

Роль природоподобных технологий в реализации устойчивого развития промышленных систем

Н.В. Барсегян  , А.И. Шинкевич  , Ф.Ф. Галимулина 

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, Республика Татарстан, Российская Федерация
 n.v.barsegyan@yandex.ru

Аннотация. В условиях санкционных ограничений современная макроэкономическая система России направлена на технологическое развитие, цифровизацию, устойчивое развитие и экологизацию производственно-экономических систем. Ключевая проблема функционирования экономических систем заключается в ограниченности ресурсов, которая определяет возникновение «узких» мест и очередей. Как следствие, это отражается на эффективности всей системы и ее конкурентоспособности. Одним из ключевых условий для достижения целей устойчивого развития видится освоение природоподобных технологий и их внедрение в промышленность. Целью исследования является определение теоретических аспектов природоподобных технологий, выявление их потенциала внедрения для достижения устойчивого развития промышленности. Проанализированы научные истоки концепции развития темы природоподобных технологий, даны определения категориям «природоподобные технологии», «природовдохновленные алгоритмы», «природовдохновленные системы». Обобщены принципы природоподобных технологий, способствующих достижению решения экологических проблем, ресурсной независимости, экономической эффективности, технологического развития. Рассмотрена трансформация традиционных производственных систем в мезосистемы по аналогии с природными экосистемами. Обосновано, что именно такой подход, лежащий в основе экономики замкнутого цикла, позволяет выйти за рамки внедрения отдельных «зеленых» технологий и добиться синергетического эффекта. В целях систематизации анализа предложена классификация природоподобных технологий и определены основные направления их использования в промышленности. Сделаны следующие выводы: внедрение природоподобных технологий дает измеримый и существенный эффект по трем направлениям устойчивого развития: 1) экономики – снижение затрат, создание новой стоимости; 2) экологии – сокращение выбросов, оптимизация ресурсов; 3) социальной сферы – создание безопасных условий труда и благоприятной среды для жизни и здоровья человека. Экономический эффект от внедрения природоподобных технологий является одним из ключевых драйверов их масштабирования. При принятии управленческих решений необходимо учесть, что внедрение природоподобных технологий – это стратегическая инвестиция в обеспечение конкурентоспособности мезосистемы и ее ресурсной независимости. На уровне высшего руководства страны необходимо разработать и внедрить меры стимулирования для проектов, реализующих принципы природоподобных технологий на системном уровне.

Ключевые слова: устойчивое развитие, промышленность, природоподобные технологии, производственные системы, экономика замкнутого цикла, «зеленые» технологии, мезосистемы

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан», соглашение № 109/2024-ПД.

Для цитирования: Барсегян Н.В., Шинкевич А.И., Галимулина Ф.Ф. Роль природоподобных технологий в реализации устойчивого развития промышленных систем. Экономика промышленности. 2025;18(4):486–498. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2025-4-1530>

The role of nature-like technologies in implementing sustainable development of industrial systems

N.V. Barsegyan  , A.I. Shinkevich  , F.F. Galimulina 

Kazan National Research Technological University,

68 Karl Marx Str., Kazan 420015, Republic of Tatarstan, Russian Federation

 n.v.barsegyan@yandex.ru

Abstract. Under the conditions of sanctions restrictions, Russia's modern macroeconomic system is aimed at technological development, digitalization, sustainable development and greening of production and economic systems. The key problem of the functioning of economic systems is the limited resources, which determines the emergence of "bottlenecks" and queues. As a result, this affects the efficiency of the entire system and its competitiveness. One of the key conditions for achieving the goals of sustainable development is the development of nature-like technologies and their introduction into industry. The purpose of the study is to identify the theoretical aspects of nature-like technologies, to identify their potential for implementation to achieve sustainable industrial development. The scientific origins of the concept of developing the topic of nature-like technologies are analyzed, and the categories "nature-like technologies", "nature-inspired algorithms", and "nature-inspired systems" are defined. The principles of nature-like technologies that contribute to solving environmental problems, resource independence, economic efficiency, and technological development are summarized. The transformation of traditional production systems into mesosystems by analogy with natural ecosystems is considered. It is proved that this approach, which underlies the closed-loop economy, allows us to go beyond the introduction of individual "green" technologies and achieve a synergistic effect. To systematize the analysis, a classification of nature-like technologies is proposed and the main directions of their use in industry are identified. The following conclusions are drawn: the introduction of nature-like technologies gives a measurable and significant effect in three areas of sustainable development: 1) economics – reducing costs, creating new value; 2) ecology – reducing emissions, optimizing resources; 3) social sphere – creating safe working conditions and a favorable environment for human life and health. The economic effect of the introduction of nature-like technologies is one of the key drivers of their scaling. When making managerial decisions, it is necessary to consider that the introduction of nature-like technologies is a strategic investment in ensuring the competitiveness of the mesosystem and its resource independence. At the level of the country's top leadership, it is necessary to develop and implement incentive measures for projects that implement the principles of nature-like technologies at the system level.

Keywords: sustainable development, industry, nature-like technologies, production systems, closed-loop economics, "green" technologies, mesosystems

Acknowledgements: The study was funded by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of sciences (postdocs) for the purpose of defending a doctoral dissertation, performing research work, as well as performing job functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan", agreement No. 109/2024-PD.

For citation: Barsegyan N.V., Shinkevich A.I., Galimulina F.F. The role of nature-like technologies in implementing sustainable development of industrial systems. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2025;18(4):486-498. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2025-4-1530>

类自然技术在工业系统可持续发展中的作用

N.V. 巴尔谢吉杨  , A.I. 申克维奇  , F.F. 加利穆利娜 

喀山国立研究型技术大学, 420015, 俄罗斯联邦鞑靼斯坦共和国喀山市卡尔·马克思大街68号

 n.v.barsegyan@yandex.ru

摘要: 在制裁背景下, 现代俄罗斯宏观经济体系侧重于技术发展、数字化、可持续发展以及生产和经济系统的生态化。经济系统运行的关键问题是资源制约, 它会导致瓶颈和排队现象的出现。进而影响整个系统的效率和竞争力。类自然技术的开发及其在工业中的应用被视为实现可持续发

