выбирают стратегии взаимодействия, осуществляют транзакции и адаптируют свое поведение на основе полученного опыта. Такой подход позволяет учитывать эффекты нелинейности, эмерджентности и сетевой зависимости, характерные для цифровых промышленных экосистем. Ключевой особенностью модели является фокус на формировании транзакционной сети: выбор контрагентов, установление и разрыв связей, а также переход между прямыми и платформенно-опосредованными взаимодействиями. Модель в целом направлена на объяснение механизмов создания структуры экономических связей на микроуровне.

В текущей версии модели большинство параметров задано в безразмерной форме, к их числу относятся показатели доверия, репутации, издержек переключения, весовые коэффициенты функции полезности, доля платформенной комиссии и целевой уровень цифровизации, интерпретируемые как индексы, доли или относительные оценки в ограниченных диапазонах. При этом такие переменные, как производственная мощность и выручка, трактуются не как строго натуральные или денежные величины, а как условные показатели масштаба экономической деятельности, необходимые для сопоставления сценариев и выявления структурных закономерностей. Назначение модели состоит в формализации ключевых механизмов формирования сети цифровой промышленной экосистемы и анализе качественных эффектов изменения параметров.

Пространство взаимодействий (институциональный и транзакционный слои). Среда модели представлена в виде трех взаимосвязанных слоев – институционального, транзакционного и информационного, что позволяет учитывать правила поведения, структуру взаимодействий и потоки информации в цифровой экосистеме [Hein et al., 2020; Madanaguli et al., 2023].

Институциональный слой задает совокупность формальных и неформальных правил, в рамках которых принимаются решения агентов. В модели он задается параметрами, непосредственно встроенными в алгоритмы поведения агентов и платформы:

- предельные границы транзакционной комиссии платформы;
- предельные границы платы за подключение, влияющие на стимулы входа агентов на платформу;
- целевой уровень цифровизации, используемый платформой для адаптации тарифной стратегии и регулирования привлечения участников.

Транзакционный слой представляет динамическую сеть взаимодействий между агентами, где узлы соответствуют предприятиям и платформам, а связи – экономическим транзакциям. Топология сети формируется эндогенно в результате решений агентов, что соответствует представлению экономики как сложной адаптивной системы [Jackson, 2008]. В модели выделяются два типа транзакций: прямые (с более высокими издержками поиска и переключения, но большей ролью доверия) и платформенно-опосредованные (сниженные издержки поиска и расширенный доступ к контрагентам). Транзакционный слой представлен параметрами, определяющими структуру сети и механизм выбора контрагентов:

- максимальное число партнеров;
- производственная мощность, определяющая объем транзакций;
- цена, влияющая на полезность взаимодействия;
- выручка, отражающая результат транзакций;
- издержки переключения, формирующие инерционность связей;
- веса критериев выбора, определяющие структуру функции полезности;
- порог (издержки) замещения партнера, задающий условие изменения сети.

Эти параметры непосредственно участвуют в расчетах полезности, формировании и перераспределении связей, а также в выполнении транзакций.

Информационный слой обеспечивает агентов данными о контрагентах, ценах и репутации, снижая информационную асимметрию и поддерживая механизмы доверия. Его параметры отражают степень технологической и репутационной прозрачности, которая, как правило, выше в платформенной среде. Слой

в модели реализован через параметры, определяющие доступность информации и границы поиска:

- радиус поиска на рынке, ограничивающий локальное множество доступных контрагентов, просматриваемых промышленным агентом;
- радиус поиска на платформе;
- базовый уровень доверия, используемый как априорная оценка надежности при отсутствии полной информации;
- репутация, формируемая из истории транзакций и выступающая публичным сигналом качества контрагента.

Дополнительно информационный слой эндогенно формируется через функции поиска контрагентов и обновления репутации, что определяет доступность и параметры информации для принятия решений.

Взаимодействие слоев носит взаимозависимый характер: институциональные правила задают условия обмена, транзакции генерируют данные, а информационный слой обеспечивает их распространение и влияет на принятие решений (табл. 1). Такая архитектура позволяет описывать цифровую промышленную экосистему как сложную адаптивную систему, в которой макроструктура сети формируется эндогенно на основе микроуровневых взаимодействий [Hein et al., 2020; Mollica, Fraccascia, Nastasi, 2025].

Таким образом, трехслойная структура пространства взаимодействий обеспечивает эндогенное формирование и эволюцию транзакционной сети цифровой промышленной экосистемы как сложной адаптивной системы.

Популяции агентов (предприятия, платформы, регулятор). Модель включает три типа агентов: предприятия, платформу и регулятора. Такое представление позволяет описывать цифровую промышленную экосистему как систему, в которой структура взаимодействий формируется в результате решений производителей, посреднической платформы и внешних институциональных ограничений. Все агенты рассматриваются как дискретные автономные объекты, состояние которых обновляется на каждом шаге моделирования.

Предприятия составляют основную популяцию модели и рассматриваются как гетерогенные агенты, включенные в производственную структуру цифровой промышленной экосистемы. Выделяются четыре типа предприятий, соответствующие стадиям цепочки создания стоимости: добывающие, перерабатывающие, сборочные и промышленные потребители. Множество типов задается как $I = \{E, M, A, C\}$, а взаимодействия между предприятиями ограничены технологической совместимостью, отражающей структуру производственных цепочек. Допустимые взаимодействия задаются множеством $G = \{(E, M), (M, A), (A, C)\}$ – это означает, что выбор контрагента осуществляется только среди предприятий, продукция которых может быть использована в рамках текущего производственного процесса (1).

$$\Omega_i(t) = j \in \Omega_i(t) \mid (\tau_j, \tau_i) \in G, \quad (1)$$

где Ω_i – множество допустимых (технологически совместимых) контрагентов для агента i; j – индекс потенциального контрагента; τ_j, τ_i определяют положение соответствующих предприятий в производственной цепочке.

Состояние каждого предприятия задается набором параметров, отражающих его возможности, поведение и положение в сети взаимодействий. К таким параметрам относятся производственная мощность, интерпретируемая как доступный объем выпуска, цена продукции, определяющая экономическую привлекательность предприятия, и выручка, отражающая накопленный результат взаимодействий.

Поведенческие характеристики включают базовый уровень доверия, издержки переключения и индивидуальные веса критериев выбора контрагента. Эти параметры определяют структуру функции полезности и формируют различия в предпочтениях агентов. В рамках модели доверие интерпретируется как субъективная оценка надежности контрагентов, образу-

Таблица 1 – Структура взаимного влияния слоев модели цифровой экосистемы
Table 1 – Interactions between the layers of the digital ecosystem model

Слой	Институциональный	Транзакционный	Информационный
Институциональный	–	Задает ограничения тарифной политики платформ (комиссии, плата за подключение) и целевые ориентиры (уровень цифровизации), влияющие на выбор режима взаимодействия	Косвенно влияет на доступность информации через параметры платформ (например, условия подключения и участия)
Транзакционный	Формирует обратную связь через агрегированные результаты (распространение платформенных взаимодействий относительно целевого уровня)	–	Генерирует данные о взаимодействиях: выручку, частоту сделок и репутационные изменения агентов
Информационный	Определяет информационную базу для изменения институциональных правил	Определяет множество доступных контрагентов через радиус поиска и тем самым влияет на структуру сети	–

емая на основе предыдущего опыта взаимодействия и находящаяся в диапазоне [0; 1]. Информационные ограничения задаются радиусом поиска контрагентов на открытом рынке и через платформу, что отражает ограниченную доступность информации и неполноту наблюдаемого предприятием множества альтернатив. Дополнительно состояние предприятия включает репутацию, формируемую эндогенно на основе предыдущих взаимодействий и выступающую сигналом надежности. Репутация агента представляет динамический параметр, принимающий значения в диапазоне [0; 1], где более высокие значения соответствуют более надежным и устойчивым участникам взаимодействия. Репутация обновляется с учетом предыдущих взаимодействий и репутации связанных агентов.

