
ИННОВАЦИОННОЕ И ПРОМЫШЛЕННОЕ РАЗВИТИЕ

УДК 330.354

*EDN LFGNEC***А.В. Юдин, Е.С. Митяков, Н.Н. Карпухина, П.Ю. Грошева**

УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВЫМ РАЗВИТИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧНО МЕНЯЮЩЕЙСЯ СРЕДЫ

МИРЭА – Российский технологический университет
Москва, Россия

Рассматриваются вопросы управления устойчивым развитием промышленных экосистем в условиях динамично меняющейся внешней и внутренней среды. Промышленные экосистемы представлены как комплексные сети взаимосвязанных участников, включая производственные предприятия, научно-исследовательские организации и другие хозяйствующие субъекты, совместно функционирующие для реализации устойчивых производственных процессов и технологий. Устойчивое развитие промышленных экосистем определяется как стратегия, направленная на создание и поддержание долгосрочной стабильности в экономической, экологической и социальной сферах, а также на активное взаимодействие участников экосистемы, стимулирование инноваций и достижение высокой цифровой зрелости. Предложены математическая модель и алгоритм управления устойчивым развитием промышленных экосистем. Математическая модель основана на агентном подходе, позволяет учитывать динамику взаимодействий участников промышленной экосистемы и влияние внешней среды на их действия. Алгоритм принятия управленческих решений включает использование экспертной системы и имитационного моделирования и дает возможность оценить различные сценарии, выработать эффективные стратегии для повышения устойчивости и конкурентоспособности экосистем. Предложенные инструменты могут быть использованы для создания комплексных информационно-аналитических систем, способных эффективно прогнозировать и управлять развитием промышленных экосистем, обеспечивая их адаптацию к изменяющимся условиям и оптимизацию в условиях нестабильной среды.

Ключевые слова: промышленная экосистема; устойчивое развитие; микро-математическое моделирование; агентное моделирование; имитационное моделирование; экспертная система; стратегическое управление.

Введение. Промышленная экосистема представляет собой комплексную сеть взаимосвязанных участников, включающую промышленные предприятия, организации, научно-исследовательские институты и другие субъекты, которые совместно функционируют для разработки и внедрения устойчивых производственных процессов и технологий. Такая интеграция создает возможности для объединения не только участников, выполняющих разные этапы производственного процесса (вертикальная интеграция), но и работающих на одном этапе (горизонтальная интеграция). При этом необходимо отметить, что бизнес-модель на основе экосистемы обеспечивает оперативное реагирование на рыночные запросы и способствует ускорению формирования модульных предложений для клиентов, что, в свою очередь, значительно повышает адаптивность и конкурентоспособность участников экосистемы.

Устойчивое развитие промышленной экосистемы представляет собой стратегию развития, направленную на создание и поддержание долгосрочной стабильности в экономической, экологической и социальной сферах, а также активное взаимодействие участников экосистемы, стимулирование инноваций и достижение высокой цифровой зрелости. Управление устойчивым развитием промышленными экосистемами становится все более актуальной задачей в условиях современного мира, где внутренние и внешние факторы оказывают значительное влияние на бизнес-процессы. При этом управление компетенциями должно способствовать гармонизации мышления специалистов, участвующих в процессе выработки и реализации управляющих решений для достижения общих целей промышленного развития.

Несмотря на важность управления промышленными экосистемами, на сегодняшний день наблюдается дефицит научно обоснованных алгоритмов управления, основанных на формализованном экономико-математическом моделировании. Это создает определенные сложности для организаций, стремящихся эффективно реагировать на динамичные условия функционирования. Разработка таких алгоритмов является важным шагом для повышения устойчивости и эффективности управления промышленными экосистемами.

Обзор литературы. Устойчивость играет ключевую роль в промышленных экосистемах, где основной целью может быть достижение устойчивого развития. Эффективное управление обеспечивает устойчивое развитие промышленных экосистем в условиях динамично изменяющейся внутренней и внешней среды. В научной литературе представлены разнообразные подходы к организации такого управления.