展目标的关键条件。本研究旨在界定类自然技术的理论基础，并探索其在实现工业可持续发展中的应用潜力。本文分析了类自然技术发展概念的科学渊源，并对“类自然技术”、“自然启发式算法”和“自然启发式系统”等类别进行了定义。文章总结了类自然技术在解决环境问题、实现资源独立、提高经济效率和技术发展方面的原则。通过类比自然生态系统，探讨了将传统生产系统向中观系统转型的可能性。研究证明，正是这种以闭环经济为基础的方法，能够超越单一“绿色”技术的应用，实现协同效应。为了系统化分析，提出了类自然技术的分类，并确定了其在工业领域的主要应用方向。文章得出以下结论：类自然技术的应用在可持续发展的三个领域产生了可衡量的显著影响：1) 经济领域——降低成本，创造新价值；2) 生态领域——减少排放，优化资源利用；3) 社会领域——创造安全的工作条件和有利于人类生命健康的良好环境。实施类自然技术的经济效益是其规模化推广的关键驱动因素之一。在制定管理决策时必须考虑到，推广类自然技术是一项战略投资，旨在确保中观系统的竞争力及其资源独立性。在国家最高领导层面，有必要制定和实施激励措施，支持在系统层面实施类自然技术原则的项目。

关键词：可持续发展、工业、类自然技术、生产系统、闭环经济、绿色技术、中观系统

致谢：本研究由鞑靼斯坦共和国科学院资助，该资助给予青年副博士（博士后），用于支持他们的博士论文答辩、开展研究以及在鞑靼斯坦共和国科研和教育机构履行工作职责。该资助项目隶属于鞑靼斯坦共和国“鞑靼斯坦共和国科学技术发展”国家计划，协议编号为109/2024-PD。

Введение

Современная макроэкономическая система России (объединяет добычу ресурсов, обрабатывающую промышленность, сферу услуг) развивается под влиянием санкционных ограничений, но с сохранением фокуса на технологическом развитии, цифровизации, устойчивом развитии и экологизации производственно-экономических систем. Так, «Стратегией социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» (далее – Стратегия) задекларированы целевые значения экологических показателей к 2050 г.: 2521 млн т эквивалента углекислого газа согласно инерционному сценарию, или 1830 млн т эквивалента углекислого газа согласно целевому сценарию (относительно фактического значения – 2119 млн т эквивалента углекислого газа в 2019 г.)¹. Одной из доминант Стратегии обозначен «зеленый» курс, успех которого обусловлен интеграцией подсистем (технологии, кадры, институты, инфраструктура), инструментов (цифровые платформы, сетевые формы взаимодействия хозяйствующих субъектов), процессов (вдоль цепочки поставок, жизненного цикла продукции).

Также в России за 2019–2024 гг. был реализован национальный проект «Экология», который включал такие федеральные проекты, как «Чистая страна»; «Комплексная система обращения

с твердыми коммунальными отходами»; «Инфраструктура для обращения с отходами I–II классов опасности»; «Чистый воздух» (срок реализации продлен до 31 декабря 2026 г.); «Оздоровление Волги» и другие². За прошедший период удалось увеличить долю твердых коммунальных отходов, направленных на обработку и утилизацию – от 39,0 % в 2020 г. до 69,4 % в 2024 г., что превышает установленный план на 7,1 процентных пункта, сократить совокупный объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на 8,82% в 2024 г. по сравнению с 2022 г., сократить загрязненные стоки на 1,42 тыс. м³ за тот же период, улучшить экологическое состояние водохранилищ, улучшить экологические условия проживания населения³. Вместе с тем, достигнутый эффект национального проекта не является пропорциональным в пространственном отношении. Это обусловлено спецификой распределения природных ресурсов, неравномерной концентрацией экономической, научно-технологической и инновационной активности мезосистем, высокой межрегиональной дифференциацией по валовому региональному продукту (ВРП) на душу населения, ухудшением демографической обстановки в различных мезосистемах, переориентацией цепочек поста-

² Национальный проект «Экология»: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Режим доступа: https://www.mnr.gov.ru/activity/np_ecology/ (дата обращения: 03.08.2025).

³ Об итогах реализации Национального проекта «Экология» 2019–2024. Режим доступа: https://www.mnr.gov.ru/docs/np_ecology/250505_МПР_Итоги%20Экологии%2019-24гг.pdf (дата обращения: 03.08.2025).

вок, ростом геополитической напряженности⁴. Как следствие, различаются темпы развития, применяемые инструменты достижения целей устойчивого развития и состояние экологической обстановки в разных мезосистемах.

Современные экономические системы представляют собой сложную структуру, совокупность взаимосвязанных элементов, объединенных потоками ресурсов и информации, процессами и операциями. Ключевая проблема функционирования экономических систем заключается в ограниченности ресурсов, которая определяет возникновение «узких» мест и очередей. Это находит отражение в эффективности всей системы и ее конкурентоспособности. Одним из ключевых условий достижения целей устойчивого развития видится освоение природоподобных технологий и их внедрение в промышленность.

Таким образом, целью исследования является определение теоретических аспектов природоподобных технологий, выявление их потенциала и механизмов внедрения для достижения целей устойчивого развития в промышленности. Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие задачи:

- раскрыть сущность природоподобных технологий и дать их классификацию;
- проанализировать механизмы влияния природоподобных технологий на различные аспекты промышленности;
- определить барьеры и драйверы внедрения природоподобных технологий;
- определить направления развития природоподобных технологий в практической деятельности с целью достижения устойчивых целей развития промышленности.

Концепция природоподобных технологий: теоретические аспекты

Природоподобные технологии (*nature-like technologies*) (ППТ) – это технологии, имитирующие природные процессы, принимающие форму материальных объектов или систем, применяющиеся в промышленности в целях повышения энерго- и ресурсоэффективности экономической системы и улучшения экологических условий проживания населения. Таким образом, природные процессы и механизмы преобразованы как в ин-

струменты моделирования, так и в инструменты воспроизведения производственных систем. Природоподобные технологии являются новым подходом к организации систем, которые основываются на имитации принципам и стратегиям, выработанным природой за свою эволюцию.