В модели агенты интерпретируются как промышленные предприятия, участвующие в производственных цепочках и взаимодействующие как напрямую, так и через цифровую платформу. К ним могут относиться производственные компании, поставщики компонентов, сервисные и логистические организации, а также другие участники промышленной кооперации. Основными целями предприятий выступают поиск надежных контрагентов и снижение транзакционных издержек.

Платформа моделируется как специализированный посредник, координирующий взаимодействие между предприятиями. В текущей версии модели ее состояние описывается ограниченным набором параметров: размер комиссии с транзакции, плата за подключение, накопленная выручка, минимальный репутационный порог платформы. Последний параметр устанавливает минимально допустимый уровень репутации для участия в платформенном взаимодействии. Поведение платформы на данном этапе определяется адаптацией тарифной политики в пределах институционально заданных ограничений в зависимости от текущей доли подключенных участников при заданном заранее репутационном пороге входа на платформу. Тем самым платформа изменяет условия входа и стоимость платформенного взаимодействия, влияя на масштабы привлечения предприятий и на перераспределение транзакционных потоков.

Регулятор представлен в упрощенном виде и рассматривается не как самостоятельный агент, а как источник институциональных ограничений и целевых ориентиров развития цифровой экосистемы. Его функция заключается в задании допустимых диапазонов параметров платформенного взаимодействия, влияющих на поведение платформы и динамику распространения платформенного режима. К числу таких параметров относятся минимально и максимально допустимые уровни комиссии платформы, диапазон платы за подключение, а также целевой уровень цифровизации, интерпретируемый как желаемая доля предприятий, вовлеченных в платформенное взаимодействие. Дополнительно регулятор задает допустимые диапазоны ключевых параметров предприятий, включая уровень издержек переключения, чувствительность к цене и значимость немонетарных факторов (например, репутации). Это отражает институциональные и технологические ограничения среды, в рамках которых формируются поведенческие характеристики агентов. Воздействие регулятора в модели является косвенным: он не вмешивается в сделки напрямую, а задает рамки, в пределах которых платформа корректирует свою политику, а предприятия принимают решения о подключении.

Таким образом, популяционная структура модели построена на функциональном разграничении ролей и параметров, что создает основу для формализации правил поведения агентов и механики их взаимодействий. Изменение состояния всех типов агентов описывается общей функцией обновления:

$$X_i(t+1) = F(X_i(t), U_i(t), E(t)), \qquad (2)$$

где $X_i(t)$ – состояние агента в момент t; $U_i(t)$ – действие, выбранное агентом в момент t в соответствии с его поведенческими правилами; $E(t)$ – состояние внешней среды, включающее институциональные параметры, состояние платформы и действия других агентов. Данное представление задает общую формальную рамку модели и предполагает разнообразие алгоритмов поведения агентов и механизмов их взаимодействия.

Поведение агентов и механика взаимодействий. Ключевыми механизмами, определяющими динамику транзакционной сети в модели, выступают доверие, ограниченность поиска контрагентов и издержки переключения. Их совместное действие задает баланс между устойчивостью уже сложившихся связей и возможностью их изменения. В отличие от моделей с полной информацией, в рассматриваемой постановке предприятие принимает решения не по отношению ко всей совокупности потенциальных партнеров, а лишь в пределах доступного ему множества альтернатив. Это множество зависит от режима взаимодействия и определяется радиусом поиска, то есть долей доступной популяции, просматриваемой агентом.

Для агента i множество контрагентов, доступных на открытом рынке в момент времени t, задается как (1), но при подключении к платформе доступное множество расширяется $\Omega_i^{plat}(t) \supseteq \Omega_i(t)$. Таким образом, платформа в модели выполняет функцию институционализированного посредника, расширяющего пространство поиска и изменяющего условия выбора партнера.

Доверие в модели трактуется как индивидуальная характеристика агента, отражающая его базовую склонность к взаимодействию в условиях неопределенности. Репутация, напротив, относится к характеристикам потенциального контрагента

и формируется эндогенно на основе предшествующих взаимодействий. Если доверие выступает внутренним параметром оценки, то репутация представляет внешний сигнал надежности, доступный другим участникам системы. Присвоенные каждому агенту издержки переключения отражают затраты на замену действующего партнера и тем самым повышают инерционность сети, затрудняя разрыв уже установленных связей.

Общий цикл поведения агента в модели соответствует логике ограниченной рациональности и включает последовательность повторяющихся действий. На каждом шаге агент i формирует множество доступных контрагентов, оценивает полезность взаимодействия с ними, выбирает партнера и режим взаимодействия, осуществляет транзакцию и затем обновляет собственное состояние. В структурированном виде этот цикл может быть представлен следующим образом:

- формирование множества доступных потенциальных контрагентов;
- оценка полезности взаимодействия с контрагентом j в виде $U_{ij}(t)$;
- выбор конкретного партнера $\text{choice}_i(t)$;
- реализованное взаимодействие (транзакция) $\text{transaction}_{ij}(t)$;
- обновление состояние агента $X_i(t+1)$;
- решение о входе или выходе с платформы.

Оценка привлекательности контрагента в модели строится как взвешенная функция четырех факторов: цены, доверия, репутации и издержек переключения. Для агента i, рассматривающего контрагента j в режиме прямого взаимодействия, интегральная полезность задается выражением (3).

$$U_{ij}^{dir}(t) = -\alpha_p P_j(t) + \alpha_t T_i(t) + \alpha_r R_j(t) - \alpha_s S_{ij}(t), \quad (3)$$

где $P_j(t)$ – цена контрагента; $T_i(t)$ – уровень доверия агента i; $R_j(t)$ – репутация агента j; $S_{ij}(t)$ – издержки переключения; α – индивидуальные веса соответствующих факторов в процедуре выбора. Такая запись непосредственно соответствует реализованной в модели логике принятия решений: повышенная цена и издержки переключения снижают привлекательность альтернативы, тогда как доверие и репутация ее повышают. В режиме прямого взаимодействия агент осуществляет выбор из множества Ω_i , формируемого на основе локального окружения, ранее сложившихся связей и ограниченного случайного поиска. Уровень доверия зависит от накопленного опыта взаимодействий.

В платформенно-опосредованном режиме агент получает доступ к более широкому множеству контрагентов, однако взаимодействие сопровождается дополнительными издержками в виде комиссии платформы. Соответственно, полезность платформенного взаимодействия в этом случае может быть записана следующим образом:

$$U_{ij}^{plat}(t) = -\alpha_p(P_j(t) + F_p(t)) + \alpha_t T_i(t) + \alpha_r R_j(t) - \alpha_s S_{ij}(t), \quad (4)$$

где $F_p(t)$ – комиссионная составляющая платформенного взаимодействия. В данном случае платформа не устраняет полностью неопределенность, но расширяет пространство поиска и усиливает роль репутационных сигналов при выборе контрагента. Платформа влияет на полезность через добавление комиссии, при этом предполагает расширение доступного множества потенциальных контрагентов. Одновременно доступ к платформе может быть ограничен минимальным порогом репутации, что приводит к селекции участников и формированию более однородного по качеству сегмента взаимодействий.

Выбор конкретного партнера и добавление его в портфель осуществляются на основе сопоставления полезности доступных альтернатив:

$$\text{choice}_i(t) = \arg\max_{j \in \Omega_i^{adm}(t)} U_{ij}(t). \quad (5)$$

Если портфель контрагентов не заполнен, агент добавляет наиболее привлекательного контрагента. Если агент уже обладает набором действующих связей, замещение существующего партнера новым происходит лишь в том случае, если выигрыш в полезности превышает минимальный порог переключения (6).

$$U_{ij} - U_{ik} > \theta_i, j \in \Omega_i(t), \quad (6)$$

где j – лучший новый кандидат; k – наименее привлекательный из текущих партнеров; θ_i – индивидуальный порог замещения. Такое правило обеспечивает реалистичную инерционность сети и препятствует ее чрезмерно частой перестройке.

