



ISSN 2782-6333

**SUSTAINABLE
DEVELOPMENT
and
ENGINEERING
ECONOMICS**

03
2025

Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Главный редактор: Ирина Андреевна Рудская (Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Альберто Трон (Университет Боккони, Милан, Италия)
Алексей Быков (Белорусский государственный экономический университет, Минск, Республика Беларусь)
Алексей М. Гинцjak (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)
Алла Г. Кравец (Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия)
Эндрю А. Алола (Стамбульский университет Гелисим, Стамбул, Турция)
Анги Е. Схведиани (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия)
Артурас Каклаускас (Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса, Литва)
Ченгиз Кахраман (Стамбульский технический университет, Стамбул, Турция)
Дмитрий Г. Родионов (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия)
Эдуарда Пинту Феррейра (Политехнический университет Порту, Португалия)
Эмма Хуанеда-Айенса (Университет Ла-Риохи, Логроньо, Испания)
Гилян В. Федотова (Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” Российской Академии Наук, Москва, Россия)
Джеффри Шен (Гонконгский политехнический университет, Гонконг)
Гул Ипек Тунч (Ближневосточный технический университет, Анкара, Турция)
Гуннар Праузе (Таллиннский технологический университет, Таллин, Эстония)
Хани Абу-Кдаис (Иорданский университет науки и технологий, Ирбид, Иордания)
Игорь И. Дюков (Университет LUT, Лаппеенранта, Финляндия)
Иосиф Л. Туккель (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)
Ирина А. Брусакова (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия)
Джессика Виктория Личи (Бизнес-школа IDRAC, Лион, Франция)
Йозеф Виндшпергер (Венский университет, Вена, Австрия)
Лев С. Мазелис (Владивостокский государственный университет, Владивосток, Россия)
Луис Борхес Говейя (Университет Фернанду Песоа, Порту, Португалия)
Лутфихак Альпкан (Стамбульский технический университет, Стамбул, Турция)
Мария А. Молодчик (Национальный Исследовательский Университет Высшая Школа Экономики, Пермь, Россия)
Максим В. Щербаков (Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия)
Мохаммед Али Берави (Университет Индонезии, Депок, Индонезия)
Нанди Путра (Университет Индонезии, Депок, Индонезия)
Никита А. Моисеев (Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия)
Ольга В. Кожевина (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия)
Ольга С. Пескова (Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия)
Рангика Умеш Халватура (Университет Моратувы, Моратува, Шри-Ланка)
Сергей В. Аржановский (Отделение по Ростовской области Южного главного управления Банка России, Ростов-на-Дону, Россия)
Сергей Г. Редько (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)
Сергей Сосновских (Университет Де Монфора, Лестер, Великобритания)
Сюзанна Дюрст (Таллиннский технологический университет, Таллин, Эстония)
Татьяна Ю. Кудрявцева (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)
Татьяна И. Кузьмина (Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия)
Тенгиз Маградзе (Грузинский технический университет, Тбилиси, Грузия)
Синьпэн Сюй (Гонконгский политехнический университет, Гонконг)
Чжикай Ван (Чжэцзянский университет, Ханчжоу, Китай)

РЕДАКЦИЯ

Ответственный редактор

Анги Схведиани

Ответственный секретарь

Виктория Бразовская

Менеджер по развитию

Анастасия Кулачинская

Верстка

Евгения Фомина

Учредитель

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Адрес:

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая 29

Контакты:

Почта: sustainable@spbstu.ru

Веб-сайт: <https://sustainable.spbstu.ru/>

Editor-in-chief: Irina Rudskaia (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia)

EDITORIAL BOARD

Alberto Tron (Bocconi University, Milan, Italy)
Aleksii Bykov (Belarus State Economic University, Minsk, Republic of Belarus)
Aleksii M. Gintciak (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation)
Alla Kravets (Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia)
Andrew A. Alola (Istanbul Gelisim University, Istanbul, Turkey)
Angi Skhvediani (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia)
Arturas Kaklauskas (Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania)
Cengiz Kahraman (Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey)
Dmitrii Rodionov (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia)
Eduarda Pinto Ferreira (Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto, Porto, Portugal)
Emma Juaneda-Ayensa (University of La Rioja, Logroño, La Rioja, Spain)
Geoffrey Shen (The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)
Gilyan Fedotova (Federal Research Center "Informatics and Management" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)
Gul Ipek Tunc (Middle East Technical University, Ankara, Turkey)
Gunnar Prause (Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia)
Hani Abu-Qdais (Jordan University of Science and Technology, Irbid, Jordan)
Igor Dukeov (LUT University, Lappeenranta, Finland)
Iosif L. Tukkel (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation)
Irina Brusakova (St Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia)
Jessica Victoria Lichy (IDRAC Business School, Lyon, France)
Josef Windsperger (University of Vienna, Vienna, Austria)
Lev Mazelis (Vladivostok State University, Vladivostok, Russia)
Luis Borges Gouveia (University Fernando Pessoa, Porto, Portugal)
Lutfihak Alpkhan (Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey)
Maria Molodchik (HSE University, Perm, Russia)
Maxim Shcherbakov (Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia)
Mohammed Ali Berawi (Universitas Indonesia, Depok, Indonesia)
Nandy Putra (Universitas Indonesia, Depok, Indonesia)
Nikita Moiseev (Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia)
Olga Kozheva (Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia)
Olga Peskova (Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia)
Rangika Umesh Halwatura (University of Moratuwa, Moratuwa, Sri Lanka)
Sergey Arzhenovskiy (Rostov Regional Division of the Southern Main Branch of the Central Bank of the Russian Federation, Rostov-on-Don, Russia)
Sergey Redko (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia)
Sergey Sosnovskikh (De Montfort University, Leicester, United Kingdom)
Susanne Durst (Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia)
Tatiana Kudryavtseva (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia)
Tatiana Kuzmina (Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia)
Tengiz Magradze (Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia)
Xinpeng Xu (The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)
Zhikai Wang (Zhejiang University, Hangzhou, China)

EDITORS OFFICE

Executive editor

Angi Skhvediani

Executive Secretary

Viktorii Brazovskaia

Development Manager

Anastasiya Kulachinskaya

Layout designer

Evgeniia Fomina

Publisher

Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University

Corresponding address:

29 Polytechnicheskaya st., Saint-Petersburg,
195251, Russia

Contacts:

Email: sustainable@spbstu.ru

Web: <https://sustainable.spbstu.ru/>

Интеграция системного анализа и цифровых технологий в управлении системами

Социально-экономические системы характеризуются высокой сложностью, неопределенностью и динамичностью внешних условий. Эффективное управление такими системами требует сочетания системного анализа, цифровых технологий и стратегических подходов, которые позволяют учитывать многомерные взаимосвязи между элементами. Развитие таких подходов обеспечивает повышение устойчивости, адаптивности и эффективности процессов в различных областях, от транспортной и производственной инфраструктуры до управления ресурсами и стратегического развития промышленных и технологических комплексов.

В третьем выпуске журнала «Sustainable Development and Engineering Economics» за 2025 год авторы рассматривают применение современных количественных и качественных методов для принятия управленческих решений на различных уровнях.

В статье Натальи Савченко, Татьяны Кудрявцевой, Марии Родионовой «Влияние метеорологических факторов на тяжесть дорожно-транспортных происшествий» проводится анализ влияния погодных условий на тяжесть ДТП в Санкт-Петербурге. Анализ показал статистически значимое различие между группами по температуре и отсутствие значимых различий по осадкам и атмосферному давлению.

Исследование Марины Малашенко, Евгения Середина, Екатерины Терешко «Цифровизация проектирования в нефтегазовой отрасли: вызовы и решения через стратегический подход» посвящено проблеме цифровизации проектирования нефтегазовых месторождений. В результате анализа внедряемых технологий, таких как BIM, цифровые двойники, ИИ и машинное обучение, разработана структура стратегической карты цифровой трансформации для процесса проектирования. В карте определены целевые ориентиры, подцели и индикаторы контроля.

Работа Жанны Бурлуцкой, Полины Шарко, Алексея Гинцяка, Капитона Пospelова «Определение и формализация связей структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания» посвящена формализации задачи составления расписания. В статье представлены результаты анализа научной литературы и описаны структурные элементы распределенных производственных систем. Основным результатом является онтологическая модель процесса формирования расписания, представленная как набор стратегических взаимодействий в терминах теории игр и мультиагентных систем, включающая формализованные стратегии, выигрыши агентов и BDI-модели.

Статья Софии Степановой и Сальбека Бекетова «Гибридный подход к моделированию процессов управления складскими запасами строительных материалов» посвящена разработке гибридного подхода к моделированию. На основе построенных BPMN-диаграмм, отражающих полный цикл движения материалов, предложено создание гибридной имитационной модели, которая сочетает дискретно-событийное моделирование и элементы системной динамики. Результаты исследования являются базой для разработки модели целевого состояния процессов.