Отдельное внимание научных исследований уделяется промышленной экологии, которая направлена на переход от классической линейной модели производства к экономике замкнутого цикла. При этом применение

принципов промышленной экологии зачастую позволяет улучшить показатели эффективности, минимизируя потери и повышая производительность [1].

В работе [2] в рамках задачи управления промышленными экосистемами предложено задействовать подход, связанный со стратегическим управлением нишами. Он может быть использован для перехода к более устойчивым и инновационным технологиям. Он позволяет выявлять и развивать нишевые рынки, где новые технологии могут быть протестированы и адаптированы, прежде чем они будут внедрены на более широком уровне. Таким образом, происходит снижение рисков, связанных с внедрением новых решений, путем создания защищенных пространств для экспериментов, что позволяет вовлекать заинтересованные стороны, обмениваться знаниями и формировать необходимые условия для успешной интеграции устойчивых практик в существующие производственные процессы.

Примеры успешной кооперации предприятий, такие как экопромышленные парки, демонстрируют достижение экономической устойчивости, оптимизацию расходов на сырье и управление отходами [3, 4]. В частности, лесной промышленный парк Уймахарью в Финляндии и промышленный парк Бернсайд в Новой Шотландии служат моделями, в которых можно зафиксировать положительные изменения в бизнес-практиках [5, 6].

В работе [7] показано, что современные цифровые технологии и модели управления создают новые возможности для эффективного взаимодействия в рамках промышленных экосистем, а интеграция цифровых решений, основанных на децентрализации и механизмах обратной связи, улучшает производственные процессы и обеспечивает более гибкое управление.

В научных статьях [8, 9] отмечается, что для успешного устойчивого развития промышленных экосистем необходим многоуровневый методологический подход, который поддерживает инновационные изменения и стратегическую диверсификацию, включает создание условий для внедрения новых технологий и практик, соответствующих изменяющимся требованиям. При этом особое внимание следует уделить экономическому симбиозу, который способствует созданию взаимовыгодных отношений между предприятиями и позволяет увеличить общую эффективность [10].

В работах [11, 12] показано, что процессы динамического моделирования помогают лучше понять эволюцию промышленных экосистем, а также оптимизировать ресурсоориентированные подходы к развитию.

К механизмам обеспечения устойчивого развития можно отнести механизмы превентивные и нацеленные на снижение потенциально негативной роли растущей неустойчивости мировой экономической системы, т.н. проактивные и компенсационные [13].

Таким образом, успешное развитие промышленных экосистем требует постоянного управления их устойчивостью с учетом изменчивых факторов внешней и внутренней среды. Необходима адаптация стратегий управления, которые позволили бы поддерживать высокий уровень экономической эффективности и снижать риски и обеспечили бы своевременную реакцию на изменения в технологических условиях и экосистемных связях. Следовательно, важно сформировать алгоритмы управления, основанные на комплексных моделях, которые позволяют учитывать динамику взаимодействия участников промышленной экосистемы и обеспечивают гибкость в принятии решений. В следующем разделе авторами предложена математическая модель промышленных экосистем, которая позволяет одновременно учитывать эти аспекты.

Экономико-математическое моделирование промышленных экосистем в условиях динамично меняющейся среды. Промышленные экосистемы представляют собой взаимосвязанную сеть предприятий и организаций, где каждый элемент взаимодействует через обмен информацией и координацию действий. Сложная природа этих взаимодействий требует использования моделей, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и учитывать память о предыдущих действиях. Для описания обобщенной математической модели промышленной экосистемы может быть использовано агентное моделирование, которое учитывает динамику взаимодействий между участниками, их цели и способность принимать решения.

В агентной модели каждый участник промышленной экосистемы рассматривается как автономный агент, взаимодействующий с другими агентами и окружающей средой на основе заданных правил. Поведение агентов определяется внутренними состояниями, входными воздействиями и стратегиями.