После выбора набора партнеров агент распределяет объем взаимодействий между ними пропорционально их относительной полезности. Веса связей нормируются таким образом, чтобы суммарный объем взаимодействий был распределен между контрагентами в зависимости от их привлекательности (7). Экономический результат взаимодействий выражается в изменении выручки участников.

$$w_{ij}(t) = \frac{e^{U_{ij}(t)}}{\sum_{k \in P_i} e^{U_{ik}(t)}}, \quad (7)$$

где $w_{ij}(t)$ – вес связи между агентом i и котрагентом j в момент времени t; P_i – множество доступных (рассматриваемых) контрагентов для агента i.

Механизм входа на платформу и выхода из нее определяется сравнением ожидаемой полезности альтернативных режимов взаимодействия. Агент принимает решение о подключении или отказе от использования платформы на основе разницы между полезностью платформенного и прямого взаимодействия с учетом издержек переключения и комиссии (субсидии) платформы за подключение. Формально это условие задается следующим образом: $U_i^{plat}(t) - U_i^{dir}(t) > C_{switch}$. По-

добная формула действует и для обратного перехода. Тем самым переход между режимами определяется как индивидуальными характеристиками агента, так и параметрами среды.

Обновление репутации носит адаптивный характер и учитывает структуру текущих связей. Репутация агента стремится к средневзвешенной репутации его партнеров, сохраняя при этом инерцию собственного состояния и стремление к базовому уровню (8).

$$R_i(t+1) = (1-\lambda)\, R_i(t) + \lambda(\alpha\, \overline{R}_i(t) + (1-\alpha)\, R^{base}), \quad (8)$$

где $R_i(t)$ – текущая репутация агента i в момент времени t, отражает накопленную оценку его надежности на основе прошлых взаимодействий; R^{base} – базовый уровень репутации; α – вес социального влияния партнеров; $\lambda \in (0, 1)$ – скорость обновления репутации, определяет, в какой степени новая информация влияет на репутацию; $\overline{R}_i(t)$ обозначает средневзвешенную репутацию партнеров агента, рассчитываемую по формуле, где в знаменателе репутация партнеров агента, взвешенная относительно веса связи, а в числителе сумма весов связей между агентом i и его партнерами:

$$\overline{R}_i(t) = \frac{\sum_{j \in N_i(t)} w_{ij}(t)\, R_j(t)}{\sum_{j \in N_i(t)} w_{ij}(t)}, \quad (9)$$

где w_{ij} – нормированный вес связи между агентами i и j; N_i – количество партнеров агента i.

Платформа корректирует свои тарифные параметры в зависимости от текущей доли подключенных предприятий, ориентируясь на целевой уровень. В основе алгоритма лежат два управляющих рычага: транзакционная комиссия и плата за подключение. Если текущая доля подключенных предприятий ниже целевого уровня, платформа находится в фазе привлечения участников и стремится снизить комиссию к нижней границе (в рамках заданных порогов). Если же целевая доля уже достигнута или превышена, платформа переходит в фазу монетизации и, наоборот, постепенно повышает комиссию к верхней допустимой границе. Плата за подключение может выступать как инструмент стимулирования входа, в том числе допуская отрицательное значение, то есть фактически представлять субсидию новому участнику. Такая динамика соответствует логике формирования экосистемы, в рамках которой на начальном этапе ключевой задачей является достижение минимально жизнеспособной конфигурации участников минимально жизнеспособной экосистемы, обеспечивающей воспроизводимость взаимодействий и дальнейшее масштабирование [Adner, 2017].

Завершающий этап цикла связан с обновлением состояний всех агентов. В текущей версии модели это обновление затрагивает прежде всего репутацию и структуру связей. Репутация агента корректируется на основе характеристик его текущих взаимодействий и сохраняет динамический характер, а сеть связей перестраивается в зависимости от результатов выбора и транзакций. В результате многократного повторения этого цикла макроструктура системы возникает эндогенно как следствие микроуровневых решений агентов. Это позволяет анализировать, при каких сочетаниях параметров система сохраняет преобладание прямых межфирменных связей, а при каких – смещается к платформенно-опосредованной конфигурации взаимодействий.

В рамках модели предприятия заинтересованы в расширении доступа к контрагентам, снижении транзакционных издержек, повышении устойчивости поставок и росте экономической эффективности взаимодействий. Платформа в свою очередь ориентирована на увеличение числа участников и объема транзакций, балансируя между темпами расширения экосистемы и параметрами монетизации. Для регулятора и других институциональных участников значимыми являются темпы цифровизации, устойчивость межфирменных связей и снижение фрагментации промышленного взаимодействия.

В прикладном аспекте предложенный подход может использоваться для исследования процессов цифровой координации в промышленных кластерах, цепочках поставок, отраслевых B2B-платформах и межфирменных производственных сетях. Предлагаемая модель не привязана к отдельной отрасли и представляет базовую конфигурацию, предназначенную для анализа общих закономерностей формирования транзакционной структуры цифровых промышленных экосистем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разрабатываемая агент-ориентированная модель направлена на выявление качественных закономерностей формирования транзакционной структуры цифровой промышленной экосистемы при варьировании ключевых поведенческих и институциональных параметров. Значения исходных и результирующих параметров носят относительный характер и интерпретируются в сравнительном, а не абсолютном смысле.

Сценарный анализ в статье используется не только как инструмент иллюстрации возможных режимов функционирования системы, но и как средство проверки формализованных гипотез о влиянии отдельных факторов на макродинамику сети. В отличие от описательного подхода, в рамках которого сценарии трактуются как альтернативные конфигурации параметров, в настоящем исследовании каждый сценарий интерпретируется как гипотеза. Параметры модели варьируются целенаправленно, чтобы изолировать действие отдельных факторов и оценить их вклад в формирование структуры взаимодействий (табл. 2). Рассматриваемые сценарии могут интерпретироваться как различные стратегии развития цифровых про-

мышленных платформ, включая снижение барьеров входа, расширение возможностей поиска контрагентов, изменение требований к надежности участников и управление издержками переключения.

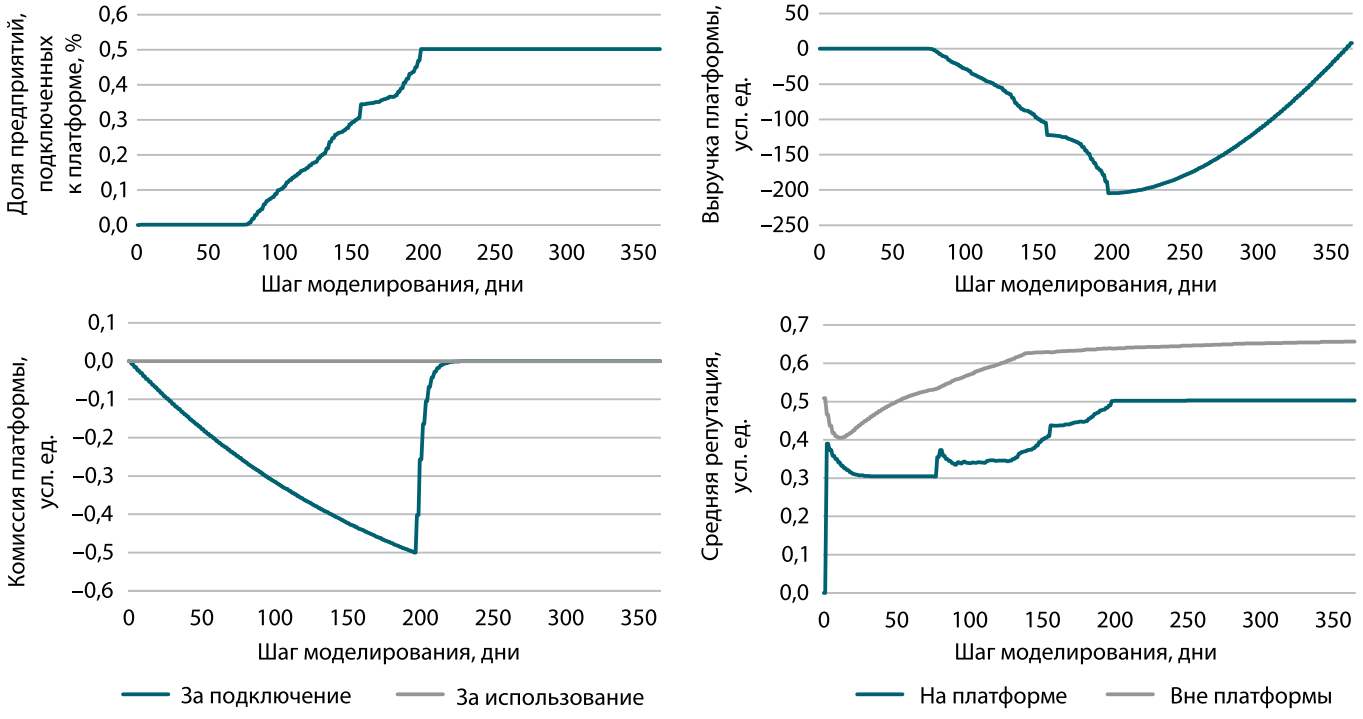
Гипотеза 1 (базовый сценарий). В умеренно сбалансированной промышленной экосистеме платформенный режим не обладает заранее заданным доминирующим преимуществом, поэтому распространение платформы будет носить эндогенный пороговый характер: доля подключенных предприятий достигнет целевого уровня с конечным временным лагом, но без чрезмерного роста волатильности. Иными словами, в базовом сценарии ожидается формирование смешанного режима, в котором прямые и платформенно-опосредованные взаимодействия сосуществуют (см. рис.). Графическая иллюстрация процесса моделирования приводится только для базового сценария, соответствующего гипотезе 1, который выступает в качестве контрольного режима. Для остальных гипотез результаты представлены в виде агрегированных количественных показателей, что обеспечивает сопоставимость сценариев и возможность сравнить ключевые эффекты (табл. 2).