Исследование Аллы Пономаренко и Натальи Шемякиной «Стимулирование промышленного развития региона в контексте технологического суверенитета с использованием модели оптимизации лизинговых платежей» посвящено совершенствованию подхода к использованию лизинга. В работе проанализированы концептуальные подходы к технологическому суверенитету и промышленной политике, а также разработана модель оптимизации лизинговых платежей, адаптированная к условиям постконфликтного восстановления промышленности нового региона РФ. Основным результатом является расчет лизинговых платежей с учетом премии за риск и субсидирования процентных ставок.

*Ирина Рудская, главный редактор журнала SDEE,
доктор экономических наук, профессор*

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Савченко, Н., Кудрявцева, Т., Родионова, М.</i> Влияние метеорологических факторов на тяжесть дорожно-транспортных происшествий.....	7
<i>Малашенко, М., Середин, Е., Терешко, Е.</i> Цифровизация проектирования в нефтегазовой отрасли: вызовы и решения через стратегический подход.....	22
<i>Бурлуцкая, Ж., Шарко, П., Гинцяк, А., Поспелов К.</i> Определение и формализация связей структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания	41
<i>Степанова, С., Бекетов, С.</i> Гибридный подход к моделированию процессов управлению складскими запасами строительных материалов.....	66
<i>Пономаренко, А., Шемякина, Н.</i> Стимулирование промышленного развития региона в контексте технологического суверенитета с использованием модели оптимизации лизинговых платежей	80

TABLE OF CONTENTS

<i>Savchenko, N., Kudryavtseva, T., Rodionova, M.</i> The influence of meteorological factors on the severity of road accidents.....	8
<i>Malashenko, M., Seredin, E., Tereshko, E.</i> Digitalization of design in the oil and gas industry: challenges and solutions through a strategic approach	23
<i>Burlutskaya, Z., Sharko, P., Pospelov, K., Gintciak, A.</i> Definition and formalization of the relationships of the structural elements of distributed production systems in the context of the task of forming a schedule	42
<i>Stepanova, S., Beketov, S.</i> A hybrid approach to process modeling and inventory management of building materials.....	67
<i>Ponomarenko, A., Shemiakina, N.</i> Stimulating industrial development of the region in the context of technological sovereignty using a leasing payment optimization model.....	79

Научная статья

УДК 51-7

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.1>

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТЯЖЕСТЬ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

Наталья Савченко*^{}, Татьяна Кудрявцева^{}, Мария Родионова^{}

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,
nata.savchenko.1999@bk.ru, tankud28@mail.ru, rodionova_ma@spbstu.ru

*Автор, ответственный за переписку: nata.savchenko.1999@bk.ru

Аннотация

Исследование посвящено анализу влияния различных погодных условий (атмосферного давления, температуры воздуха и количества осадков) на тяжесть дорожно-транспортных происшествий (ДТП) в городе Санкт-Петербург. Цель работы: выявление закономерностей между метеорологическими факторами и степенью тяжести последствий ДТП. В работе применены методы анализа данных: описательная статистика, визуализация данных и расчет р-значения для проверки гипотез. Анализ показал: по осадкам статистически значимых различий в распределении тяжести ДТП не выявлено. Различия между режимами осадков и «сухими» условиями не достигают значимости. По атмосферному давлению (758–763 мм рт. ст.) различий также нет ($p \approx 0.8$); высокая доля ДТП при «вне-нормальных» давлениях отражает особенности распределения наблюдений, а не рост тяжести. Температура демонстрирует статистически значимое различие между группами ($p = 0.013$). Для уточнения роли погоды необходимы модели с более высокой временной детализацией (интенсивность осадков, переходы через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Необходимо учитывать трафик, видимость, тип дороги и сезонность. В целом повышенный риск тяжёлых и летальных ДТП отмечается при температуре $0\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и осадках, особенно интенсивных. Полученные выводы могут быть использованы для адаптации городской инфраструктуры к неблагоприятным погодным явлениям и разработки предупреждающих систем для водителей.

Ключевые слова: дорожно-транспортные происшествия, погодные условия, атмосферное давление, температура воздуха, осадки, транспортная безопасность.

Цитирование: Савченко Н., Кудрявцева Т., Родионова М., 2025. Влияние метеорологических факторов на тяжесть дорожно-транспортных происшествий. Sustainable Development and Engineering Economics. 3, 1. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.1>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Савченко Н., Кудрявцева Т., Родионова М., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.1>

THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS ON THE SEVERITY OF ROAD ACCIDENTS

Natalia Savchenko*, Tatiana Kudryavtseva, Maria Rodionova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, nata.savchenko.1999@bk.ru, tankud28@mail.ru, rodionova_ma@spbstu.ru

*Corresponding author: nata.savchenko.1999@bk.ru

Abstract

The study is devoted to the analysis of the influence of various weather conditions (atmospheric pressure, air temperature and precipitation) on the severity of road accidents in the city of St. Petersburg. The purpose of the work is to identify patterns between meteorological factors and the severity of the consequences of an accident. The paper uses data analysis methods: descriptive statistics, data visualization, and calculation of the p-value to test hypotheses. The analysis showed that there were no statistically significant differences in the severity distribution of accidents in terms of precipitation. The differences between precipitation regimes and "dry" conditions do not reach significance. There are also no differences in atmospheric pressure (758 – 763 mmHg) ($p \approx 0.8$); the high proportion of accidents at "non-normal" pressures reflects the distribution of observations, rather than an increase in severity. The temperature shows a statistically significant difference between the groups ($p = 0.013$). To clarify the role of weather, models with higher time details (precipitation intensity, transitions through 0 °C) are needed, taking into account traffic, visibility, road type, and seasonality. In general, an increased risk of severe and fatal accidents is observed at temperatures of 0 – 5 °C and precipitation, especially intense. The findings can be used to adapt urban infrastructure to adverse weather events and develop warning systems for drivers.

Keywords: traffic accidents, weather conditions, atmospheric pressure, air temperature, precipitation, transport safety.

Citation: Savchenko, N., Kudryavtseva, T, Rodionova, M., 2025. The influence of meteorological factors on the severity of road accidents. Sustainable Development and Engineering Economics 3, 1. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.1>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Savchenko N., Kudryavtseva T, Rodionova M., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

Объектом исследования являются дорожно-транспортные происшествия (ДТП), происходящие при различных погодных условиях, таких как осадки, температура воздуха и атмосферное давление. Изучаются особенности возникновения ДТП в зависимости от погодных факторов и сопутствующих дорожных условий.

Актуальность исследования обоснована тем, что проблема снижения числа дорожно-транспортных происшествий остается одной из приоритетных задач в области обеспечения дорожной безопасности. Погодные условия влияют на риск ДТП, однако степень и характер этого влияния недостаточно полно исследованы.

Научная проблема заключается в недостаточной изученности влияния погодных условий на тяжесть дорожных происшествий. Требуется выявить зависимости между типом погодных явлений и вероятностью наступления тяжелых и летальных исходов ДТП по Санкт-Петербургу.

В рамках исследования будут решены следующие задачи:

- анализ существующих научных исследований по влиянию погодных факторов на аварийность;
- исследование изменения частоты и тяжести ДТП в зависимости от уровня осадков, температуры и атмосферного давления;
- выявление ключевых погодных условий, вызывающих наибольший риск тяжелых и летальных исходов ДТП.

2. Обзор литературы

Изучение влияния погодных факторов на тяжесть дорожно-транспортных происшествий является одной из актуальных задач транспортной безопасности. В последние годы в мировой научной литературе появился ряд исследований, посвященных отдельным аспектам этой проблемы: влиянию температуры, осадков или давления.

Дорожно-транспортные происшествия остаются одной из ведущих причин смертности и травматизма по всему миру. Среди множества факторов, влияющих на тяжесть ДТП, особое место занимают погодные условия, такие как атмосферное давление, температура воздуха и количество осадков. Понимание их роли в формировании риска тяжелых аварий может способствовать разработке более эффективных мер по предупреждению ДТП.

Атмосферное давление оказывает прямое влияние как на состояние водителей, так и на дорожные условия. Исследования показали, что снижение атмосферного давления ниже нормы на 5–10 мм рт. ст. связано с ухудшением психофизиологического состояния водителей, снижением концентрации внимания и увеличением времени реакции (Cuensa et al., 2018; Didyk et al., 2012). Быстрые колебания давления также могут вызывать головные боли и обострение хронических заболеваний, что дополнительно увеличивает вероятность серьезных ДТП (Becker et al., 2022).

Кроме того, ряд исследований подчёркивает, что атмосферное давление в комплексе с другими погодными условиями (осадки, влажность, температура) оказывает влияние на дорожную безопасность (Stevens et al., 2019). При этом резкие изменения давления могут усиливать стрессовое состояние водителей, снижая их адаптивные возможности (Funakubo et

al., 2021). Влияние низкого давления также связано с ухудшением когнитивных функций и психомоторных реакций, что особенно критично при выполнении сложных задач управления транспортным средством (Costello et al., 2020).