Научным истоком концепции развития темы ППТ являются учения В.И. Вернадского о ноосфере [1; 2], которые базируются на разумной деятельности человека, являющейся ключевым фактором развития биосферы и обеспечивающей ее сохранение и устойчивое развитие. Основным принципом учений о ноосфере является гармоничное существование человека с природой, который подразумевает применение следующих постулатов: человек является частью биосферы, а не ее хозяином; преобразование природы и природных ресурсов должно быть разумным; необходимо уметь разумно управлять развитием биосферы. Сопоставляя данные постулаты с ППТ, можно провести следующую аналогию:

- такие технологии являются результатом глубокого изучения природы, цель которого понять и внедрить в деятельность принципы работы природных систем;
- они создают возможность встраивать процессы в природный круговорот, в отличие от традиционной линейной экономики, которая противоречит принципам биосферы;
- эти принципы выступают как инструмент управления развитием биосферы, который основан на соблюдении ее законов;
- применение ППТ является ответом на вызов экологического кризиса, к которому ведет техногенный путь (истощение ресурсов, загрязнение окружающей среды, изменение климата и т.д.).

В основе ППТ также лежат две фундаментальные концепции:

1. Концепция биомимикрии Джанин Бенюс (от греч. *bios* – жизнь и *mimesis* – подражание), сутью которой является «сознательное заимствование гениальных идей у природы для решения человеческих задач в области дизайна, инженерии и организации систем» [3]. Данная концепция базируется на трех уровнях подражания: 1) форме (точное копирование природной формы); 2) процессу (копирование природных процессов); 3) системе (копирование принципов организации экосистем).

2. Концепция *Cradle to Cradle* (C2C) («от колыбели до колыбели») Майкла Браунгарта и Уильяма Макдонаха, цель которой – «создавать продукты и системы, которые изначально спроектированы как положительные, а не просто менее вредные» [4]. Ключевым принципом данной концеп-

⁴ О стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 дек. 2024 г. № 4146-р. Режим доступа: https://www.economy.gov.ru/material/directions/regionale Razvitie/strategicheskoe_planirovanie_prostranstvennogo razvitiya/strategiya_prostranstvennogo razvitiya rossii do 2030 goda c prognozom do 2036 goda/ (дата обращения: 03.08.2025).

ции является идея о том, что отходы – это пища, т.е. изначально все материалы должны быть разработаны так, чтобы по окончании срока службы их эксплуатации, они могли стать «пищей» для другого нового цикла.

Проведем сравнительный анализ данных концепций (табл. 1).

Таким образом, данные концепции являются взаимодополняющими, отвечая на вопросы «как создавать эффективные решения, подсматривая у природы» (концепция биомимикрии) и «в какую систему интегрировать решения, чтобы они были экологически и социально эффективными, замыкая техносферные и биосферные циклы» (концепция Cradle to Cradle). Реализация данных концепций позволит осуществить переход к циркулярной экономике и ноосфере.

Фокус современных производственных систем на природных процессах обусловлен тем, что природа – это «устойчивая, ресурсоэффективная система, в которой материалы используются и перерабатываются по принципу циркулярной экономики» [5]. Достижению целей устойчивого развития способствуют такие подходы к формированию природоподобных систем, как системы замкнутого цикла, минимизация отходов, использование возобновляемых источников энергии (солнечные батареи, ветряные электростанции, гидрогенераторы [6–8]) и возобновляемых природных материалов [9], применение биомимикрии (или биомиметика) как способа изучения естественных систем для поиска новых разработок в экономических и технических системах [10–12] и др. Также примерами технологий, вдохновленных природой, являются инновации в области разработки полимеров [13], технология теплообменников, учитывающая фрактальную геометрию, контроль смачиваемости поверхности теплообменника и испарительное охлаждение [14], технология очистки воды на основе солнечной межфазной дистилляции [15],

технология естественного разрушения нефтяных загрязнений [16], природоподобные геотехнологии освоения недр [17]. В работах [18; 19] идея природоподобных систем раскрыта на примере городов в терминах городского метаболизма. Речь идет о системе, в которой город извлекает и перерабатывает ресурсы, а образующиеся отходы удаляют из системы в окружающую среду.

Стоит отметить, что ядром ППТ выступают природовдохновленные алгоритмы (*nature-inspired algorithms*). Такие алгоритмы – это вычислительные методы, вдохновленные поведением объектов охраны окружающей среды, применяемые в цифровой среде. Они имеют формат программного кода или математической модели, предназначены для оптимизации, автоматизации и прогнозирования поведения сложных технических систем. В свою очередь, фундаментальной базой для природовдохновленных алгоритмов и ППТ являются природовдохновленные системы – системы, развитие которых сфокусировано на заимствовании принципов, взаимосвязей, механизмов живой природы для формирования устойчивых (в том числе, «зеленых»), энерго- и ресурсоэффективных экономических систем.

Внедрение ППТ реализуется в рамках инновационной деятельности хозяйствующих систем, путем внедрения «зеленых» технологий, экологических инноваций. Ученые констатируют заметное влияние «зеленых» инноваций на цифровую активность экономических систем [20; 21], конкурентные преимущества организаций [22], обусловленность успеха «зеленой» трансформации открытой моделью инноваций [23], наличием разработанной стратегии «зеленых» инноваций [24]. Способность к внедрению «зеленых» технологий определяется лидерством компаний в области «зеленой» трансформации и экологической ориентацией (внутренняя – соответствующие стандарты и ценности в организации, внешняя – учет экологических требований партнеров и клиентов) [25; 26].

Таблица 1 / Table 1

Сравнительная характеристика концепций биомимикрии и Cradle to Cradle

Comparative characteristics of biomimicry and Cradle to Cradle concepts

Аспект	Биомимикрия	Cradle to Cradle
Фокус	Процесс проектирования и инноваций	Система проектирования и экономическая модель
Идея	Учиться у природы	Стать как природа
Масштаб	Применяется к отдельным продуктам, материалам и процессам	Применяется к системам: продуктам, знаниям, городам, бизнес-моделям
Связь	Предоставляет «идеи» – как природа решала бы эту задачу	Предоставляет «рамки» – как встроить эти идеи в экономику без отходов

Источник: составлено авторами с использованием [3; 4]

Source: compiled by the authors using [3; 4]

Таким образом, обзор научной литературы позволяет предположить превалирование трудов в области исследования микроэкономических систем и формирования природоподобных систем на уровне предприятий, производств, заводов, цехов. Это связано с тем, что в настоящее время еще не раскрыт в полной мере потенциал исследования ППТ и цифровизации на сохранение окружающей среды на уровне мезоэкономических систем.