Гипотеза 2 (селективная платформа). Повышение минимального репутационного порога для входа на платформу должно замедлить экстенсивное расширение платформы, но одновременно повысить среднее качество платформенного сегмента, выраженное в росте средней репутации подключенных к платформе участников. При этом вследствие более качественного состава участников возможно повышение транзакционной активности на платформе и, как следствие, сокращение периода ее окупаемости.

Гипотеза 3 (фрагментированная промышленная цепочка). Существенное сужение прямого поиска на открытом рынке при сохранении широкого платформенного поиска должно повышать относительную привлекательность платформы как инфраструктуры координации и компенсатора информационных ограничений. В этом случае следует ожидать ускорения достижения целевого уровня цифровизации за счет платформенного механизма поиска.

Гипотеза 4 (агрессивный рост платформы). Снижение комиссий и усиление субсидирования подключения должны обеспечить максимально быстрое расширение платформенного сегмента и быстрое достижение повышенной целевой доли подключенных предприятий. Одновременно такая стратегия должна сопровождаться повышением волатильности платформенного режима и ослаблением селективности состава участников за счет стимулирования массового подключения.

Гипотеза 5 (низкие издержки переключения). Снижение издержек переключения между платформой и открытым рынком, а также уменьшение порога смены партнера должно радикально ускорять перестройку сети взаимодействий, обеспечивая наиболее быстрое достижение целевого уровня цифровизации



197,0	Время достижения целевого уровня цифровизации	0,0014	Волатильность платформенного режима	361,0	Период окупаемости платформы

Динамика показателей в базовом сценарии моделирования

Dynamics of key indicators in the baseline scenario

Таблица 2 – Параметры сценариев для проверки гипотез имитационного моделирования
Table 2 – Scenario parameters for hypothesis testing in the simulation model

Параметр и его экономическая интерпретация	Базовый сценарий	Селективная платформа	Фрагментированная промышленная цепочка	Агрессивный рост платформы	Низкие издержки переключения
Целевая доля предприятий, вовлеченных в платформенное взаимодействие (от общего количества предприятий)	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5
Минимальный репутационный порог доступа к платформе	0,3	0,5	0,3	0,2	0,3
Количество потенциальных контрагентов на открытом рынке (доля от общего количества предприятий)	0,001–0,005	0,001–0,005	0,0001–0,001	0,001–0,005	0,001–0,005
Количество потенциальных контрагентов через платформу (доля от общего количества предприятий)	0,5–0,5	0,5–0,5	1,0–1,0	0,7–0,7	0,5–0,5
Комиссия платформы за проведение транзакций (доля от объема транзакции)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002
Комиссия за подключение (отрицательное значение означает субсидирование)	1 до –0,8	1 до –0,8	1 до –0,8	0 до –1,2	1 до –0,8
Диапазон издержек переключения между прямым и платформенным взаимодействием (условное значение)	0,25–0,4	0,25–0,4	0,25–0,4	0,25–0,4	0,05–0,1
Средние издержки смены контрагента (условное значение)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01

и сокращение периода самоокупаемости платформы. Вместе с тем снижение инерционности сети должно увеличивать чувствительность агентов к текущим различиям в полезности, что будет проявляться в росте волатильности платформенного режима.

Параметры сценариев в нашем исследовании не являются результатом прямой эмпирической калибровки на данных конкретных промышленных отраслей, а задаются в качестве исследовательских диапазонов и используются прежде всего для анализа чувствительности модели к изменению поведенческих и институциональных условий. Значения параметров задавались исходя из теоретической интерпретации механизмов взаимодействия агентов, результатов предшествующих исследований платформенных рынков и необходимости воспроизведения качественно различных режимов функционирования системы. В связи с этим сценарии следует интерпретировать как экспериментальные конфигурации модели, позволяющие анализировать влияние отдельных факторов на структуру транзакционной сети и динамику платформизации. В частности, параметры издержек переключения интерпретируются как совокупность организационных, технологических и информационных затрат на смену контрагента; параметры доверия и репутации – как степень значимости надежности партнеров при выборе взаимодействий; параметры поиска – как уровень доступности информации о потенциальных контрагентах; параметры платформы – как характеристики политики координации и привлечения участников. При этом предлагаемая модель допускает последующую эмпирическую калибровку параметров на основе отраслевых данных, опросов предприятий и практики создания цифровых платформ в промышленности.

Модель реализована в среде AnyLogic 8.9.3, в базовой конфигурации число агентов составляет 1 000 ед., для каждого сценария выполнено 20 независимых прогонов модели с различными начальными значениями генератора случайных чисел. Для оценки устойчивости результатов рассчитывались средние значения и стандартные отклонения результирующих показателей. Результаты имитационного моделирования в целом подтверждают выдвинутые гипотезы и позволяют выявить различие в количественных параметрах и механизмах формирования промышленной экосистемы при различных институциональных и поведенческих конфигурациях. Для обеспечения сопоставимости сценариев используются агрегированные показатели динамики системы. Доля предприятий, подключенных к платформе, определяется как отношение числа агентов, использующих платформенный режим взаимодействия, к общей численности предприятий. Время достижения целевого уровня платформизации рассчитывается как первый момент времени, в который данная доля достигает заданного порогового значения. Волатильность платформенного режима измеряется как среднее абсолютное изменение доли платформенных участников между последовательными периодами. Период окупаемости платформы определяется как момент перехода накопленной выручки платформы в неотрицатель-

ную область. Средняя репутация на платформе и вне платформы рассчитывается как среднее значение репутации соответствующих групп агентов, при этом дополнительно фиксируется минимальное значение репутации за весь период моделирования (табл. 3).

В базовом сценарии (гипотеза 1) формируется устойчивый смешанный режим, который характеризуется умеренной скоростью платформизации и низкой волатильностью, что указывает на доминирование инерционных механизмов в структуре сети. При сбалансированных параметрах платформа интегрируется в промышленную экосистему как один из равноправных механизмов координации, не вытесняя полностью прямые взаимодействия.