Отдельное внимание уделяется моделированию зависимости между погодными условиями и уровнем аварийности с использованием машинного обучения, что позволяет выявлять нелинейные зависимости и прогнозировать риск аварий в зависимости от изменений метеопараметров (Cai et al. 2024). Таким образом, нестабильность или пониженное атмосферное давление прямо коррелируют с увеличением тяжести ДТП и требуют учёта при планировании мер безопасности.

Температура воздуха оказывает значительное влияние как на дорожное покрытие, так и на физиологическое состояние водителей. Низкие температуры приводят к обледенению дорог, снижению коэффициента сцепления шин с покрытием и увеличению тормозного пути, что резко повышает риск тяжёлых аварий, особенно в ночное время (Theofilatos, 2017). Кроме того, при отрицательных температурах возрастает вероятность образования чёрного льда, который визуально почти незаметен, что делает водителей более уязвимыми (Usman et al., 2010).

Высокие температуры, в свою очередь, оказывают влияние на психофизиологическое состояние водителей: вызывают переутомление, раздражительность, снижение внимания, ускоренное обезвоживание и ухудшение когнитивных функций, что увеличивает вероятность ошибок и ДТП (Khattak et al., 2020). Исследования показывают, что при экстремально высоких температурах (свыше 30 °C) риск серьёзных аварий возрастает на 30–50% по сравнению с умеренными температурными условиями (Khan and Ahmed, 2023).

Кроме того, высокая температура влияет на состояние дорожного покрытия, особенно в жарком климате: асфальт может размягчаться, что снижает прочность покрытия и повышает риск его деформации (Bai et al., 2022). Такие изменения приводят к ухудшению сцепления шин с дорогой, увеличению тормозного пути и потенциальному росту аварийности. При экстремально низких температурах дорожные материалы становятся более хрупкими, что повышает риск образования трещин, выбоин и других дефектов, усугубляющих условия движения (Usman et al., 2010).

Важно учитывать также взаимодействие температуры с другими погодными факторами — влажностью, осадками, видимостью — поскольку это формирует комплексные условия, влияющие на безопасность движения (Carrodano, 2024). Например, в дождливую погоду при высоких температурах увеличивается вероятность аквапланирования, а в мороз при высокой влажности — образование наледи. Некоторые работы применяют методы машинного обучения для моделирования сложных взаимосвязей между погодными условиями и аварийностью, что открывает возможности для прогнозирования риска ДТП в реальном времени (Theofilatos and Yannis, 2014).

Таким образом, температурные экстремумы (как высокие, так и низкие) оказывают многоплановое влияние на безопасность дорожного движения — через физиологическое воздействие на водителей, физическое изменение дорожного покрытия и сложные погодные комбинации — и требуют особого внимания при разработке превентивных мер, планировании дорожных работ и настройке систем раннего предупреждения.

Количество и тип осадков являются одними из наиболее значимых погодных факторов, влияющих на тяжесть ДТП. Сильный дождь снижает коэффициент сцепления шин с дорогой,

ухудшает видимость, увеличивает тормозной путь, а также способствует образованию водяных плёнок, провоцируя аквапланирование (Omranian et al., 2018; Sangkharat et al., 2021). При интенсивных дождях накапливается большое количество поверхностной воды, что снижает эффективность торможения и увеличивает риск потери управления автомобилем, особенно на скоростных дорогах (Wang et al., 2022).

Некоторые исследования показывают: умеренный дождь иногда приводит к большему количеству тяжёлых аварий, чем ливень, поскольку водители часто недооценивают опасность умеренных осадков и не корректируют стиль вождения, например, не снижают скорость или не увеличивают дистанцию (Becker et al., 2020). При этом сильные дожди, несмотря на более экстремальные условия, могут в некоторых случаях провоцировать более осторожное поведение водителей, но всё равно остаются одним из главных факторов увеличения тяжести ДТП (Black et al., 2017).

Дополнительный риск создают особенности дорожной инфраструктуры: системы дренажа часто не справляются с быстрым притоком воды во время ливней, что приводит к локальным наводнениям, особенно в городах (Wu et al., 2018). Кроме того, интенсивные дожди могут затопить разметку на дороге, делая ее невидимой, что дезориентирует водителей и увеличивает риск боковых столкновений и съезда с полосы.

Сильные дожди оказывают влияние и на общее психофизиологическое состояние водителей, вызывая повышенное напряжение, усталость и стресс, что дополнительно снижает их способность адекватно реагировать на сложные дорожные условия. С учётом этих факторов современные исследования рекомендуют внедрение адаптивных предупреждающих систем, которые автоматически информируют водителей о рисках при экстремальных осадках (Zeng et al., 2020).

Таким образом, сильные дожди оказывают многоплановое влияние на тяжесть ДТП – через физические изменения дорожных условий, проблемы инфраструктуры и воздействие на поведение водителей – и требуют системного подхода к управлению дорожной безопасностью.

Объединяя различные погодные факторы, исследователи подчёркивают, что именно сочетание экстремальных условий – таких как низкое атмосферное давление, высокие или низкие температуры и интенсивные осадки – многократно увеличивает тяжесть последствий ДТП (Bergel-Nayat et al., 2013; Jaroszweski et al., 2014). Влияние отдельных погодных переменных, таких как дождь или жара, уже само по себе существенно, но их комбинация создаёт эффекты, которые превышают простую сумму рисков (Qiu and Nixon, 2008).

Так, например, сильный дождь в сочетании с низкими температурами может приводить к образованию ледяной корки на дорожном покрытии, что резко снижает сцепление колёс с дорогой (Jin and McBroom, 2024). При высоких температурах в условиях низкого давления водители испытывают повышенную утомляемость, что в сочетании с ухудшенными дорожными условиями, например из-за ливней, делает аварии более вероятными и тяжёлыми.

Кроме того, изменения климата и рост экстремальных погодных явлений усиливают нагрузку на транспортную инфраструктуру, снижая её устойчивость и увеличивая риски для участников дорожного движения (Jaroszweski et al., 2014). В ответ на эти вызовы современные исследования акцентируют внимание на необходимости интегрированного подхода, например, разработка адаптивных систем управления движением, которые учитывают несколько

погодных факторов одновременно, а также совершенствовании материалов дорожного покрытия, способных лучше выдерживать воздействие экстремальных температур и осадков (Qiu and Nixon, 2008).

Таким образом, сочетание неблагоприятных метеоусловий требует комплексного анализа и системных мер по повышению безопасности дорожного движения, включая мониторинг, прогнозирование и адаптацию инфраструктуры.

На основании литературного обзора к собственному исследованию можно выдвинуть следующие гипотезы:

1. Доля тяжелых ДТП будет расти при отклонении от нормального значения атмосферного давления.
2. Существует интервал температуры, при котором доля тяжелых ДТП будет возрастать.
3. Существует диапазон интенсивности осадков, при котором вероятность тяжелых ДТП возрастет.

3. Материалы и методы

В рамках исследования были использованы методы описательной статистики, визуализации данных и расчет r -значения для проверки гипотез.

Описательная статистика применялась для первичного анализа структуры данных, выявления распределения показателей температуры, атмосферного давления и осадков.

Методы визуализации использовались для наглядного отображения взаимосвязей между погодными условиями и тяжестью ДТП, что позволило выявить скрытые закономерности.

Выбор указанных методов обусловлен их соответствием типу обрабатываемых данных, научной обоснованностью, распространённостью в мировой практике исследования факторов ДТП.

4. Результаты

Исследование основано на данных по ДТП в городе Санкт-Петербург с 2015 по 2024 год, объединенных с данными по погодным условиям в городе. Выборка включает в себя 50 705 наблюдений. Из них 32 743 наблюдения имели легкий исход ДТП, 16 171 — тяжелый и 1 791 — летальный.

Проанализируем влияние атмосферного давления на тяжесть ДТП.

Нормальный диапазон атмосферного давления для Санкт-Петербурга составляет 758–763 мм рт. ст.¹.

Проверим с помощью r -значения значимость фактора «Атмосферное давление» для тяжести ДТП. В основной проверке оценим независимость распределения тяжести ДТП от режима атмосферного давления. По сводной таблице наблюдений получено: для лёгких ДТП — 8 072 случая при давлении в пределах нормы и 24 671 (75,35%) вне нормы; для тяжёлых ДТП — 4 029 и 12 142 (75,09%) соответственно; для ДТП с погибшими — 447 и 1 344 (75,04%)

¹ <https://sites.google.com/view/szsmkr/норма-атмосферного-давления-в-санкт-петербурге-сейчас>

соответственно, таким образом, подавляющее большинство ДТП (>75%) произошло при ненормальном атмосферном давлении.