Принципы и классификация природоподобных технологий

Природоподобные технологии предусматривают комплексный подход к переходу от линейной к циркулярной экономике. Несмотря на то, что системное внедрение ППТ (при котором требуется перестраивание работы целых отраслей и инфраструктуры, а не только отдельных предприятий) сталкивается со многими вызовами и ограничениями в силу сложности процессов подражания природным системам, необходимости владения междисциплинарными знаниями,

трудоемкости и значительных инвестиций, оно является основой создания промышленной экосистемы. Внедрение ППТ – это стратегический путь к созданию такой промышленности, которая характеризуется энергоресурсоэффективностью, безотходностью, устойчивостью, адаптивностью, инновационностью, конкурентоспособностью.

Достижение решения экологических проблем, ресурсной независимости, экономической эффективности, технологического развития становится возможным благодаря ряду принципов, на которых опираются природовдохновленные алгоритмы и ППТ (табл. 2).

Таким образом, системное внедрение ППТ в промышленности будет способствовать:

- снижению стоимости сырья, сокращению платы за утилизацию отходов, повышению устойчивости кластера;
- снижению зависимости от первичных ресурсов, превращая отходы в ценное сырье;
- созданию новых рынков и бизнес-моделей;
- созданию новых продуктов с высококачественными характеристиками;

Таблица 2 / Table 2

Ключевые принципы природоподобных технологий

Key principles of nature-like technologies

Принцип	Содержание	Примеры
Принцип подражания (биомимикрии), или принцип биодохновленного дизайна	Сознательное заимствование идей у природы для решения задач человека в области дизайна, инженерии и организации систем	Форма японского скоростного поезда Shinkansen (аналогия с клювом зимородка во избежание звукового удара при выезде из туннеля); прочные и легкие конструкции в авиа- и автомобилестроении (геометрия сот); самоочищающиеся покрытия для фасада зданий, тканей (эффект лотоса); покрытие для корпусов судов и купальных костюмов для снижения сопротивления воды (кожа акулы)
Принцип безотходности (цикличности, замкнутые циклы)	Все «отходы» одной системы являются «пищей» или ресурсом для другой системы	Модель «Промышленного симбиоза» в г. Калундборг (Дания) (отходы одних предприятий – тепло, углекислый газ – становятся сырьем для других предприятий при выращивании растений)
Принцип энергетической эффективности и использования возобновляемых источников	Все процессы оптимизированы в целях минимизации энергозатрат (энергия солнца, ветра, воды и т.д.)	Солнечные батареи и фотосинтез, водородная энергетика, пассивное охлаждение/обогрев
Принцип адаптивности, устойчивости и самовосстановления	Способность системы адаптироваться к изменениям и восстанавливаться после нарушений аналогично природным экосистемам	Самовосстанавливающиеся материалы (полимеры, которые срашиваются; бетон с бактериями, которые перекрывают трещины); адаптивные конструкции; устойчивые агросистемы
Принцип оптимальности и многофункциональности	Один элемент системы выполняет несколько функций	«Умные» материалы и покрытия (покрытие, которое генерирует энергию (солнечная панель), самоочищается (как лист лотоса), регулирует температур)
Принцип самоорганизации (эмержентности)	Создание систем, способных к самоорганизации и возникновению новых свойств, не присущих отдельным элементам системы	«Роевой» интеллект в логистике для оптимизации маршрутов доставки

- снижению энергопотребления;
- повышению устойчивости и надежности снабжения, оптимизации затрат, интеграции возобновляемых источников энергии и др.

В целях систематизации анализа предложена следующая классификация ППТ (рис. 1).

Классификация ППТ является основой для формирования стратегий научно-технологического развития на разных уровнях управления, структурируя знания, позволяя определить цели и приоритеты для развития отраслей промышленности и экономики в целом, а также разработать критерии для оценки воздействия и зрелости технологий, выявляя барьеры и точки роста. Для того чтобы принимать взвешенные управленческие решения на микро-, мезо- и макро-

уровнях, необходимо иметь понимание: какой уровень воздействия на экономику и экологию оказывают ППТ, так как технологии замкнутого цикла на разных уровнях имеют абсолютно разный масштаб эффекта, на какой стадии разработки или внедрения находятся технологии, какой потенциал для масштабирования имеют технологии, в каких сегментах сосредоточено больше всего разработок, какие технологические и нормативные барьеры могут существовать и т.д. Всесторонняя классификация ППТ является эффективным инструментом трансформации локальных «зеленых» инноваций в управляемую систему для выполнения целей устойчивого развития и отражает экологическую, экономическую и инновационную ценность реализации проекта.