Агентная модель может быть формализована следующим образом. Пусть имеется множество агентов:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_M\},$$

где M – общее количество агентов.

Каждый агент a_i характеризуется состоянием S_i , которое изменяется во времени:

$$S_i(t + 1) = F_i(S_i(t), X_i(t), \xi_i(t)),$$

где $X_i(t)$ – входные сигналы (информация или ресурсы от других агентов или внешней среды), $\xi_i(t)$ – случайные факторы, моделирующие неопределенность среды.

Выбор действия агента D_i определяется его текущим состоянием $S_i(t)$ и наблюдаемыми параметрами среды $E(t)$:

$$D_i(t) = G_i(S_i(t), E(t)).$$

Результаты действий одного агента могут влиять на других следующим образом:

$$X_{ij}(t) = H_{ij}(D_i(t)),$$

где $X_{ij}(t)$ – сигнал, передаваемый от агента a_i агенту a_j .

Взаимодействие агентов формирует сеть, где выходные действия одного агента становятся входными сигналами для других. Общая динамика промышленной экосистемы может быть описана следующим соотношением:

$$S(t + 1) = \Phi(S(t), D(t), E(t), \xi(t)),$$

где $S(t) = \{S_1(t), S_2(t), \dots, S_M(t)\}$, $D(t) = \{D_1(t), D_2(t), \dots, D_M(t)\}$, $\xi(t)$ – набор случайных факторов.

Экономическая интерпретация модели в агентном подходе включает несколько ключевых элементов. Состояние агента $S_i(t)$ отражает показатели его устойчивого развития в момент времени t . Входные сигналы $X_i(t)$ описывают воздействия или ресурсы, которые агент получает от других агентов или внешней среды. Выходные сигналы $D_i(t)$ являются результатом экономической активности агента, влияющей на других агентов, и отражают последствия взаимодействий для всей экосистемы.

Для анализа устойчивого развития промышленной экосистемы используются сценарии, учитывающие стохастические факторы. Одним из таких факторов являются случайные возмущения, которые моделируются как набор величин:

$$\xi(t) = \{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_M(t)\},$$

где каждая величина $\xi_i(t)$ отражает влияние рыночных, регуляторных или технологических изменений.

Оценка интегральной устойчивости системы осуществляется с помощью агрегированного показателя:

$$U(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_i(t).$$

В агентной модели для координации действий участников используется распределенный подход вместо детерминированного, присущего моделям конечных автоматов. Высокоуровневые агенты, например, головные компании, задают целевые показатели $C(t)$, которые оказывают влияние на стратегию других агентов. Стратегия каждого агента определяется как функция от его состояния $S_i(t)$, воздействия внешней среды $E(t)$ и целевых показателей $C(t)$, что описывается уравнением

$$D_i(t) = G_i(S_i(t), E(t), C(t)).$$

В данном контексте G_i представляет собой функцию, которая описывает стратегию агента i . Она определяет, как агент i выбирает свое действие $D_i(t)$ на основе его текущего состояния $S_i(t)$, воздействия внешней среды $E(t)$ и целевых показателей $C(t)$.

Агентная модель промышленной экосистемы может быть визуализирована в виде сети (рис. 1). Узлы (агенты) представляют собой участников

промышленной экосистемы, а связи – потоки информации или ресурсов. Стрелки указывают направления взаимодействия, отражая как координационные воздействия, так и обмен ресурсами. Выходные сигналы одного агента могут служить входными сигналами для других, что обеспечивает координацию их взаимодействия. Дополнительно агенты могут получать воздействие от внешней среды, влияющее на их поведение и цели.