Статистическая проверка не выявила значимых различий в распределении тяжести между режимами давления ($p = 0.8007$); при укрупнении исходов до двух уровней («тяжёлые + с погибшими» против «лёгких») результат также остался статистически незначимым ($p = 0.5126$).

Преобладание (>75%) ДТП при «ненормальном» атмосферном давлении преимущественно отражает распределение времени наблюдений и сопутствующие погодные режимы, а не самостоятельное влияние давления. Интервал 758–763 мм рт. ст. слишком узок относительно естественной суточно-сезонной вариабельности, поэтому значительная доля наблюдений приходится на состояние «вне нормы», где накапливается больше событий. Кроме того, отклонения давления часто синхронны с фронтами (осадки, ухудшение видимости, переход через 0 °C и гололёд) и временными пиками трафика, что повышает абсолютное число аварий без изменения распределения тяжести. Вследствие этого давление следует учитывать как ковариату и включать в анализ.

Рассмотрим влияние температуры на тяжесть ДТП.

Разделим данные по температуре с интервалом 5 градусов и посмотрим распределение по тяжести в каждом из интервалов (рисунки 1 и 2).

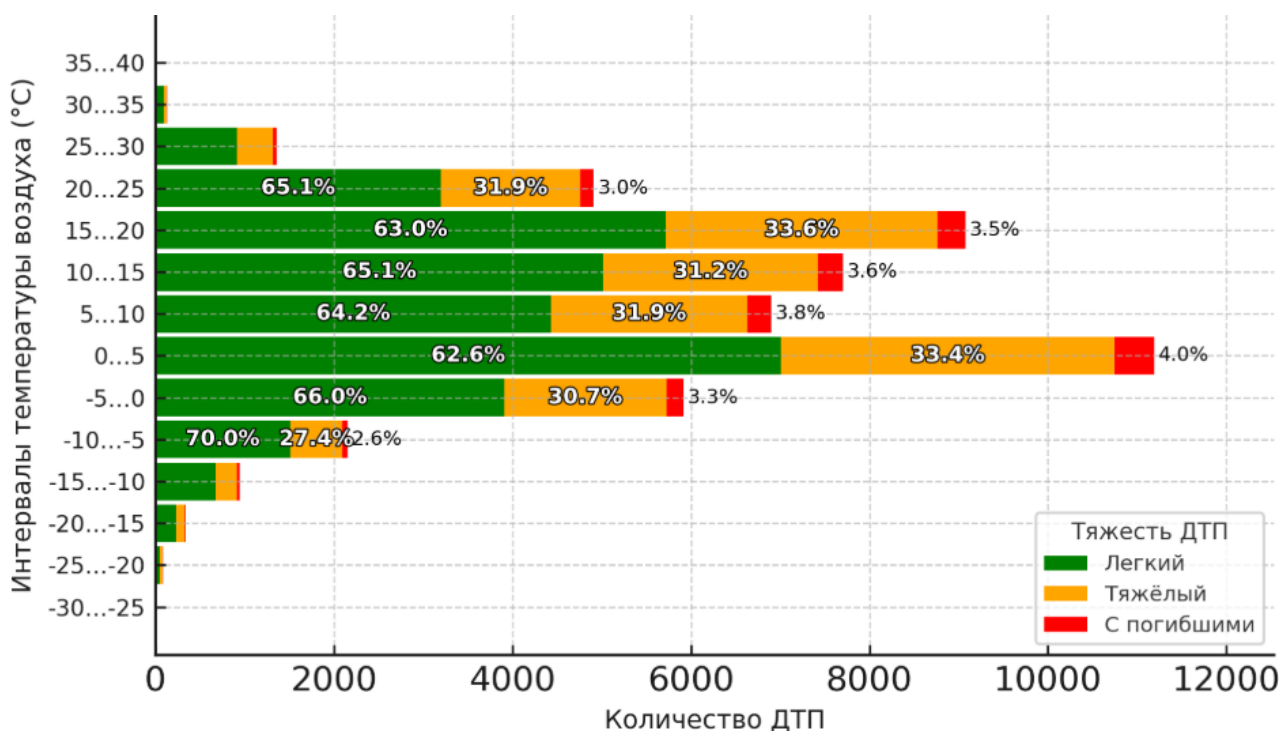


Рисунок 1. Тяжесть ДТП по температурным интервалам

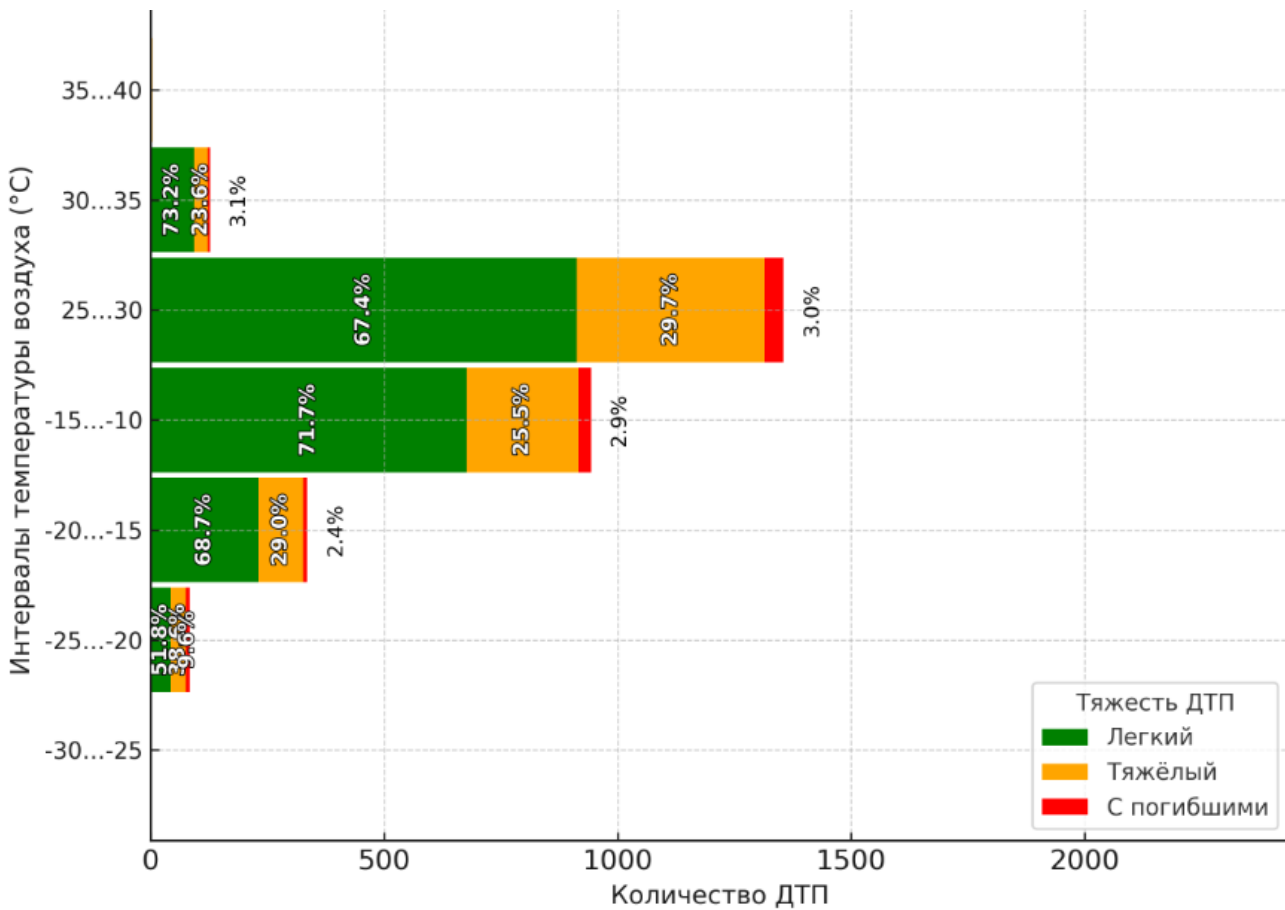


Рисунок 2. Тяжесть ДТП по температурным интервалам, укрупненная по интервалам, с малым количеством наблюдений

Анализ распределения тяжести ДТП по интервалам температуры воздуха показывает устойчивую зависимость тяжести происшествий от погодных условий. Для оценки использованы интервалы шириной 5 °C, что соответствует общепринятой метеорологической практике и обеспечивает баланс между статистической устойчивостью и наглядностью результатов. Более мелкие интервалы (например, 1 °C) приводят к излишней фрагментации данных, а более крупные (10–15 °C) сглаживают важные различия, особенно в околонулевой зоне.

По данным рисунков 1 и 2 можно сделать выводы, что во всех температурных интервалах лёгкие ДТП остаются доминирующей категорией, однако доля тяжёлых и смертельных случаев существенно варьирует. Наибольшие значения наблюдаются при экстремально низких температурах и в зоне перехода через ноль. В тёплый период года структура происшествий более стабильна, хотя умеренно тёплые условия (10–25 °C) также связаны с заметным ростом тяжёлых и смертельных исходов.