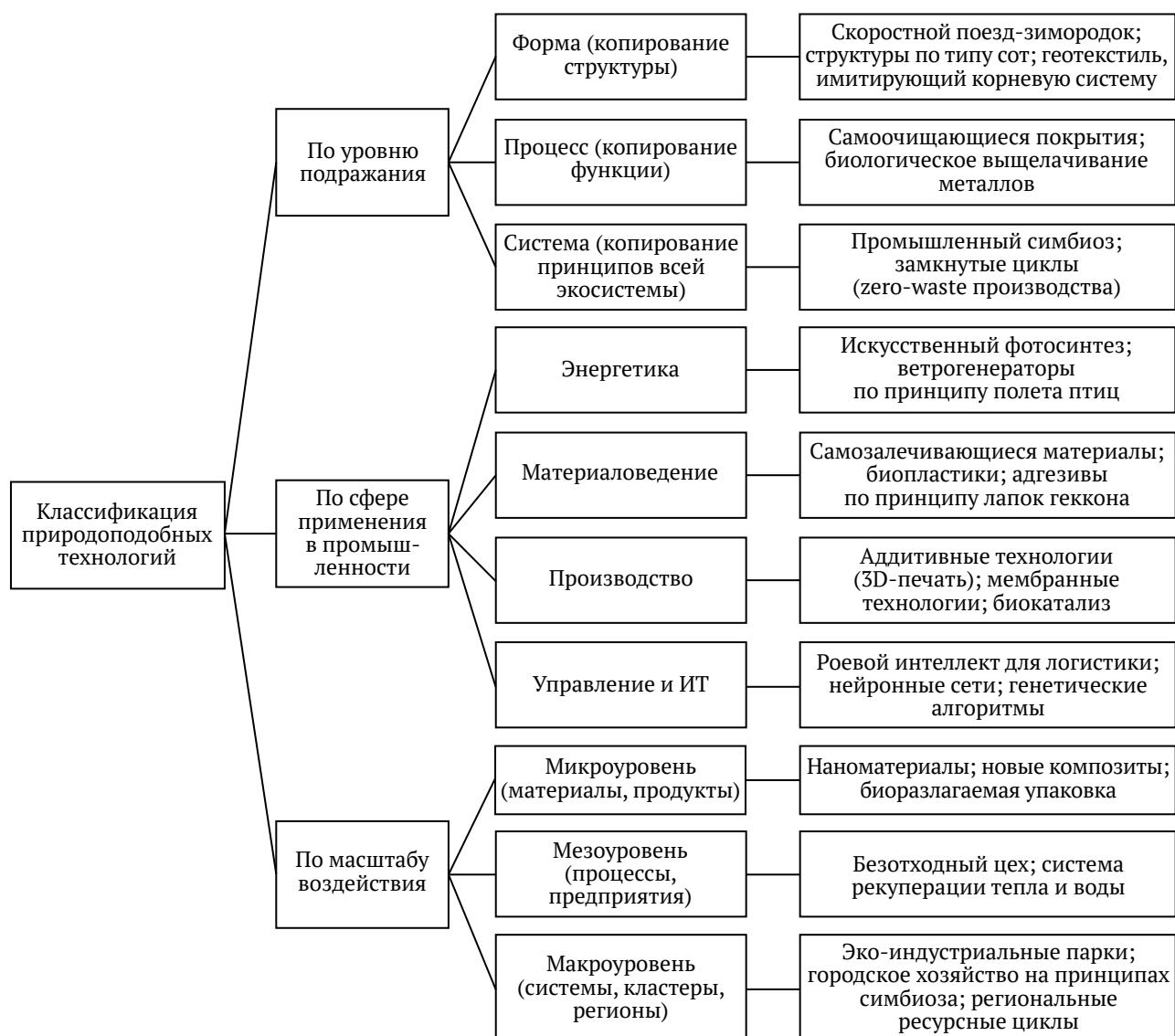


Рис. 1. Классификация природоподобных технологий

Fig. 1. Classification of nature-like technologies

Направления реализации природоподобных технологий в промышленности

Когда экономические и технические системы требуют решения сложных, нелинейных задач, природодохновленные алгоритмы и технологии позволяют решить многие научно-технические проблемы.

Сфера применения интеллектуальных методов оптимизации достаточно широка и охватывает сферы добычи природных ресурсов, обрабатывающей промышленности, логистики и управления цепями поставок. Среди частных примеров, которые находят отражение в работах ряда ученых, можно выделить следующие:

- планирование производственных процессов в рамках функционирования промышленных систем [27–29];

- разработка правил диспетчеризации в интеллектуальных производственных системах обрабатывающей промышленности [30];

- материально-техническое обеспечение интеллектуального производства [31];

- оптимальное распределение ресурсов в непрерывных производствах [32];

- минимизация энергопотребления при планировании производственных процессов в промышленности [33; 34];

- определение места размещения скважин в залежах газа [35];

- управление данными в отраслях обрабатывающей промышленности [36];

- идентификация неизвестных источников загрязнения подземных вод [37];

- контроль сточных вод в гальваническом производстве [38];

- управление химическими реакциями [39].

Аналитический инструментарий в промышленности использует различные природодохновленные алгоритмами. Широко распространенным инструментом оптимизации является «роевой» интеллект, описывающий коллективное поведение самоорганизующейся системы. Его целесообразно применять в случае решения сложных, нелинейных, многомерных задач. «Роевой» интеллект имитирует:

- коллективное поведение муравьев, которые ищут кратчайший путь; области применения – решение транспортной задачи, задачи коммивояжера, проектирование трассы трубопровода, межклластерное взаимодействие мезосистем, оптимизация работы параллельных машин, балансировки сборочной линии, построения конфигурации сети мониторинга качества воздуха и т.д.;

- стаи птиц или косяки рыб, которые обмениваются информацией и двигаются к опти-

мальному решению в поисках пищи; пример применения – оптимизация параметров производственных процессов;

- поведение занятых пчел, пчел-наблюдателей и пчел-разведчиков при сборе нектара; пример применения – логистика, оптимизация энергоснабжения;

- поведение светлячков, направляющихся к более ярким особям; пример применения – сеть уличного освещения «Умный город»;

- эхолокацию летучих мышей; пример применения – прогнозирование электрической нагрузки, выработка ветровой энергии, робототехника и др.;

- иерархию в стае волков – альфа, бета, дельта, омега; пример применения – оптимизация распределения водных ресурсов, прогнозирование цены на углеродные единицы и т.д.

Помимо перечисленных оптимизационных алгоритмов, вдохновленных природой, большой популярностью пользуются автоматизированные нейронные сети, доказавшие свою эффективность в задачах регрессии и классификации, что является перспективным направлением будущих исследований.

Для понимания концепции ППТ и их практического применения целесообразно выделить три иерархических уровня реализации – на микро-, мезо- и макроуровне. Эта система отражает саму организацию жизни, от молекулярных механизмов до глобальных экосистем, и позволяет проследить, как фундаментальные открытия превращаются в новую техносферу.

Фундаментом является микроуровень – уровень материалов и молекул – здесь происходит прямое копирование или вдохновение биологическими принципами, молекулярными структурами и наноразмерными механизмами. Фокус сосредоточен на создании принципиально новых материалов, обладающих свойствами, недостижимыми для традиционных аналогов. Сюда относятся технологии молекулярной самосборки, имитирующие формирование клеточных мембран или вирусных капсул, и создание биомиметических катализаторов, которые, подобно ферментам, проводят химические реакции с невероятной эффективностью и селективностью. Успех на микроуровне измеряется созданием «умного» материала, способного самостоятельно восстанавливаться, адаптироваться к среде или выполнять заданную функцию благодаря своей внутренней, позаимствованной у природы структуре.