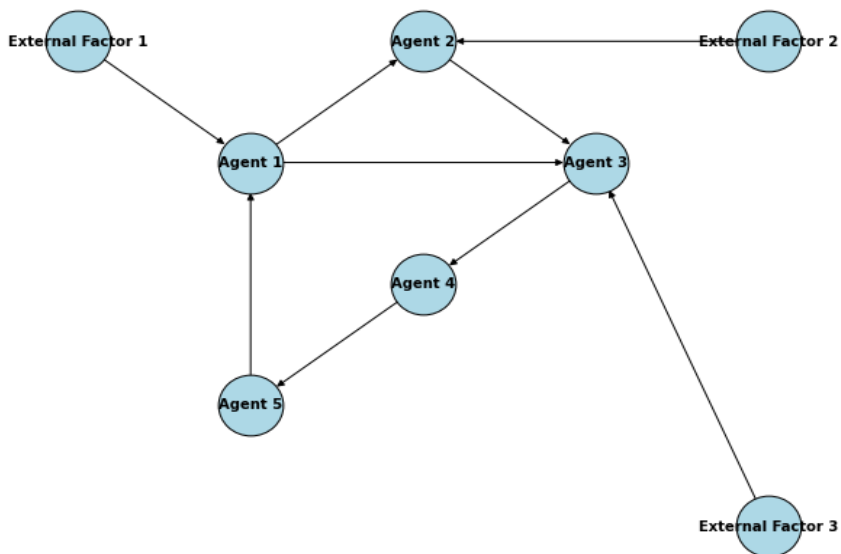


Рис. 1. Пример сети агентов промышленной экосистемы

Преимущество агентного подхода заключается в его гибкости, которая позволяет моделировать сложные взаимодействия и учитывать стохастические факторы, а также в адаптивности, поскольку агенты могут изменять свое поведение в ответ на изменения окружающей среды. Модель также обладает высокой масштабируемостью, что позволяет легко расширять ее на новые компоненты. Использование агентного моделирования предоставляет возможность проводить детальный анализ устойчивого развития промышленных экосистем, принимая во внимание динамично меняющиеся факторы, что делает этот подход особенно ценным для исследований в экономике и управлении.

Алгоритм принятия решений для управления промышленными экосистемами на основе математического моделирования. Проблема с оценкой исходных данных для проведения моделирования управления

устойчивым развитием промышленной экосистемы может быть решена с использованием специально созданной экспертной системы.

Экспертная система представляет собой программное обеспечение, включающее в себя базу знаний и позволяющее получать экспертное решение, основанное на заданных правилах вывода (экспертных знаний). Решения, получаемые с помощью экспертной системы, могут служить объективной оценкой нужных параметров для имитационной модели, которые полностью определяют ход математического моделирования процессов управления.

После проведения имитационного моделирования процессов управления развитием промышленной экосистемы мы получаем результаты реакции организационной системы на различные управляющие воздействия, на основании которых можно предложить определенные стратегические управленческие решения, направленные на повышение устойчивости и эффективности управления промышленными экосистемами.

Алгоритм принятия управленческих решений на основе математического моделирования представлен на рис. 2 и включает следующие этапы.

1. Определяется состав участников (агентов) промышленной экосистемы и строится ее структура для описания взаимосвязей между ее агентами.

2. Каждый участник промышленной экосистемы рассматривается как агент с состоянием, входными и выходными сигналами, действиями и функцией принятия решений.

3. Строится общая имитационная модель промышленной экосистемы на основе сети агентов, где каждый агент взаимодействует с другими, а выходные сигналы одного агента становятся входными для других. Данные взаимодействия характеризуют динамику экосистемы, обмен информацией и ресурсами.

4. Используются экспертные системы для моделирования различных сценариев, учитывающих случайные факторы, влияющие на действия агентов.

5. Оцениваются возможные стратегические решения для управления экосистемой, направленные на согласование действий агентов и достижение общих целей экосистемы.

6. Проводится имитационное моделирование с учетом случайных величин и стратегических решений. Моделируются воздействия внешней среды и случайных факторов, влияющих на действия агентов.