Можно выделить наиболее опасные температурные зоны, по полученным результатам. Таковыми оказались:

1. -25...-20 °C — наиболее критический интервал: почти 48% всех происшествий здесь заканчиваются тяжёлыми последствиями или гибелью. Несмотря на сравнительно небольшое абсолютное число ДТП, структурно этот диапазон является самым опасным.

2. 0...5 °C — зона максимальной аварийности: всего зарегистрировано 11 194 случая, что составляет крупнейший пик в абсолютных значениях. Здесь доля тяжёлых и смертельных

ДТП достигает 37%, что связывается с образованием гололёда, перепадами влажности и резким снижением сцепления колёс с дорогой.

3. 5...10 °С и 15...20 °С — оба интервала характеризуются близкой долей тяжёлых и смертельных ДТП (37%). Это диапазоны, при которых погодные условия не экстремальны, однако сохраняется высокая интенсивность движения, что увеличивает риск тяжёлых последствий.

4. 20...25 °С — доля тяжёлых и смертельных ДТП составляет 35%, что также выше среднего уровня.

При температуре выше 25...30°С тяжёлые и смертельные ДТП составляют меньшую часть структуры, а преобладание лёгких происшествий становится более выраженным.

Температура воздуха, рассмотренная как непрерывная переменная, демонстрирует статистически значимое различие между группами тяжести исходов ДТП: при сравнении средних температур по трём категориям тяжести получено $p = 0.0130$, что указывает на наличие связи температуры с распределением тяжести среди зарегистрированных происшествий.

Перейдем к анализу по осадкам.

В выборке оказалось, что легких ДТП без осадков произошло 28 486 (87%), с осадками — 4 257 (13%), с погибшими без осадков — 1 573 (87,2%) и с осадками 218 (12,2%), тяжелых с осадками — 2 193 (86,4%) и без осадков — 2 193 (13,6%). Таким образом, Доля ДТП при наличии осадков похожа для всех типов тяжести (12–14%) (рисунок 3). Тяжёлые и летальные аварии не растут сильно на фоне осадков — влияние осадков заметное, но не радикальное.

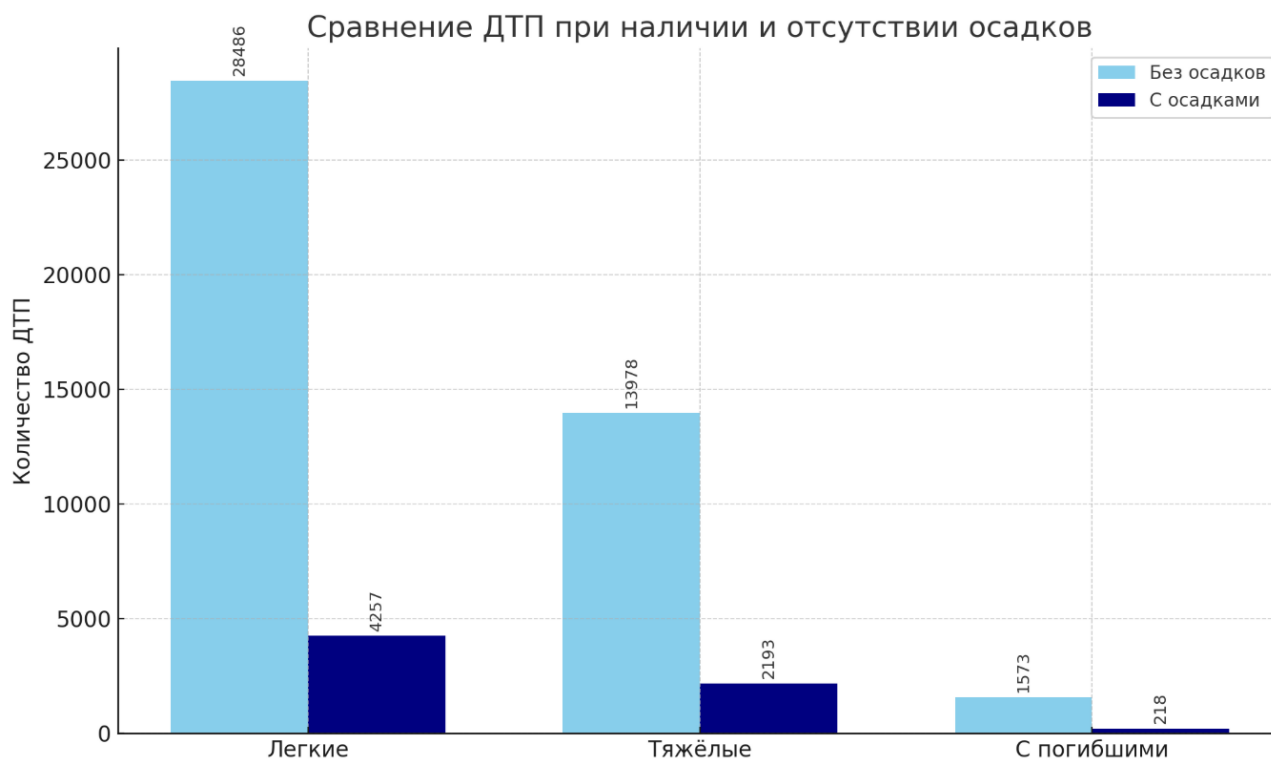


Рисунок 3. Сравнительная столбчатая диаграмма для осадков

Разделим осадки на группы и также построим столбчатую диаграмму (рисунок 4):

– нет осадков: значение = 0;

- слабые: $0 < \text{значение} \leq 2$ мм (лёгкий морозящий дождь);
- умеренные: $2 < \text{значение} \leq 10$ мм (умеренный дождь);
- сильные: значение > 10 мм (ливень).

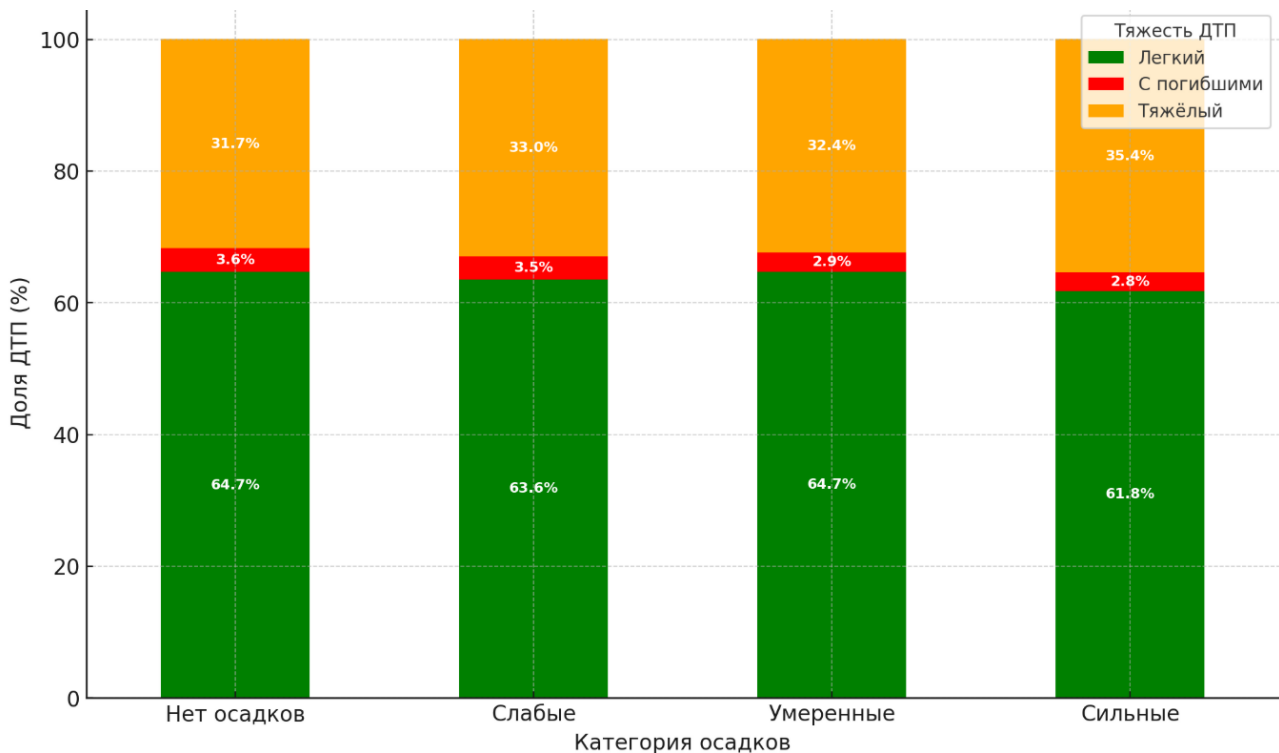


Рисунок 4. Диаграмма процентного распределения ДТП по категориям осадков и тяжести

По результатам, показанным на рисунке 4 можно сделать выводы:

- При сильных осадках доля тяжёлых и смертельных ДТП выше.
- При умеренных и слабых осадках — в основном лёгкие ДТП.
- При отсутствии осадков фиксируется часть тяжёлых и смертельных ДТП.