Функциональным составляющим выступает мезоуровень – уровень устройств и процессов.

Здесь происходит сборка «умных» материалов в работающие устройства и технологические процессы. Мезоуровень – это уровень функциональной биомиметики, где на первый план выходит не структура, а принцип действия живых систем. Здесь создаются автономные, энергоэффективные и безотходные системы, аналогичные по своей логике отдельным организмам или их органам.

Целостный организм создается на макроуровне – уровень систем и техносферы. Здесь отдельные устройства и процессы интегрируются в единое целое, формируя техносферу, гармонично встроенную в биосферу планеты. Фокус смещается с создания отдельных компонентов на проектирование сетей, связей и потоков вещества, энергии и информации. Это уровень промышленного симбиоза, где заводы образуют экосистему, и отходы одного предприятия становятся сырьем для другого. Это концепция «умных» энергосетей (*Smart Grid*), которые, подобно природным сообществам, являются децентрализованными, устойчивыми и способны гибко перераспределять энергию от миллионов возобновляемых источников.

Важно подчеркнуть, что эти три уровня неразрывно связаны. Прорыв на микроуровне, например в области новых катализаторов, дает жизнь устройствам мезоуровня, таким как эффективные бионические листья. Эти устройства, в свою очередь, становятся элементами макроуровневой энергетической системы. Одновременно глобальные вызовы и цели, поставленные на макроуровне (например, необходимость полного перехода к циркулярной экономике), определяют вектор для исследований и разработок на микро- и мезоуровне.

Если в классическом понимании эффективность определяется как максимизация прибыли при минимизации прямых затрат, то в случае с оценкой эффективности ППТ, она означает способность создавать максимальную ценность (экономическую, социальную, экологическую) при минимальном нанесении ущерба природному капиталу и максимальном повышении системной устойчивости. Мера способности технологий превращать линейную экономику в циклическую, негэнтропийную, способствуя переходу техносферы к устойчивой природной экосистеме, является степенью их соответствия принципам бионики и замкнутости природных систем.

Для наглядности эффективности системного внедрения природовдохновленных алгоритмов и ППТ обобщим ряд практических примеров [40–43] (табл. 3).

Таким образом, внедрение ППТ дает измеримый и существенный эффект по трем направлениям устойчивого развития:

- 1) экономики – снижение затрат, создание новой стоимости;
- 2) экологии – сокращение выбросов, оптимизация ресурсов;
- 3) социальной сферы – создание безопасных условий и благоприятной среды.

Заключение

В проведенном исследовании проанализировано воздействие природоподобных технологий на развитие производственных систем. Можно утверждать, что формированию ППТ способствуют:

- 1) наилучшие доступные технологии и «зеленые» технологии;
- 2) экологические инновации, основанные на переходе к возобновляемым источникам энергии, возобновляемым, безопасным материалам, экономике замкнутого цикла;
- 3) цифровые технологии, позволяющие повысить точность проектирования производственных систем (цифровой инжиниринг), обеспечить мониторинг экологических параметров, автоматизировать процессы и системы, повысить качество прогнозирования за счет анализа больших данных, искусственного интеллекта, машинного обучения и т.д.;
- 4) регуляторные инструменты, стимулирующие внедрение природоподобных технологий (нормативно-правовые акты, финансовые инструменты, административные меры).

К принципам формирования современных природоподобных систем (ППС) относятся: экономическая, техническая и экологическая эффективность; цикличность материального потока и минимизация отходов; гибкость, адаптивность и устойчивость; децентрализация; цифровизация.

Природовдохновленные алгоритмы применяются в прогнозировании инновационного развития мезосистем, организации цепей поставок и решении логистических задач, для моделирования аддитивного производства в условиях цифровой трансформации, моделирования «зеленого» производства, повышения надежности производственных систем на основе выявления потенциальных сбоев.

Природоподобные технологии представляют собой системную парадигму в достижении устойчивых целей в промышленности, что обусловлено следующими утверждениями:

- такие технологии трансформируют суть производственных процессов и приводят к по-

ложительному экологическому, экономическому и социальному воздействию;

– эффект от внедрения ППТ носит синергетический и мультиплексивный эффект;

– технологии способствуют долгосрочному устойчивому развитию.

Проведенное исследование показало, что экономический эффект от внедрения ППТ является одним из ключевых драйверов их масштабирования, в то время как многие ученые фокусируются только на экологических аспектах природоподобных технологий.

При принятии управленческих решений необходимо учесть, что внедрение ППТ – это не статья затрат (в частности, экологических), а стратегическая инвестиция в обеспечение своей конкурентоспособности и ресурсной независимости. Учитывая, что на пути внедрения ППТ существует ряд ограничений и барьеров, таких как

технологические, инфраструктурные, рыночные, экономические, институциональные, когнитивные, кадровые, на уровне высшего руководства необходимо разработать и внедрить меры стимулирования для проектов, реализующих принципы ППТ на системном уровне.

В качестве будущих исследований планируется выявить причины слабого относительно цифровых технологий влияния экологических инноваций на развитие природовдохновленных систем, провести лонгитюдный анализ развития природовдохновленных макро- и мезосистем с учетом модернизации технологий и совершенствования структуры статистической информации, разработать количественные показатели и методики оценки эффективности внедрения природоподобных технологий, выходящих за рамки классических ключевых показателей эффективности.

Таблица 3 / Table 3

Примеры внедрения природоподобных технологий и эффект от реализации проекта

Examples of the introduction of nature-like technologies and the effect of the project