7. На основе результатов моделирования получаются статистические характеристики состояния агентов, включая изменения в их состояниях, действиях и взаимодействиях. Эти характеристики позволяют оценить текущее положение каждого участника в промышленной экосистеме.

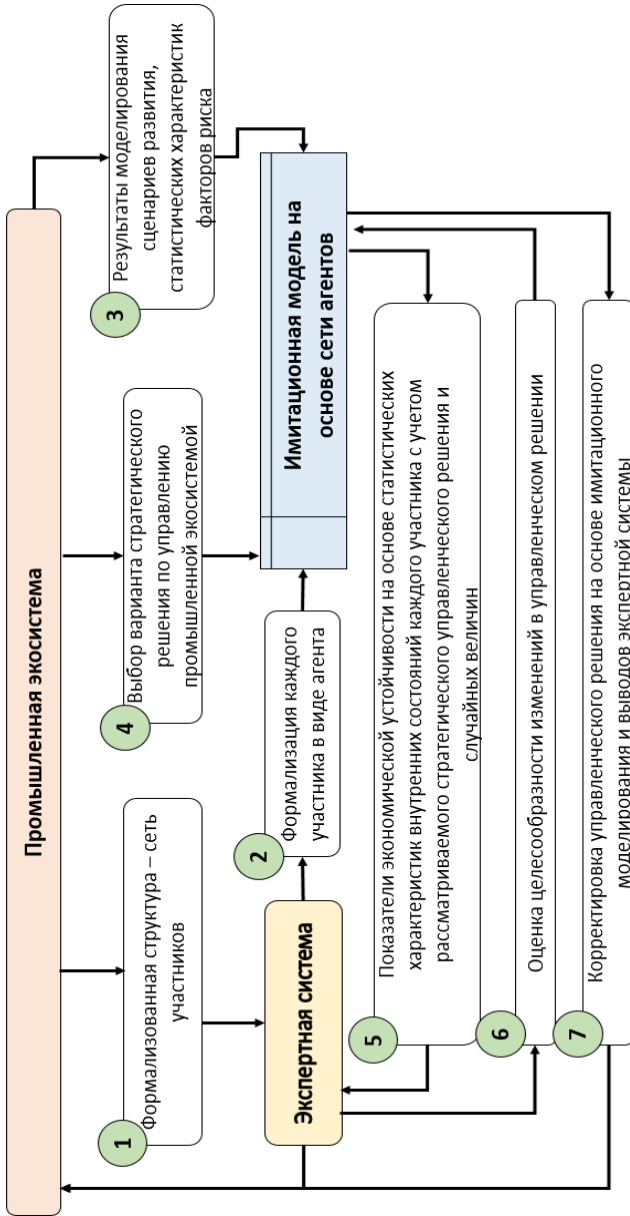


Рис. 2. Алгоритм принятия решений для управления промышленными экосистемами на основе математического моделирования

8. Определяются показатели экономической устойчивости промышленной экосистемы.

9. С помощью экспертных систем анализируется целесообразность корректировки выбранных стратегий и управленческих решений.

10. На основе выводов моделирования и экспертных систем уточняется управленческое решение и цели каждого агента.

Предложенная выше схема алгоритма по выработке и оценке стратегических управленческих решений может быть реализована в виде комплексной информационно-аналитической системы с использованием базы данных и базы знаний (как составляющей экспертной системы). При этом такая информационно-аналитическая система должна содержать следующие компоненты: интерфейс пользователя, модуль анализа данных, база данных, экспертная система и имитационная платформа.

Использование такой системы позволит проводить точные и объективные оценки реальной ситуации и прогнозировать состояние показателей устойчивого развития промышленной экосистемы при различных сценариях развития нестабильной ситуации, что даст возможность находить эффективные стратегические управленческие решения для обеспечения конкурентных преимуществ как для отдельных участников, так и для промышленной экосистемы в целом.