Анализ, представленный на рисунке 4, демонстрирует ожидаемую описательную картину: основная масса ДТП приходится на «сухие» периоды, при этом структура тяжести близка к 65% лёгких, 32% тяжёлых и 3–4% со смертельным исходом; при «слабых» осадках наблюдается умеренное увеличение доли тяжёлых исходов; при «сильных» осадках доля тяжёлых достигает максимума. Наши расчёты по суточным данным дают сопоставимые пропорции для ключевых режимов:

без осадков — 64.7% лёгких, 31.7% тяжёлых, 3.6% летальных;

для умеренных осадков — 64.7% лёгких, 32.4% тяжёлых, 2.9% летальных;

для сильных осадков — 61.8% лёгких, 35.4% тяжёлых, 2.8% летальных.

Вместе с тем формальная проверка независимости распределений тяжести между четырьмя режимами осадков не достигает статистической значимости ($p = 0.329$); попарные сравнения со «сухими» также незначимы (p -значение от 0.22 до 0.53). Это снимает кажущееся противоречие: визуальная тенденция к росту доли тяжёлых исходов при усилении осадков действительно присутствует на уровне описательной статистики, но при текущей

дискретности и метрике признака «осадки» она статистически не подтверждается. Ключевыми причинами являются малая численность наблюдений в категории «сильные осадки» (что ограничивает мощность тестов) и эффект агрегирования: суточная сумма сглаживает внутрисуточные пики интенсивности, релевантные для механизма риска. Доминирование абсолютного числа аварий в «сухие» дни объясняется большей продолжительностью сухих условий во времени наблюдения. Для строгой проверки гипотезы о возрастании тяжести при дожде требуется более детальная временная привязка интенсивности осадков к моментам ДТП и многофакторное моделирование с контролем сопутствующих погодных и дорожных факторов.

Сделаем вывод по общему влиянию на тяжелые и летальные ДТП приведенных выше факторов.

В совокупности результаты по тяжёлым и летальным исходам указывают на следующее. По осадкам — при использованной агрегированной метрике (суточная сумма) статистически значимых различий в распределении тяжести среди уже произошедших ДТП не выявлено: при объединении всех осадков против «без осадков» получено $p = 0.1038$; при одновременном сопоставлении четырёх режимов («без осадков», «слабые», «умеренные», «сильные») — $p = 0.329$; попарные сравнения со «сухими» условиями лежат в диапазоне p -значения от 0.22 до 0.53. Наблюдаемая описательная тенденция к большему удельному весу тяжёлых исходов в сильный дождь не достигает статистической подтвержденности, что объяснимо малым числом таких эпизодов и сглаживанием кратковременных пиков интенсивности при суточной агрегации. По атмосферному давлению — при дихотомизации относительно 758–763 мм рт. ст различий в структуре тяжести также не обнаружено ($p = 0.8007$; при объединении «тяжёлые + летальные» против «лёгких» $p = 0.5126$); высокая доля ДТП при давлениях «вне нормы» отражает скорее узость выбранного коридора и распределение времени наблюдения, чем изменение тяжести исходов. Температура, рассмотренная как непрерывная переменная, демонстрирует статистически значимое различие между группами тяжести ($p = 0.0130$), это статистически значимый, но малый по размеру эффект, указывающий на весьма слабое перераспределение долей, без существенного практического смещения в сторону тяжёлых и летальных исходов.

Исходя из этого, дальнейшие выводы о роли погоды в тяжёлых и летальных ДТП следует строить на моделях, учитывающих временную детализацию погодных показателей (интенсивность осадков по часам/минутам, переходы через 0°C), трафик и сопутствующие факторы (видимость, тип дороги, сезонность), а также возможные нелинейности и взаимодействия. Более детализированное многофакторное моделирование позволит отличить ограничения текущей агрегированной оценки от истинного отсутствия влияния и, при наличии связи, строго оценить вклад каждого фактора именно в тяжёлые и летальные исходы.

Таким образом, можно сделать вывод, что наибольший риск тяжёлых и летальных ДТП возникает при температуре около $0...5^{\circ}\text{C}$ в сочетании с осадками, особенно интенсивными: переход через 0°C (слякоть/гололёд) резко ухудшает сцепление. По данным Санкт-Петербурга погодные факторы сами по себе существенного вклада в тяжесть не показали; при «сухих» условиях доля тяжёлых исходов ниже.

5. Обсуждение

Современные данные уверенно показывают, что осадки повышают риск ДТП, причём ключевую роль играет интенсивность: на материале США риск смертельных аварий при выпадении осадков выше примерно на 34% (Pechatnova et al., 2020), а при переходе от «просто дождя» к сильным ливням относительный риск растёт ступенчато и может достигать 81% (Eck et al. 2022). Это согласуется с мета-обзорами: дождь и снег системно повышают частоту аварий, тогда как по тяжести последствий под дождём единый эффект не фиксируется (иногда доля тяжёлых даже ниже из-за снижения скоростей), что подчёркивает различие между влиянием погоды на частоту и на структуру исходов (Becker et al., 2022). Существенным модификатором выступает температура: при осадках вблизи нуля (0...5 °C) резко ухудшается сцепление (слякоть/гололёд), и именно такие режимы связаны с наиболее неблагоприятными показателями травматизма; для снегопада риск травм выше при $T \leq 0^\circ\text{C}$, чем при $T > 0^\circ\text{C}$ (Lee et al., 2015).

Что касается атмосферного давления, то в роли самостоятельного предиктора оно демонстрирует слабую и нестабильную связь: в ряде работ давление используется как «негативный трассер» без обнаружения ассоциации с риском ДТП (Redelmeier and Raza, 2017), а ранние исследования не находили устойчивых эффектов барометрической высоты на аварийность (Alonso, 1993). В совокупности литература поддерживает практический вывод: приоритетное внимание следует уделять периодам интенсивных осадков, особенно при температурах около 0°C; давление целесообразно учитывать как вспомогательную ковариату фронтальной активности, но не как основной фактор тяжёлых исходов.

Таким образом, наши результаты показывают: при суточной агрегации осадки и барический режим не дают статистически подтверждённого сдвига распределения тяжести среди уже произошедших ДТП, тогда как температура как непрерывный предиктор значима ($p = 0.0130$); наибольшая уязвимость прослеживается при сочетании осадков с температурой около 0...5 °C. Эти выводы подчёркивают необходимость превентивных мер, ориентированных на такие сочетания условий, и дальнейших исследований с расширением выборки и повышением временной детализации осадков/температуры/давления (учитывая давление как вспомогательную ковариату).

6. Заключение

В анализируемой выборке выявлены следующие итоги. По суточным данным осадков статистически подтверждённого сдвига в распределении тяжести среди уже произошедших ДТП не обнаружено (средние суточные суммы: $p = 0.3804$; «любые осадки» против «без осадков»: $p = 0.1038$), при том, что описательно доля тяжёлых исходов возрастает при сильных осадках — эффект, вероятно, сглаживается суточной агрегацией и малой представленностью интенсивных эпизодов. По атмосферному давлению различий в структуре тяжести между периодами внутри и вне интервала 758–763 мм рт. ст. не выявлено ($p = 0.8007$; при объединении тяжёлых и летальных против легких – $p = 0.5126$); преобладание числа ДТП «вне нормы» объясняется узостью коридора и тем, что значительная часть времени наблюдений лежит за его пределами. По температуре при рассмотрении как непрерывного предиктора получено статистически значимое различие средних между группами тяжести ($p = 0.0130$), однако величина эффекта крайне мала; максимум числа тяжёлых и летальных случаев наблюдается при 0...5 °C, что согласуется с ухудшением сцепления при переходах через 0 °C и наличием осадков.

Практически это означает: приоритетными для профилактики тяжёлых и летальных исходов являются эпизоды осадков вблизи 0...5 °С. Для более точной и причинно интерпретируемой оценки влияния рекомендуется усовершенствовать метод исследования: повысить временную детализацию осадков (интенсивность по часам/минутам), учитывать экспозицию трафика, тип дороги, видимость и сезонность, моделировать взаимодействия, а давление использовать как вспомогательную ковариату фронтальной активности. Такой подход позволит отделить эффект агрегации от реального влияния и количественно оценить вклад каждого фактора именно в риск тяжёлых и летальных ДТП. Результаты исследования могут быть использованы при разработке превентивных мер и стратегий прогнозирования аварийности. Они также актуальны для планирования работы экстренных служб, адаптации дорожной инфраструктуры и информирования водителей в периоды повышенного риска.