Пример	Суть проекта	Эффект
Биомимикрия в авиации – копирование форм	Инженеры компании Airbus изучили строение крыльев хищных птиц и спроектировали законцовки их крыльев для создания крыльев самолета	<ul style="list-style-type: none"> – снижение аэродинамического сопротивления около 5–6 %; – уменьшение расхода топлива на 3,5 % на весь полет; – сокращение выбросов CO₂ на 3,5 %; – снижение шума за счет улучшенной аэродинамики
Промышленный симбиоз в Калундборге (Дания) – копирование экосистемы	Группа предприятий организовала замкнутую систему, в которой побочные продукты (отходы) одного производства становятся сырьем для другого	<ul style="list-style-type: none"> – экономия воды 3 млн м³ за счет многократного использования и рециклинга; – сокращение выбросов CO₂ до 275 т за счет замены ископаемого топлива; – получение серы как побочного продукта процесса очистки отходящих газов и повторное ее использование химическими и агрехимическими предприятиями (280 т). Экономический эффект составил более 100 млн долл. США ежегодного дохода для участников кластера за счет продажи побочных продуктов и снижения затрат на утилизацию и покупку сырья
Биологическое выщелачивание металлов – копирование процесса	Использование специальных бактерий для извлечения цветных и драгоценных металлов (медь, золото, цинк) из бедных руд или отвальных пород вместо энергоемкого пирометаллургического процесса	<ul style="list-style-type: none"> – снижение энергопотребления на 30–50 % по сравнению с традиционными методами плавки; – практически полное отсутствие выбросов SO₂ (сернистого ангидрида), который является основным загрязнителем при плавке; – экономически выгодная переработка бедного сырья с содержанием металла на 30–50 % ниже, чем требуется для традиционных методов; – эффективность извлечения может достигать 90 %
Система рекуперации тепла (по принципу кровообращения) – копирование процесса	На производственных предприятиях тепло от охлаждения оборудования или печей улавливается и перенаправляется для отопления помещений или подогрева воды в других технологических процессах	<ul style="list-style-type: none"> – экономия энергии на отопление до 60–80 % от потребностей предприятия; – сокращение выбросов CO₂ на 500–5000 т/год в зависимости от масштаба производства; – срок окупаемости системы 2–5 лет за счет экономии на энергоносителях

Список литературы / References

1. Вернадский В.И. *Научная мысль как планетное явление*. Отв. ред. А.Л. Яншин. М.: Наука; 1991. 270 с.
2. Казначеев В.П. Учение В.И. Вернадского о носфере в связи с современными проблемами экологии человека. *Ноосферные исследования*. 2023;(4):6–16. <https://doi.org/10.46724/NOOS.2023.4.06-16>
Kaznacheev V. P. V. I. Vernadsky's Theory of the Noosphere in Relation to Contemporary Human Ecology Issues. *Noospheric Studies*. 2023;4:6–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.46724/NOOS.2023.4.06-16>
3. Benyus J.M. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: William Morrow; 1997. 288 p.
4. McDonough W., Braungart M. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. New York: North Point Press; 2002. 193 p.
5. Chin M.H.W., Linke J., Coppens M.-O. Nature-inspired sustainable medical materials. *Current Opinion in Biomedical Engineering*. 2023;28:100499. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2023.100499>
6. Dao V.-D., Nguyen H.T.K. Nature-inspired design for high-efficiency solar-driven water evaporation. *Journal of Power Sources*. 2024;609:234676. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234676>
7. Gaitan N.C., Ungurean I., Corotinschi G., Roman C. An intelligent energy management system solution for multiple renewable energy sources. *Sustainability*. 2023;15(3):2531. <https://doi.org/10.3390/su15032531>
8. Bertaglia T., Costa C.M., Lanceros-Méndez S., Crespilho F.N. Eco-friendly, sustainable, and safe energy storage: a nature-inspired materials paradigm shift. *Materials Advances*. 2024;5(19):7534–7547. <https://doi.org/10.1039/d4ma00363b>
9. Meshalkin V., Akhmetov A., Lenchenkova L., Nzioka A., Politov A., Strizhnev V., Telin A., Fakhreeva A. Application of renewable natural materials for gas and water shutoff processes in oil wells. *Energies*. 2022;15(23):9216. <https://doi.org/10.3390/en15239216>
10. Selvam D.C., Devarajan Y. Bio-inspired hybrid materials for sustainable energy: Advancing bioresource technology and efficiency. *Materials Today Communications*. 2025;46:112647. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112647>
11. Oguntola O. Developing a nature-inspired sustainability assessment tool: The role of materials efficiency. *Materials Proceedings*. 2025;22(1):3. <https://doi.org/10.3390/materproc2025022003>
12. Lebdioui A. Nature-inspired innovation policy: Biomimicry as a pathway to leverage biodiversity for economic development. *Ecological Economics*. 2022;202:107585. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107585>
13. Prathumrat P., Likitaporn C., Rimdusit S., Nikzad M., Wongsalam T., Tanalue N., Okhawilai M. Deep Insights into the design of next-generation water-based stimuli-responsive shape memory polymers: From fundamentals to nature-inspired innovations. *Applied Materials Today*. 2025;44:102754. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2025.102754>
14. Huang Z., Hwang Y., Radermacher R. Review of nature-inspired heat exchanger technology. *International Journal of Refrigeration*. 2017;78:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.03.006>
15. Xu Y., Zhang Q., Liang Y., Huang L. A review of solar interfacial distillation water purification technology inspired by nature. *Journal of Water Process Engineering*. 2023;55:104156. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104156>
16. Gertsen M.M., Perelomov L.V., Arlyapov V.A., Atroshchenko Y.M., Meshalkin V.P., Chistyakova T.B., Reverberi A.P. Degradation of oil and petroleum products in water by bioorganic compositions based on humic acids. *Energies*. 2023;16(14):5320. <https://doi.org/10.3390/en16145320>
17. Trubetskoi K.N., Galchenko Y.P. Naturelike mining technologies: Prospect of resolving global contradictions when developing mineral resources of the lithosphere. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2017;87:378–384. <https://doi.org/10.1134/S1019331617040050>
18. Quintero A., Zarzavilla M., Tejedor-Flores N., Mora D., Chen Austin M. Sustainability assessment of the anthropogenic system in panama city: Application of biomimetic strategies towards regenerative cities. *Biomimetics*. 2021;6(4):64. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6040064>
19. Musango J.K., Currie P., Robinson B. *Urban metabolism for resource efficient cities: From theory to implementation*. Paris: UN Environment; 2017.
20. Tan X., Jiao J., Jiang M., Chen M., Wang W., Sun Y. Digital policy, green innovation, and digital-intelligent transformation of companies. *Sustainability*. 2024;16(16):6760. <https://doi.org/10.3390/su16166760>
21. Luo S., Yimamu N., Li Y., Wu H., Irfan M., Hao Y. Digitalization and sustainable development: How could digital economy development improve green innovation in China? *Business Strategy and the Environment*. 2023;32(4):1847–1871. <https://doi.org/10.1002/bse.3223>
22. Zhu Y., Zhang H., Siddik A.B., Zheng Y., Sobhani F.A. Understanding corporate green competitive advantage through green technology adoption and green dynamic capabilities: Does green product innova-