Заключение. В заключение отметим, что развитие промышленных экосистем требует внедрения инновационных подходов к управлению, основанных на математическом моделировании и имитационных методах анализа. Представленная модель управления с использованием сети автономных агентов позволяет учитывать специфику взаимодействия участников промышленной экосистемы и влияния факторов внешней и внутренней среды. Предложенный алгоритм принятия управленческих решений обеспечивает согласованность действий всех участников промышленной экосистемы, способствует достижению их экономической устойчивости и адаптации к изменяющимся условиям. Применение экспертных систем в сочетании с имитационным моделированием открывает возможности для прогнозирования и принятия эффективных стратегических решений. Создание комплексной информационно-аналитической системы управления позволит значительно повысить конкурентоспособность промышленных экосистем, укрепив их устойчивость и инновационный потенциал.

© Юдин А.В., Митяков Е.С., Карпухина Н.Н., Грошева П.Ю., 2025

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-78-10009).

Библиографический список

- [1] Lowe E., Evans L. Industrial ecology and industrial ecosystems // *Journal of Cleaner Production*. 1995. Vol. 3. P. 47-53. doi.org/10.1016/0959-6526(95)00045-G.
- [2] Adamides E., Mouzakis Y. Industrial ecosystems as technological niches // *Journal of Cleaner Production*. 2009. Vol. 17. P. 172-180. doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2008.04.003.
- [3] Korhonen J., Wihersaari M., Savolainen I. Industrial ecosystem in the Finnish forest industry: using the material and energy flow model of a forest ecosystem in a forest industry system // *Ecological Economics*. 2001. Vol. 39. P. 145-161. doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00204-X.
- [4] Ayres R.U. Creating industrial ecosystems: a viable management strategy? // *International Journal of Technology Management*. 2014. P. 608-624. doi.org/10.1504/IJTM.1996.025505.
- [5] Korhonen J., Snäkin J. Analysing the evolution of industrial ecosystems: concepts and application // *Ecological Economics*. 2005. Vol. 52. P. 169-186. doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2004.07.016.
- [6] Cote R., Hall J. Industrial parks as ecosystems // *Journal of Cleaner Production*. 1995. Vol. 3. P. 41-46. doi.org/10.1016/0959-6526(95)00041-C.
- [7] Kovalchuk J., Stepnov I. Managing industrial ecosystems in a united digital space // *Market economy problems*. 2022. doi.org/10.33051/2500-2325-2022-3-107-121.
- [8] Andreoni A. The architecture and dynamics of industrial ecosystems: diversification and innovative industrial renewal in Emilia Romagna // *Cambridge Journal of Economics*. 2018. doi.org/10.1093/CJE/BEY037.
- [9] Shkarupeta E., Dudareva O., Filatova M., Bekkiev A. Methodology for sustainable development of industrial ecosystems // *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021. doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-377-382.
- [10] Ashton W. Understanding the Organization of Industrial Ecosystems // *Journal of Industrial Ecology*. 2008. Vol. 12. doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00002.x.
- [11] Ruth M. Dynamic Modeling of Industrial Ecosystems // *Journal of Industrial Ecology*. 2009. Vol. 13. doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00186.x.
- [12] Fan J., Hu S., Chen D., Zhou Y. Study on the construction and optimization of a resource-based industrial ecosystem // *Resources Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 119. P. 97-108. doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2016.05.016.
- [13] Трындына Н.С. Компенсационные механизмы как инструменты приспособления общества к шокам социально-экономического развития // *Креативная экономика*. 2024. Т. 18. № 6. С. 1357-1374. doi: 10.18334/ce.18.6.121089.
- [14] Митяков С.Н., Митяков Е.С. Формирование промышленных экосистем как инструмент антикризисного управления // *Мир новой экономики*. 2024. Т. 18. № 3. С. 47-62. doi.org/10.26794/2220-6469-2024-18-3-47-62.