Изучение влияния метеорологических факторов на тяжесть ДТП представляет собой актуальное направление прикладных и теоретических исследований в области транспортной безопасности. В условиях растущей автомобилизации и климатической нестабильности выявление погодных условий, способствующих возникновению аварий с тяжёлыми последствиями, приобретает особую значимость.

В этой связи представляется обоснованным развитие данного исследования по нескольким направлениям:

- Пространственный анализ риска ДТП. На следующем этапе возможно проведение пространственно-временного анализа с использованием географических информационных систем. Это позволит выявить территориальные кластеры ДТП с повышенной чувствительностью к погодным условиям, а также определить участки дорог с наибольшим риском при конкретных метеофакторах.

- Комбинированное влияние погодных и инфраструктурных факторов. Необходимо учитывать не только погодные условия, но и характеристики дорожной сети: тип покрытия, наличие освещения, плотность дорожного движения, техническое состояние дороги. Комплексный подход даст более точную оценку вклада каждого фактора в тяжесть аварий.

- Анализ динамики погодных изменений. Кроме абсолютных значений метеопоказателей важно рассматривать скорость и амплитуду их изменений. Резкое понижение температуры, скачки давления или внезапные осадки могут создавать более опасные условия, чем стабильно неблагоприятная погода.

Список литературы

- Alonso, Y., 1993. Geophysical Variables and Behavior: LXXII. Barometric Pressure, Lunar Cycle, and Traffic Accidents. *Perceptual and Motor Skills* 77 (2), 371–376. <https://doi.org/10.2466/pms.1993.77.2.371>
- Bai, Y., Zhang Y., Luo, D., 2022. Analysis of Coupling Effect and Heavy Load of High-Temperature Stability of Asphalt Mixture. *Advances in Materials Science and Engineering* 2022, 5722752. <https://doi.org/10.1155/2022/5722752>
- Becker, N., Rust, H.W., Ulbrich, U., 2020. Predictive modeling of hourly probabilities for weather-related road accidents. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20 (10), 2857–2871. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2857-2020>
- Becker, N., Rust, H.W., Ulbrich, U., 2022. Weather impacts on various types of road crashes: A quantitative analysis using generalized additive models. *European Transport Research Review* 14 (1), 37. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00561-2>
- Bergel-Hayat, R., Debarh, M., Antoniou, C., Yannis, G., 2013. Explaining the road accident risk: Weather effects. *Accident Analysis & Prevention* 60, 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.006>
- Black, A.W., Villarini, G., Mote, Th.L., 2017. Effects of Rainfall on Vehicle Crashes in Six U.S. States. *Weather, Climate, and Society* 9 (1), 53–70.
- Cai, J., Ong, G.P., Wu, D., Zhao, L., Zhao, H., 2024. Assessing braking performance on wet-road through water-depth estimation and vehicle-pavement dynamic simulation. *International Journal of Pavement Engineering* 25 (1), 2421896. <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2421896>
- Carrodano, C., 2024. Data-driven risk analysis of nonlinear factor interactions in road safety using Bayesian networks. *Sci. Rep.* 14, 18948. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69740-6>
- Costello, J.T., McMorris, T., Ando, A., Williams, T.B., Corbett, J., 2020. Hypoxia and cognitive performance – the role of barometric pressure. *The*

- Journal of Physiology, 598 (5), 1021–1022. <https://doi.org/10.1113/JP279358>
- Cuenca, L.G., Puertas, E., Aliane, N., Andres, J.F., 2018. Traffic Accidents Classification and Injury Severity Prediction, in: 2018 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). IEEE, pp. 52–57. <https://doi.org/10.1109/ICITE.2018.8492545>
- Didyk, L., Gorgo, Yu., Prigancova, A., Tunyi, I., Vaczyova, M., Mamilov, S., Dirckx, J., 2012. The Effects of Atmospheric Pressure Fluctuations on Human Behaviour Related to Injury Occurrences: Study on the Background of Low and Moderate Levels of Geomagnetic Activity. International Scholarly Research Network 2012, 791524. <https://doi.org/10.5402/2012/791524>
- Eck, M.A., Konrad, Ch.E., Rayne, S., Black, A.W., 2022. Understanding the Role of Rainfall Intensity on Relative Car Crash Risk in the Carolinas. Weather, Climate, and Society 14 (3), 965–978. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-22-0025.1>
- Funakubo, M., Sato, J., Mizumura, K., Suzuki, N., Messlinger, K., 2021. Craniofacial sensations induced by transient changes of barometric pressure in healthy subjects – A crossover pilot study. Cephalalgia Reports 4. <https://doi.org/10.1177/25158163211000362>
- <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-16-0035.1>
- Jaroszowski, D., Hooper, E., Chapman, L., 2014. The impact of climate change on urban transport resilience in a changing world. Progress in Physical Geography: Earth and Environment 38 (4), 448–463. <https://doi.org/10.1177/0309133314538741>
- Jin, M., McBroom, D.G., 2024. Investigating Road Ice Formation Mechanisms Using Road Weather Information System (RWIS) Observations. Climate 12 (5), 63. <https://doi.org/10.3390/cli12050063>
- Khan, M.N., Ahmed, M.M., 2023. A novel deep learning approach to predict crash severity in adverse weather on rural mountainous freeway. Journal of Transportation Safety & Security 15 (8), 795–825. <https://doi.org/10.1080/19439962.2022.2129891>
- Khattak, A.J., Mohamed, A.A., Khattak, A., 2020. Driver impairment detection and safety enhancement through comprehensive volatility analysis. Collaborative Sciences Center for Road Safety, Report no. CSCRS-R23.
- Lee, W.-K., Lee, H.-A., Hwang, S., Kim, H., Lim, Y.-H., Hong, Y.-Ch., Ha, E.-H., Park, H., 2015. Does Temperature Modify the Effects of Rain and Snow Precipitation on Road Traffic Injuries? Journal of Epidemiology 25 (8), 544–552. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20140244>
- Omranian, E., Khattak, A., Alshareef, M., 2018. Exploring rainfall impacts on the crash risk on Texas roadways: A crash-based matched-pairs analysis approach. Accident Analysis & Prevention 117, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.03.030>
- Qiu, L., Nixon, W.A., 2008. Effects of Adverse Weather on Traffic Crashes: Systematic Review and Meta-Analysis. Transportation Research Record 2055 (1), 139–146. <https://doi.org/10.3141/2055-16>
- Redelmeier, D.A., Raza, S., 2017. Life-threatening motor vehicle crashes in bright sunlight. Medicine 96 (1), e5710. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000005710>
- Sangkharat, K., Thornes, J.E., Wachiradilok, P., Pope, F.D., 2021. Determination of the impact of rainfall on road accidents in Thailand. Heliyon 7 (2), e06061. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06061>
- Stevens, S.E., Schreck III, C.J., Saha, S., Bell, J.E., Kunkel, K.E., 2019. Precipitation and Fatal Motor Vehicle Crashes: Continental Analysis with High-Resolution Radar Data. Bulletin of the American Meteorological Society 100 (8), 1453–1461. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0001.1>
- Theofilatos, A., 2017. Incorporating real-time traffic and weather data to explore road accident likelihood and severity in urban arterials. Journal of Safety Research, 61, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2017.02.003>
- Theofilatos, A., Yannis, G., 2014. A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. Accident Analysis & Prevention 72, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.017>
- Usman, T., Fu, L., Miranda-Moreno, L.F., 2010. Quantifying the safety effects of winter road maintenance using data from instrumented vehicles. Accident Analysis & Prevention 42 (6), 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.05.008>
- Wang S. et al. Coupling impacts of spray and rainfall on road visibility and vehicle speeds: a simulation-based analysis // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2022. – Т. 49. – №. 7. – С. 1220-1230. <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0402>
- Wu, Y., Abdel-Aty, M., Lee, J., 2018. Crash risk analysis during rain conditions using real-time weather and traffic data. Accident Analysis & Prevention 114, 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.05.004>
- Zeng, Q., Quddus, M.A., Ison, S., 2020. Investigating the impacts of real-time weather conditions on freeway crash severity: A Bayesian spatial analysis. Transp. Res. Part C Emerg. Technol. 112, 47–65. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082768>
- Печатнова Е.В., Сафронов К.Э. Оценка влияния количества осадков на аварийность на дорогах вне населенных пунктов // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17. № 4. С. 512–522. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-512-522>