- tion matter? *Systems*. 2023;11(9):461. <https://doi.org/10.3390/systems11090461>
23. Yang J.Y., Roh T. Open for green innovation: From the perspective of green process and green consumer innovation. *Sustainability*. 2019;11(12):3234. <https://doi.org/10.3390/su11123234>
24. Sun Y., Sun H. Green innovation strategy and ambidextrous green innovation: The mediating effects of green supply chain integration. *Sustainability*. 2021;13(9):4876. <https://doi.org/10.3390/su13094876>
25. Ozgul B. Does green transformational leadership develop green absorptive capacity? The role of internal and external environmental orientation. *Systems*. 2022;10(6):224. <https://doi.org/10.3390/systems10060224>
26. Shinkevich A.I., Barsegyan N.V., Galimulina F.F. Measuring and forecasting the development concept of the “Green” macrosystem using data analysis technologies. *Sustainability*. 2024;16(24):11152. <https://doi.org/10.3390/su162411152>
27. Momenikorbekandi A., Kalganova T. Intelligent scheduling methods for optimisation of job shop scheduling problems in the manufacturing sector: A systematic review. *Electronics*. 2025;14(8):1663. <https://doi.org/10.3390/electronics14081663>
28. Rao R.V., Davim J.P. Single, multi-, and many-objective optimization of manufacturing processes using two novel and efficient algorithms with integrated decision-making. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2025;9(8):249. <https://doi.org/10.3390/jmmp9080249>
29. Galimulina F.F., Barsegyan N.V. Application of mass service theory to economic systems optimization problems – A review. *Mathematics*. 2024;12:403. <https://doi.org/10.3390/math12030403>
30. Zhang L., Hu Y., Tang Q., Li J., Li Z. Data-driven dispatching rules mining and real-time decision-making methodology in intelligent manufacturing shop floor with uncertainty. *Sensors*. 2021;21(14):4836. <https://doi.org/10.3390/s21144836>
31. Bányai T. Optimization of material supply in smart manufacturing environment: A metaheuristic approach for matrix production. *Machines*. 2021;9(10):220. <https://doi.org/10.3390/machines9100220>
32. Massim Y., Yalaoui F., Chatelet E., Yalaoui A., Zebalah A. Efficient immune algorithm for optimal allocations in series-parallel continuous manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2012;23:1603–1619. <https://doi.org/10.1007/s10845-010-0463-7>
33. Para J., Del Ser J., Nebro A.J. Energy-aware multi-objective job shop scheduling optimization with metaheuristics in manufacturing industries: A critical survey, results, and perspectives. *Applied Sciences*. 2022;12(3):1491. <https://doi.org/10.3390/app12031491>
34. Gao K., Huang Y., Sadollah A., Wang L. A review of energy-efficient scheduling in intelligent production systems. *Complex & Intelligent Systems*. 2020;6:237–249. <https://doi.org/10.1007/s40747-019-00122-6>
35. Islam J., Mamo Negash B., Vasant P.M., Ishtiaque Hossain N., Watada J. Quantum-based analytical techniques on the tackling of well placement optimization. *Applied Sciences*. 2020;10(19):7000. <https://doi.org/10.3390/app10197000>
36. Kumar A., Jaiswal A. A deep swarm-optimized model for leveraging industrial data analytics in cognitive manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021;17(4):2938–2946. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3005532>
37. Guneshwor L., Eldho T.I., Vinod Kumar A. Identification of groundwater contamination sources using meshfree rpcm simulation and particle swarm optimization. *Water Resources Management*. 2018;32:1517–1538. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1885-1>
38. Goulart D.A., Pereira R.D. Autonomous pH control by reinforcement learning for electroplating industry wastewater. *Computers & Chemical Engineering*. 2020;140:106909. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106909>
39. Sakharov M., Koledina K., Gubaydullin I., Karpenko A. Studying the efficiency of parallelization in optimal control of multistage chemical reactions. *Mathematics*. 2022;10(19):3589. <https://doi.org/10.3390/math10193589>
40. Chertow M.R. Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*. 2000;25(1):313–337. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>
41. Jacobsen N.B. Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assessment of economic and environmental aspects. *Journal of Industrial Ecology*. 2006;10(1-2):239–255. <https://doi.org/10.1162/108819806775545411>
42. Gamage A., Dayaratne R. Learning from nature: towards a research-based biomimicry approach to ecologically sustainable design (ESD). *Conference: Sustainability through biomimicry: Discovering a world of solutions inspired by nature: College of Design, Dammam University*. 2012;17.
43. Benachio G.L.F., Freitas M.C.D., Tavares S.F. Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2020;260:121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>

Информация об авторах

Наира Вартовна Барсегян – канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры логистики и управления, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, Республика Татарстан, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1170-1251>; e-mail: n.v.barsegyan@yandex.ru

Алексей Иванович Шинкевич – д-р экон. наук, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой логистики и управления, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, Республика Татарстан, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1881-4630>; e-mail: ShinkevichAI@corp.knrtu.ru

Фарида Фидайлова Галимулина – д-р экон. наук, доцент, профессор кафедры логистики и управления, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, Республика Татарстан, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5875-1988>; e-mail: GalimulinaFF@corp.knrtu.ru

Information about the authors

Naira V. Barsegyan – PhD (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logistics and Management, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx Str., Kazan 420015, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1170-1251>; e-mail: n.v.barsegyan@yandex.ru

Aleksei I. Shinkevich – Dr.Sci. (Econ.), Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Logistics and Management, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx Str., Kazan 420015, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1881-4630>; e-mail: ShinkevichAI@corp.knrtu.ru

Farida F. Galimulina – Dr.Sci. (Econ.), Associate Professor, Professor of the Department of Logistics and Management, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx Str., Kazan 420015, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5875-1988>; e-mail: GalimulinaFF@corp.knrtu.ru

Поступила в редакцию 08.09.2025; поступила после доработки 09.11.2025; принятa к публикации 10.11.2025

Received 08.09.2025; Revised 09.11.2025; Accepted 10.11.2025