Сценарий селективной платформы (гипотеза 2) показывает, что повышение репутационного порога входа не приводит к замедлению платформизации, а ведет к изменению структуры системы: средняя репутация на платформе возрастает примерно на 32–34 % по сравнению с внеплатформенным сегментом, тогда как в базовом сценарии этот разрыв обратный. Таким образом, селективность формирует более устойчивый и эффективный сегмент взаимодействий без роста волатильности.

В сценарии фрагментированной промышленной цепочки (гипотеза 3) ускорение платформизации составляет порядка 5 % относительно базового сценария, что достигается за счет принципиально иного механизма. Если в предыдущем случае ключевым фактором выступает состав участников, то здесь – структура доступных связей. Платформа компенсирует ограниченность прямого поиска, и ее роль как инфраструктуры становится системообразующей. При этом репутационный разрыв между платформой и внешним контуром сохраняется, но оказывается менее выраженным, чем при селективной стратегии, что указывает на более слабый эффект отбора.

Сценарий агрессивного роста платформы (гипотеза 4) демонстрирует наиболее сильный эффект масштабирования: время достижения целевого уровня цифровизации сокращается примерно на 40 % относительно базового сценария при целевой доле подключенных предприятий 70 %. Однако этот выигрыш сопровождается увеличением волатильности примерно на 40 %, что делает данный режим наименее устойчивым. В сравнении с селективным сценарием ускорение за счет финансового стимулирования достигается ценой снижения стабильности и ослабления механизмов отбора.

При этом наиболее сильное влияние на скорость трансформации оказывает уровень издержек переключения, который в прикладной интерпретации отражает степень технологической сложности перехода между контрагентами и режимами взаимодействия (гипотеза 5). По сравнению с базовым сценарием время достижения целевого уровня цифровизации сокращается более чем в 2,8 раза, а период окупаемости платформы уменьшается более чем на 50 %. Снижение издержек переключения в модели предполагает упрощение процедур подключения, стандартизацию интерфейсов взаимодействия, снижение специфичности активов и развитие совместимых цифровых решений.

Полученные количественные результаты следует рассматривать как сценарные характеристики поведения модели, отражающие направление и относительную силу влияния факторов, а не как эмпирический прогноз развития реальных цифровых экосистем.

Сопоставление сценариев позволяет сформулировать выводы с точки зрения управления развитием промышленной экосистемы. Во-первых, скорость циф-

Таблица 3 – Сравнительные результаты сценариев имитационного моделирования
Table 3 – Comparative results of the simulation scenarios

Показатель	Базовый сценарий	Селективная платформа	Фрагментированная промышленная цепочка	Агрессивный рост платформы	Низкие издержки переключения
Доля предприятий, подключенных к платформе	0,506 ± 0,007	0,505 ± 0,005	0,507 ± 0,005	0,715 ± 0,011	0,511 ± 0,010
Время достижения целевого уровня цифровизации	187,0 ± 15,492	187,8 ± 17,21	177,2 ± 18,295	116,6 ± 2,945	65,9 ± 18,643
Волатильность платформенного режима	0,521 ± 0,029	0,51 ± 0,011	0,507 ± 0,005	0,722 ± 0,028	0,525 ± 0,023
Период окупаемости платформы	290,5 ± 126,6	292,6 ± 70,763	329,1 ± 26,703	327,9 ± 11,378	131,6 ± 28,463
Средняя репутация на платформе	0,508 ± 0,006	0,670 ± 0,008	0,503 ± 0,007	0,549 ± 0,004	0,53 ± 0,015
Средняя репутация вне платформы	0,658 ± 0,010	0,499 ± 0,006	0,654 ± 0,009	0,671 ± 0,008	0,678 ± 0,015

Примечание: составлено на основании результатов имитационных расчетов. Использован формат *M* ± *SD* (среднее ± стандартное отклонение).

ровизации определяется преимущественно уровнем инерционности переключения, которая в прикладном смысле отражает технологическую и организационную сложность смены контрагентов – степень специфичности активов, интеграции производственных процессов и совместимости цифровых решений. Снижение издержек переключения оказывает более сильное влияние на динамику системы, чем изменение тарифной политики платформы. Во-вторых, темпы роста и структурная устойчивость экосистемы не совпадают: сценарии, обеспечивающие ускоренную цифровизацию (агрессивный рост и низкие издержки переключения), сопровождаются либо ростом волатильности, либо ослаблением механизмов отбора, тогда как селективный сценарий формирует более устойчивую и качественную структуру связей за счет репутационной фильтрации участников. В-третьих, функции платформы могут существенно зависеть от промышленного контекста: при высоких репутационных барьерах она выступает как механизм отбора и повышения качества кооперации, в условиях фрагментированной производственной структуры – как инфраструктура интеграции звеньев цепочки поставок, а при активном субсидировании – как инструмент ускорения промышленной кооперации.

Проведенные сценарные расчеты показывают, что через параметры цифровой платформы можно управлять цифровой промышленной экосистемой. Платформа выступает не только как инфраструктура взаимодействия, но и как инструмент управления промышленной динамикой, позволяющий балансировать между скоростью развития промышленного сектора и его устойчивостью.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Динамика базового сценария, характеризующаяся *S*-образным продвижением платформизации (медленный старт – ускорение – насыщение), согласуется с теоретическими представлениями о динамике пользователей в многосторонних рынках. В частности, в работе [Rochet, Tirole, 2003] показано, что ценность платформы зависит от числа участников на обеих сторонах рынка, что формирует пороговые эффекты распространения. Полученные в модели результаты уточняют данный вывод, демонстрируя, что аналогичная динамика может возникать даже без явного задания сетевых эффектов, за счет расширения множества доступных контрагентов и снижения информационных ограничений.

Сценарии селективной платформы и фрагментированной промышленной цепочки показывают, что платформа может усиливаться двумя различными способами: как механизм отбора и за счет обеспечения доступа к контрагентам, находящимся вне поля зрения предприятия в обычных условиях. В промышленной среде платформа выступает не только посредником, но и инфраструктурой координации, компенсирующей фрагментацию цепочки поставок и ограниченность наблюдаемого рынка. Такая интерпретация согласуется с исследованиями роли цифровых платформ как механизма организации взаимозависимых участников [Jacobides, Cennamo, Gawer, 2018] и механизма обеспечения доступа к удаленным контрагентам [Lin, Mao, Lin, 2025]. Этот результат соответствует исследованиям цифровых рынков, подчеркивающим роль алгоритмов и данных в снижении издержек поиска [Goldfarb, Tucker, 2019].

Сценарии агрессивного роста платформы и низких издержек переключения позволяют отделить эффект ценового стимулирования от эффекта технологического упрощения перехода между режимами взаимодействия. Как показывают исследования, ключевым ограничителем цифровой трансформации могут выступать не только тарифы платформы, но и технологические барьеры смены контрагентов: специфичность активов, сложность интеграции ИТ-систем, несовместимость стандартов данных и высокая стоимость перенастройки процессов [Farrell, Klemperer, 2007]. Эффект нестабильности и последующего оттока участников при стратегии агрессивного субсидируемого роста также был отмечен в работе [Parker, Van Alstyne, Choudary, 2016]. Отмеченная роль издержек переключения и замены контрагента в формировании инерционности сети наблюдается и в эмпирических исследованиях цепочек поставок [Blut et al., 2016].

В совокупности результаты моделирования подтверждают, что устойчивое распространение платформы возникает только при сочетании достаточной доступности контрагентов, умеренных издержек переключения и наличия начальных стимулов. Полученные результаты не только воспроизводят известные теоретические эффекты платформенных рынков и межфирменных взаимодействий, но и уточняют механизмы их формирования, показывая, каким образом сочетание доверия, ограниченного поиска и издержек переключения определяет траекторию эволюции цифровой промышленной экосистемы. В управленческом аспекте полученные результаты свидетельствуют о том, что параметры платформы выступают инструментами регулирования структуры межфирменных взаимодействий, позволяя балансировать между скоростью роста экосистемы и ее устойчивостью.