A.V. Yudin, E.S. Mityakov, N.N. Karpukhina, P.Yu. Grosheva

MANAGEMENT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL ECOSYSTEMS IN A DYNAMICALLY CHANGING ENVIRONMENT

MIREA – Russian Technological University
Moscow, Russia

Abstract. This article is dedicated to the issues of managing sustainable development of industrial ecosystems in the context of the dynamically changing external and internal environment. Industrial ecosystems are considered as complex networks of interconnected participants, including enterprises, research organizations and the other entities, working together to implement sustainable production processes and technologies. Sustainable development of industrial ecosystems is defined as a strategy aimed at creating and maintaining long-term stability in economic, environmental, and social spheres, as well as fostering active interaction among ecosystem participants, stimulating innovation, and achieving high digital maturity. The article presents the mathematical model and the algorithm for managing sustainable development of industrial ecosystems. The mathematical model, based on the agent-based approach, takes into account dynamics of interactions among ecosystem participants and the impact of the external environment on their actions. The decision-making algorithm, utilizing expert systems and simulation modeling, allows for evaluating different scenarios and developing effective strategies to enhance sustainability and competitiveness of ecosystems. The proposed tools can be used to create integrated information-analytical systems capable of effectively forecasting and managing development of industrial ecosystems, ensuring their adaptation to changing conditions and optimization in an unstable environment.

Keywords: industrial ecosystems, organizational-economic mechanism, reindustrialization, principles of reindustrialization.

References

- [1] Lowe, E., Evans, L. (1995). Industrial ecology and industrial ecosystems. *Journal of Cleaner Production*. pp. 47-53.
- [2] Adamides, E., Mouzakitidis, Y. (2009). Industrial ecosystems as technological niches. *Journal of Cleaner Production*. pp. 172-180.
- [3] Korhonen, J., Wihersaari, M., Savolainen, I. (2001). Industrial ecosystem in the Finnish forest industry: using the material and energy flow model of a forest ecosystem in a forest industry system. *Ecological Economics*. pp. 145-161.
- [4] Ayres, R.U. (2014). Creating industrial ecosystems: a viable management strategy? *International Journal of Technology Management*. pp. 608-624.
- [5] Korhonen, J., Snäkin, J. (2005). Analysing the evolution of industrial ecosystems: concepts and application. *Ecological Economics*. pp. 169-186.

-
- [6] Cote, R., Hall, J. (1995). Industrial parks as ecosystems. *Journal of Cleaner Production*. pp. 41-46.
- [7] Kovalchuk, J., Stepnov, I. (2022). Managing industrial ecosystems in a united digital space. *Market economy problems*.
- [8] Andreoni, A. (2018). The architecture and dynamics of industrial ecosystems: diversification and innovative industrial renewal in Emilia Romagna. *Cambridge Journal of Economics*.
- [9] Shkarupeta, E., Dudareva, O., Filatova, M., Bekkiev, A. (2021). *Methodology for sustainable development of industrial ecosystems*. Proceedings of Voronezh State University of Engineering Technologies. (Russian Translation).
- [10] Ashton, W. (2008). Understanding the Organization of Industrial Ecosystems. *Journal of Industrial Ecology*.
- [11] Ruth, M. (2009). Dynamic Modeling of Industrial Ecosystems. *Journal of Industrial Ecology*.
- [12] Fan, J., Hu, S., Chen, D., Zhou, Y. (2017). Study on the construction and optimization of a resource-based industrial ecosystem. *Resources Conservation and Recycling*. pp. 97-108.
- [13] Tryndina, N.S. (2024). [Compensatory mechanisms as tools for adapting society to shocks of socio-economic development]. *Kreativnaja jekonomika* [Creative Economy]. (In Russ).
- [14] Mityakov, S.N., Mityakov, E.S. (2024). [Formation of industrial ecosystems as a tool for crisis management]. *Mir novoj jekonomiki* [World of New Economy]. pp. 47-62. (In Russ).