Разработанная модель может использоваться как инструмент поддержки управленческих решений при развитии цифровых промышленных платформ. Предприятиям она позволяет анализировать последствия выбора между прямыми и платформенно-опосредованными взаимодействиями, оценивать влияние издержек переключения и репутации на устойчивость цепочек кооперации. Операторам платформ модель предоставляет возможность оценивать влияние комиссионной политики, механизмов отбора участников и параметров подключения на темпы роста экосистемы, устойчивость сети и качество взаимодействий между участниками.

С позиции государственного регулирования модель может применяться для анализа последствий мер стимулирования цифровизации промышленности, включая субсидирование подключения предприятий к платформам, снижение барьеров входа и развитие цифровой инфраструктуры. Таким образом, модель позволяет исследовать взаимосвязь между параметрами платформенной координации и динамикой промышленной экосистемы. С управленческой точки зрения это означает, что параметры регулирования платформенной среды способны существенно влиять на темпы цифровизации и устойчивость межфирменных взаимодействий. Изменение допустимых диапазонов комиссий, требований к репутации или барьеров входа может рассматриваться как инструмент косвенного управления структурой промышленной экосистемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена агент-ориентированная модель формирования транзакционной структуры цифровой промышленной экосистемы, в которой платформа рассматривается как технологическая инфраструктура, изменяющая условия поиска и взаимодействия между предприятиями. Подход позволяет анализировать внутреннюю динамику межфирменных связей, образующихся в условиях ограниченной информации и поведенческой гетерогенности агентов.

Результаты моделирования показывают, что цифровая трансформация носит нелинейный характер и определяется взаимодействием ограниченности поиска, издержек переключения и механизмов репутационного отбора. При этом динамика распространения платформы возникает эндогенно за счет расширения множества доступных контрагентов и снижения информационных ограничений. Сценарный анализ выявил различные механизмы трансформации. Селективная платформа повышает качество взаимодействий за счет отбора участников, фрагментированная структура усиливает инфраструктурную роль платформы, агрессивный рост ускоряет масштабирование ценой устойчивости, а снижение издержек переключения обеспечивает наиболее быстрое изменение структуры сети.

Сопоставление сценариев показывает, что факторы имеют различную экономическую природу: репутационный порог влияет на качество, ограниченность поиска – на интеграцию сети, тарифные стимулы – на масштаб подключения, а издержки переключения – на глубину структурной перестройки. Следовательно, ускорение цифровизации требует не только развития платформ, но и снижения технологических барьеров взаимодействия – стандартизации интерфейсов, совместимости данных и удешевления интеграции, что превращает платформу в полноценную инфраструктурную основу экосистемы.

Теоретическая значимость работы заключается в уточнении механизмов формирования цифровых экосистем, где макродинамика определяется взаимодействием поведенческих и структурных факторов. Результаты расчетов показали, что развитие цифровых промышленных экосистем требует комплексной политики и сбалансированной системы мер, сочетающей развитие платформ с уменьшением технологических ограничений взаимодействия. Практическая значимость исследования связана с возможностью использования модели для анализа последствий управленческих решений в сфере промышленной цифровизации. Она может применяться для оценки эффектов изменения параметров платформы, прогнозирования динамики вовлечения предприятий и анализа устойчивости межфирменных взаимодействий в условиях платформенной координации. Результаты могут быть полезны при разработке стратегий управления цифровыми платформами в промышленности, включая выбор политики субсидирования, регулирование издержек подключения и формирование механизмов снижения барьеров переключения.

Ограничением исследования являются отсутствие отраслевой калибровки модели и эмпирической валидации параметров на данных определенных цифровых платформ, упрощенное представление производственных процессов. Дальнейшее развитие модели предполагает расширение числа независимых прогонов, проведение дополнительных статистических проверок устойчивости результатов и корректирование параметров по данным конкретных отраслей и цифровых промышленных платформ. Текущая версия модели носит исследовательский характер и ориентирована на воспроизведение базовых механизмов формирования межфирменных взаимодействий в цифровой промышленной среде. При этом ее структура допускает учет более сложной схемы цепочек поставок, введение конкуренции платформ и активизации регулятора. ■

Источники

Глухов В.В., Бабкин А.В., Шкарупета Е.В., Здольникова С.В. (2025). Формирование терминологической платформы стратегического управления интеллектуальной зрелостью промышленных экосистем в целях технологического суверенитета // Экономика и управление. Т. 31, № 8. С. 1016–1029. http://doi.org/10.35854/1998-1627-2025-8-1016-1029

Глухов В.В., Бабкин А.В., Шкарупета Е.В., Плотников В.А. (2021). Стратегическое управление промышленными экосистемами на основе платформенной концепции // Экономика и управление. Т. 27, № 10. С. 751–765. http://doi.org/10.35854/1998-1627-2021-10-751-765

Гузь А.Р., Стефанова Н.А. (2025). Модель цифровой экосистемы: лидеры российского b2c рынка и их адаптация к современным вызовам // Journal of Monetary Economics and Management. № 1. С. 65–82. http://doi.org/10.26118/2782 4586.2025.79.65.012

Демиров В.В. (2024). Математические модели анализа цифровой экономики (включая агент-ориентированное представление участников рынка) // Вестник Белорусского государственного экономического университета. № 5. С. 65–82.

Иванов А.Л., Шустова И.С. (2020). Исследование цифровых экосистем как фундаментального элемента цифровой экономики // Креативная экономика. Т. 14, № 5. С. 655–670. http://doi.org/10.18334/ce.14.5.110151

Каленов О.Е. (2022). Цифровые экосистемы организаций // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. № 1. С. 139–147. https://doi.org/10.21686/2413-2829-2022-1-139-147

Клейнер Г.Б. (2019). Экономика экосистем: шаг в будущее // Экономическое возрождение России. № 1 (59). С. 40–52.

Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Эпштейн Дж.М. (2022). Агент-ориентированное моделирование для сложного мира. Часть 1 // Экономика и математические методы. Т. 58, № 1. С. 5–26. https://doi.org/10.31857/S042473880018970 6

Меденников В.И. (2021). Математическая модель формирования цифровых платформ управления экономикой страны // Цифровая экономика. № 1. http://doi.org/10.34706/DE 2019 01 03

Adner R. (2017). Ecosystem as structure. *Journal of Management Studies,* vol. 54, no. 1, pp. 3–19. https://doi.org/10.1177/0149206316678451

Armstrong M. (2006). Competition in two-sided markets. *RAND Journal of Economics,* vol. 37, no. 3, pp. 668–691. https://doi.org/10.1111/j.1756-2171.2006.tb00037.x

Asad U., Khan M., Khalid A., Lughmani W. (2023). Agent-based modeling in multi-level industrial ecosystems development. *Revista Relações Internacionais do Mundo Atual – RIMA,* vol. 17, no. 49, pp. 201–221.

Barykin S.Y., Kapustina I.V., Kirillova T.V., Yadykin V.V., Konnikov Y.A. (2020). Economics of digital ecosystems. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity,* vol. 6, no. 4, article 124. https://doi.org/10.3390/joitmc6040124

Blut M., Evanschitzky H., Backhaus C., Rudd J., Marck M. (2016). Securing business-to-business relationships: The impact of switching costs. *Industrial Marketing Management,* vol. 52, pp. 82–90. https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2015.03.010

Chen W., Tang X., Qi J., Liu H. (2026). Dynamic pricing strategy design for manufacturing service providers in manufacturing platforms. *Journal of Industrial and Management Optimization,* vol. 22, no. 2, pp. 1140–1167. https://doi.org/10.3934/jimo.2026042

Cutolo D., Kenney M. (2021). Platform-dependent entrepreneurs: Power asymmetries, risks, and strategies in the platform economy. *Academy of Management Perspectives,* vol. 35, no. 4, pp. 584–605. https://doi.org/10.5465/amp.2019.0103

Demartini M., Tonelli F., Bertani F. (2018). Approaching industrial symbiosis through agent-based modeling and system dynamics. In: T Borangiu., D. Trentesaux, A. Thomas, O. Cardin. (Eds.). *Service orientation in holonic and multi-agent manufacturing* (pp. 145–157). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73751-5_13

Dosi G., Fagiolo G., Roventini A. (2006). An evolutionary model of endogenous business cycles. *Computational Economics,* vol. 27, no. 1, pp. 3–34. https://doi.org/10.1007/s10614-005-9014-2

Emery L.P. (2025). Market dominance in the digital age. *Review of Finance,* vol. 29, no. 4, pp. 1219–1258. https://doi.org/10.1093/rof/rfaf025

Epstein J.M., Axtell R. (1996). *Growing artificial societies: Social science from the bottom up*. Cambridge, MA: MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/3374.001.0001

Farrell J., Klemperer P. (2007). Coordination and lock-in: Competition with switching costs and network effects. In: *Handbook of Industrial Organization*, vol. 3, pp. 1967–2072. https://doi.org/10.1016/S1573-448X(06)03031-7

Fraccascia L. (2020). Quantifying the direct network effect for online platforms supporting industrial symbiosis: An agent-based simulation study. *Ecological Economics,* vol. 170, 106587. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106587

Giarlotta A., Petralia A., Watson S. (2022). Bounded rationality is rare. *Journal of Economic Theory,* vol. 203, 105481. https://doi.org/10.1016/j.jet.2022.105481

Goldfarb A., Tucker C. (2019). Digital economics. *Journal of Economic Literature,* vol. 57, no. 1, pp. 3–43. https://doi.org/10.1257/jel.20171452

Granovetter M. (1985). Economic action and social structure: The problem of embeddedness. *American Journal of Sociology,* vol. 91, no. 3, pp. 481–510. https://doi.org/10.1086/228311

Harrison G.W., List J.A. (2004). Field experiments. *Journal of Economic Literature,* vol. 42, no. 4, pp. 1009–1055. https://doi.org/10.1257/0022051043004577

Hein A., Schreieck M., Riasanow T. et al. (2020). Digital platform ecosystems. *Electronic Markets,* vol. 30, no. 1, pp. 1–15. https://doi.org/10.1007/s12525-019-00377-4

Jackson M.O. (2008). *Social and economic networks*. Princeton: Princeton University Press. https://doi.org/10.23943/9781400833999

Jacobides M.G., Cennamo C., Gawer A. (2018). Towards a theory of ecosystems. *Strategic Management Journal,* vol. 39, no. 8, pp. 2255–2276. https://doi.org/10.1002/smj.2904

Lin J., Mao W., Lin X. (2025). Does the adoption of industrial Internet platforms expand or reduce geographical distance to customers? Evidence from China's new energy vehicle industry. Systems, vol. 13, no. 5, art. 357. https://doi.org/10.3390/systems13050357

Luus K.A., Robinson D.T., Deadman P.J. (2013). Representing ecological processes in agent-based models of land use and cover change. *Journal of Land Use Science,* vol. 8, no. 2, pp. 175–198. https://doi.org/10.1080/1747423X.2011.640357

Madanaguli A., Dhir A., Talwar S., Clauss T., Kraus T., Kaur P. (2023). Diving into the uncertainties of open innovation: A systematic review of innovation ecosystems and micro-enterprises. *Technological Forecasting and Social Change,* vol. 190. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2022.102582

Mollica M., Fraccascia L., Nastasi A. (2025). What drives the success of online platforms for industrial ecosystems. *Ecological Economics,* vol. 230. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108502

Parker G.G., Van Alstyne M.W., Choudary S.P. (2016). Platform revolution: How networked markets are transforming the economy—and How to make them work for you. New York: W. W. Norton & Company.

Rochet J.-C., Tirole J. (2003). Platform competition in two-sided markets. *Journal of the European Economic Association,* vol. 1, no. 4, pp. 990–1029. https://doi.org/10.1162/154247603322493212

Savaglio C., Ganzha M., Paprzycki M., Bădică C., Ivanović M., Fortino G. (2020). Agent-based Internet of Things: State-of-the-art and research challenges. *Future Generation Computer Systems,* vol. 102, pp. 1038–1053. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.09.016

Smajgl A., Brown D.G., Valbuena D., Huigen M.G.A. (2011). Empirical characterisation of agent behaviours in socio-ecological systems. *Environmental Modelling & Software,* vol. 26, no. 7, pp. 837–844. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.011

Summad E., Al Kindi M., Ouhmidou I., Al Kindi A. (2024). Agent-based modeling for effective innovation ecosystem management. In: *Proceedings of the 2nd GCC International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM 2024)*. Muscat, Sultanate of Oman, 1–3 December, 2024. USA: IEOM Society International. https://doi.org/10.46254/GC02.20240127

Tesfatsion L. (2006). Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory. In: *Handbook of Computational Economics,* vol. 2, pp. 831–880. https://doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02016-2

Tsyplakov A.A., Melnikova L.V., Ibragimov N.I. (2021). Agent-based modeling of spatial economic systems: A review. *Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences,* vol. 14, no. 12, pp. 1910–1919. https://doi.org/10.17516/1997-1370-0869

Williamson O.E. (1985). *The economic institutions of capitalism: Firms, markets, relational contracting*. New York: The Free Press.

Yang C., Huang Q., Li Z., Liu K., Hu F. (2017). Big data and cloud computing: Innovation opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth,* vol. 10, no. 1, pp. 13–53. https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1239771

Zhou X., Xiao J., Xue X., Chen S., Feng Z. (2024). A platform ecosystem evolution model with service dynamic supply and matching. *IEEE Transactions on Computational Social Systems,* vol. 11, no. 3, pp. 3504–3515. https://doi.org/10.1109/TCSS.2023.3332064

References

Glukhov V.V., Babkin A.V., Shkarupeta E.V., Zdolnikova S.V. (2025). Creation of a terminological platform for strategic management of the intellectual maturity of industrial ecosystems for the purposes of technological sovereignty. *Ekonomika i upravlenie / Economics and Management,* vol. 31, no. 8, pp. 1016–1029. https://doi.org/10.35854/1998-1627-2025-8-1016-1029. (in Russ.)

Glukhov V.V., Babkin A.V., Shkarupeta E.V., Plotnikov V.A. (2021). Strategic management of industrial ecosystems based on the platform concept. *Ekonomika i upravlenie / Economics and Management,* vol. 27, no. 10, pp. 751–765. https://doi.org/10.35854/1998-1627-2021-10-751-765. (in Russ.)

Guz A.R., Stefanova N.A. (2025). Model of a digital ecosystem: Leaders of the Russian B2C market and their adaptation to modern challenges. *Journal of Monetary Economics and Management,* no. 1, pp. 84–94. https://doi.org/10.26118/2782-4586.2025.79.65.012. (in Russ.)

Demirov V.V. (2024). Mathematical models for analyzing the digital economy, including an agent-based representation of market participants. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta / Bulletin of the Belarusian State Economic University,* no. 5, pp. 65–82. (in Russ.)

Ivanov A.L., Shustova I.S. (2020). Research on digital ecosystems as a fundamental element of the digital economy. *Kreativnaya ekonomika / Creative Economy,* vol. 14, no. 5, pp. 655–670. https://doi.org/10.18334/ce.14.5.110151. (in Russ.)

Kalenov O.E. (2022). Digital ecosystems of organizations. *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plekhanova / Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics,* no. 1, pp. 139–147. https://doi.org/10.21686/2413-2829-2022-1-139-147. (in Russ.)

Kleiner G.B. (2019). The economics of ecosystems: A step into the future. *Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii / Economic Revival of Russia,* no. 1(59), pp. 40–45. (in Russ.)

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M. (2022). Agent-based modeling for a complex world. Part 1. *Ekonomika i matematicheskie metody / Economics and Mathematical Methods,* vol. 58, no. 1, pp. 5–26. https://doi.org/10.31857/S042473880018970-6. (in Russ.)

Medennikov V.I. (2021). A mathematical model for the formation of digital platforms for managing the country's economy. *Tsifrovaya ekonomika / Digital Economy,* no. 1(5), pp. 25–35. https://doi.org/10.34706/DE-2019-01-03. (in Russ.)

Adner R. (2017). Ecosystem as structure. *Journal of Management Studies,* vol. 54, no. 1, pp. 3–19. https://doi.org/10.1177/0149206316678451

Armstrong M. (2006). Competition in two-sided markets. *RAND Journal of Economics,* vol. 37, no. 3, pp. 668–691. https://doi.org/10.1111/j.1756-2171.2006.tb00037.x

Asad U., Khan M., Khalid A., Lughmani W. (2023). Agent-based modeling in multi-level industrial ecosystems development. *Revista Relações Internacionais do Mundo Atual – RIMA,* vol. 17, no. 49, pp. 201–221.

Barykin S.Y., Kapustina I.V., Kirillova T.V., Yadykin V.V., Konnikov Y.A. (2020). Economics of digital ecosystems. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity,* vol. 6, no. 4, article 124. https://doi.org/10.3390/joitmc6040124

Blut M., Evanschitzky H., Backhaus C., Rudd J., Marck M. (2016). Securing business-to-business relationships: The impact of switching costs. *Industrial Marketing Management,* vol. 52, pp. 82–90. https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2015.03.010

Chen W., Tang X., Qi J., Liu H. (2026). Dynamic pricing strategy design for manufacturing service providers in manufacturing platforms. *Journal of Industrial and Management Optimization,* vol. 22, no. 2, pp. 1140–1167. https://doi.org/10.3934/jimo.2026042

Cutolo D., Kenney M. (2021). Platform-dependent entrepreneurs: Power asymmetries, risks, and strategies in the platform economy. *Academy of Management Perspectives,* vol. 35, no. 4, pp. 584–605. https://doi.org/10.5465/amp.2019.0103

Demartini M., Tonelli F., Bertani F. (2018). Approaching industrial symbiosis through agent-based modeling and system dynamics. In: T Borangiu., D. Trentesaux, A. Thomas, O. Cardin. (Eds.). *Service orientation in holonic and multi-agent manufacturing* (pp. 145–157). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73751-5_13

Dosi G., Fagiolo G., Roventini A. (2006). An evolutionary model of endogenous business cycles. *Computational Economics,* vol. 27, no. 1, pp. 3–34. https://doi.org/10.1007/s10614-005-9014-2

Emery L.P. (2025). Market dominance in the digital age. *Review of Finance,* vol. 29, no. 4, pp. 1219–1258. https://doi.org/10.1093/rof/rfaf025

Epstein J.M., Axtell R. (1996). *Growing artificial societies: Social science from the bottom up*. Cambridge, MA: MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/3374.001.0001

Farrell J., Klemperer P. (2007). Coordination and lock-in: Competition with switching costs and network effects. In: *Handbook of Industrial Organization*, vol. 3, pp. 1967–2072. https://doi.org/10.1016/S1573-448X(06)03031-7

Fraccascia L. (2020). Quantifying the direct network effect for online platforms supporting industrial symbiosis: An agent-based simulation study. *Ecological Economics,* vol. 170, 106587. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106587

Giarlotta A., Petralia A., Watson S. (2022). Bounded rationality is rare. *Journal of Economic Theory,* vol. 203, 105481. https://doi.org/10.1016/j.jet.2022.105481

Goldfarb A., Tucker C. (2019). Digital economics. *Journal of Economic Literature,* vol. 57, no. 1, pp. 3–43. https://doi.org/10.1257/jel.20171452

Granovetter M. (1985). Economic action and social structure: The problem of embeddedness. *American Journal of Sociology,* vol. 91, no. 3, pp. 481–510. https://doi.org/10.1086/228311

Harrison G.W., List J.A. (2004). Field experiments. *Journal of Economic Literature,* vol. 42, no. 4, pp. 1009–1055. https://doi.org/10.1257/0022051043004577

Hein A., Schreieck M., Riasanow T. et al. (2020). Digital platform ecosystems. *Electronic Markets,* vol. 30, no. 1, pp. 1–15. https://doi.org/10.1007/s12525-019-00377-4

Jackson M.O. (2008). *Social and economic networks*. Princeton: Princeton University Press. https://doi.org/10.23943/9781400833999

Jacobides M.G., Cennamo C., Gawer A. (2018). Towards a theory of ecosystems. *Strategic Management Journal,* vol. 39, no. 8, pp. 2255–2276. https://doi.org/10.1002/smj.2904

Lin J., Mao W., Lin X. (2025). Does the adoption of industrial Internet platforms expand or reduce geographical distance to customers? Evidence from China's new energy vehicle industry. Systems, vol. 13, no. 5, art. 357. https://doi.org/10.3390/systems13050357

Luus K.A., Robinson D.T., Deadman P.J. (2013). Representing ecological processes in agent-based models of land use and cover change. *Journal of Land Use Science,* vol. 8, no. 2, pp. 175–198. https://doi.org/10.1080/1747423X.2011.640357

Madanaguli A., Dhir A., Talwar S., Clauss T., Kraus T., Kaur P. (2023). Diving into the uncertainties of open innovation: A systematic review of innovation ecosystems and micro-enterprises. *Technological Forecasting and Social Change,* vol. 190. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2022.102582

Mollica M., Fraccascia L., Nastasi A. (2025). What drives the success of online platforms for industrial ecosystems. *Ecological Economics,* vol. 230. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108502

Parker G.G., Van Alstyne M.W., Choudary S.P. (2016). Platform revolution: How networked markets are transforming the economy—and How to make them work for you. New York: W. W. Norton & Company.

Rochet J.-C., Tirole J. (2003). Platform competition in two-sided markets. *Journal of the European Economic Association,* vol. 1, no. 4, pp. 990–1029. https://doi.org/10.1162/154247603322493212

Savaglio C., Ganzha M., Paprzycki M., Bădică C., Ivanović M., Fortino G. (2020). Agent-based Internet of Things: State-of-the-art and research challenges. *Future Generation Computer Systems,* vol. 102, pp. 1038–1053. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.09.016

Smajgl A., Brown D.G., Valbuena D., Huigen M.G.A. (2011). Empirical characterisation of agent behaviours in socio-ecological systems. *Environmental Modelling & Software,* vol. 26, no. 7, pp. 837–844. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.011

Summad E., Al Kindi M., Ouhmidou I., Al Kindi A. (2024). Agent-based modeling for effective innovation ecosystem management. In: *Proceedings of the 2nd GCC International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM 2024)*. Muscat, Sultanate of Oman, 1–3 December, 2024. USA: IEOM Society International. https://doi.org/10.46254/GC02.20240127

Tesfatsion L. (2006). Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory. In: *Handbook of Computational Economics,* vol. 2, pp. 831–880. https://doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02016-2

Tsyplakov A.A., Melnikova L.V., Ibragimov N.I. (2021). Agent-based modeling of spatial economic systems: A review. *Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences,* vol. 14, no. 12, pp. 1910–1919. https://doi.org/10.17516/1997-1370-0869

Williamson O.E. (1985). *The economic institutions of capitalism: Firms, markets, relational contracting*. New York: The Free Press.

Yang C., Huang Q., Li Z., Liu K., Hu F. (2017). Big data and cloud computing: Innovation opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth,* vol. 10, no. 1, pp. 13–53. https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1239771

Zhou X., Xiao J., Xue X., Chen S., Feng Z. (2024). A platform ecosystem evolution model with service dynamic supply and matching. *IEEE Transactions on Computational Social Systems,* vol. 11, no. 3, pp. 3504–3515. https://doi.org/10.1109/TCSS.2023.3332064

Информация об авторе

Коровин Григорий Борисович

Кандидат экономических наук, заведующий сектором, старший научный сотрудник. **Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук**, г. Екатеринбург, РФ. E-mail: korovin.gb@uiec.ru

Information about the author

Grigory B. Korovin

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