References

- Alonso, Y., 1993. Geophysical Variables and Behavior: LXXII. Barometric Pressure, Lunar Cycle, and Traffic Accidents. Perceptual and Motor Skills 77 (2), 371–376. <https://doi.org/10.2466/pms.1993.77.2.371>
- Bai, Y., Zhang Y., Luo, D., 2022. Analysis of Coupling Effect and Heavy Load of High-Temperature Stability of Asphalt Mixture. Advances in Materials Science and Engineering 2022, 5722752. <https://doi.org/10.1155/2022/5722752>
- Becker, N., Rust, H.W., Ulbrich, U., 2020. Predictive modeling of hourly probabilities for weather-related road accidents. Natural Hazards and Earth System Sciences 20 (10), 2857–2871. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2857-2020>
- Becker, N., Rust, H.W., Ulbrich, U., 2022. Weather impacts on various types of road crashes: A quantitative analysis using generalized additive models. European Transport Research Review 14 (1), 37. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00561-2>
- Bergel-Hayat, R., Debarh, M., Antoniou, C., Yannis, G., 2013. Explaining the road accident risk: Weather effects. Accident Analysis & Prevention 60, 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.006>
- Black, A.W., Villarini, G., Mote, Th.L., 2017. Effects of Rainfall on Vehicle Crashes in Six U.S. States. Weather, Climate, and Society 9 (1), 53–70. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-16-0035.1>
- Cai, J., Ong, G.P., Wu, D., Zhao, L., Zhao, H., 2024. Assessing braking performance on wet-road through water-depth estimation and vehicle-pavement dynamic simulation. International Journal of Pavement Engineering 25 (1), 2421896. <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2421896>
- Costello, J.T., McMorris, T., Ando, A., Williams, T.B., Corbett, J., 2020. Hypoxia and cognitive performance – the role of barometric pressure. The Journal of Physiology, 598 (5), 1021–1022. <https://doi.org/10.1113/JP279358>
- Cuenca, L.G., Puertas, E., Aliane, N., Andres, J.F., 2018. Traffic Accidents Classification and Injury Severity Prediction, in: 2018 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). IEEE, pp. 52–57. <https://doi.org/10.1109/ICITE.2018.8492545>
- Didyk, L., Gorgo, Yu., Prigancova, A., Tunyi, I., Vaczyova, M., Mamilov, S., Dirckx, J., 2012. The Effects of Atmospheric Pressure Fluctuations on

- Human Behaviour Related to Injury Occurrences: Study on the Background of Low and Moderate Levels of Geomagnetic Activity. International Scholarly Research Network 2012, 791524. <https://doi.org/10.5402/2012/791524>
- Eck, M.A., Konrad, Ch.E., Rayne, S., Black, A.W., 2022. Understanding the Role of Rainfall Intensity on Relative Car Crash Risk in the Carolinas. *Weather, Climate, and Society* 14 (3), 965–978. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-22-0025.1>
- Funakubo, M., Sato, J., Mizumura, K., Suzuki, N., Messlinger, K., 2021. Craniofacial sensations induced by transient changes of barometric pressure in healthy subjects – A crossover pilot study. *Cephalalgia Reports* 4. <https://doi.org/10.1177/25158163211000362>
- Zeng, Q., Quddus, M.A., Ison, S., 2020. Investigating the impacts of real-time weather conditions on freeway crash severity: A Bayesian spatial analysis. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 112, 47–65. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082768>
- Jaroszowski, D., Hooper, E., Chapman, L., 2014. The impact of climate change on urban transport resilience in a changing world. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 38 (4), 448–463. <https://doi.org/10.1177/0309133314538741>
- Jin, M., McBroom, D.G., 2024. Investigating Road Ice Formation Mechanisms Using Road Weather Information System (RWIS) Observations. *Climate* 12 (5), 63. <https://doi.org/10.3390/cli12050063>
- Khan, M.N., Ahmed, M.M., 2023. A novel deep learning approach to predict crash severity in adverse weather on rural mountainous freeway. *Journal of Transportation Safety & Security* 15 (8), 795–825. <https://doi.org/10.1080/19439962.2022.2129891>
- Khattak, A.J., Mohamed, A.A., Khattak, A., 2020. Driver impairment detection and safety enhancement through comprehensive volatility analysis. Collaborative Sciences Center for Road Safety, Report no. CSCRS-R23.
- Lee, W.-K., Lee, H.-A., Hwang, S., Kim, H., Lim, Y.-H., Hong, Y.-Ch., Ha, E.-H., Park, H., 2015. Does Temperature Modify the Effects of Rain and Snow Precipitation on Road Traffic Injuries? *Journal of Epidemiology* 25 (8), 544–552. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20140244>
- Carrodano, C., 2024. Data-driven risk analysis of nonlinear factor interactions in road safety using Bayesian networks. *Sci. Rep.* 14, 18948. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69740-6>
- Omranian, E., Khattak, A., Alshareef, M., 2018. Exploring rainfall impacts on the crash risk on Texas roadways: A crash-based matched-pairs analysis approach. *Accident Analysis & Prevention* 117, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.03.030>
- Pechatnova, E.V., Safronov, K.E., 2020. Precipitation influence assessment on accidents risk outside built-up areas. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal* 17 (4), 512–522. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-512-522>
- Qiu, L., Nixon, W.A., 2008. Effects of Adverse Weather on Traffic Crashes: Systematic Review and Meta-Analysis. *Transportation Research Record* 2055 (1), 139–146. <https://doi.org/10.3141/2055-16>
- Redelmeier, D.A., Raza, S., 2017. Life-threatening motor vehicle crashes in bright sunlight. *Medicine* 96 (1), e5710. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000005710>
- Sangkharat, K., Thornes, J.E., Wachiradilok, P., Pope, F.D., 2021. Determination of the impact of rainfall on road accidents in Thailand. *Heliyon* 7 (2), e06061. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06061>
- Stevens, S.E., Schreck III, C.J., Saha, S., Bell, J.E., Kunkel, K.E., 2019. Precipitation and Fatal Motor Vehicle Crashes: Continental Analysis with High-Resolution Radar Data. *Bulletin of the American Meteorological Society* 100 (8), 1453–1461. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0001.1>
- Theofilatos, A., 2017. Incorporating real-time traffic and weather data to explore road accident likelihood and severity in urban arterials. *Journal of Safety Research*, 61, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2017.02.003>
- Theofilatos, A., Yannis, G., 2014. A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. *Accident Analysis & Prevention* 72, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.017>
- Usman, T., Fu, L., Miranda-Moreno, L.F., 2010. Quantifying the safety effects of winter road maintenance using data from instrumented vehicles. *Accident Analysis & Prevention* 42 (6), 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.05.008>
- Wu, Y., Abdel-Aty, M., Lee, J., 2018. Crash risk analysis during rain conditions using real-time weather and traffic data. *Accident Analysis & Prevention* 114, 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.05.004>
- Wang S. et al. Coupling impacts of spray and rainfall on road visibility and vehicle speeds: a simulation-based analysis //Canadian Journal of Civil Engineering. – 2022. – Т. 49. – №. 7. – С. 1220-1230. <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0402>

Статья поступила в редакцию 02.07.2025, одобрена после рецензирования 16.07.2025, принята к публикации 24.07.2025

The article was submitted 02.07.2025, approved after reviewing 16.07.2025, accepted for publication 24.07.2025.

Информация об авторах:

1. Наталья Савченко, аналитик, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0001-7478-8182>, nata.savchenko.1999@bk.ru
2. Татьяна Кудрявцева, д.э.н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0000-0003-1403-3447>, tankud28@mail.ru
3. Родионова Мария, ведущий аналитик, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0000-0002-6972-2082>, rodionova_ma@spbstu.ru

About authors:

1. Natalia Savchenko, Analyst, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0009-0001-7478-8182>, nata.savchenko.1999@bk.ru
2. Tatiana Kudryavtseva, Doctor of Economics, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-1403-3447>, tankud28@mail.ru
3. Maria Rodionova, uncredited, Senior Analyst, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0002-6972-2082>, rodionova_ma@spbstu.ru

Научная статья

УДК 338.24

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.2>

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ: ВЫЗОВЫ И РЕШЕНИЯ ЧЕРЕЗ СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Марина Малащенко^{}, Евгений Середин^{}, Екатерина Терешко*^{}

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, malashenko.marina.r@yandex.ru, seredin.evgeny2010@yandex.ru, ektereshko@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку: ektereshko@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается проблема цифровизации проектирования нефтегазовых месторождений, целью которой является разработка стратегической карты для управления процессом цифровой трансформации на стадии проектирования месторождений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности и интеграции новых технологий в условиях растущей технологической сложности. Объектом исследования является процесс проектирования нефтегазовых месторождений, а методология включает анализ современных проблем цифровой трансформации и изучение внедряемых технологий, таких как: BIM, цифровые двойники, облачные платформы для совместной работы, искусственный интеллект, машинное обучение, AR/VR, большие данные. В результате анализа выявлены ключевые проблемы и направления цифровизации, а также разработана структура стратегической карты цифровой трансформации субъектов экономической деятельности при разработке нефтегазового месторождения (процесс проектирования), которая связывает цифровые инициативы с целями компании (экономического субъекта). Для стратегической карты определены целевые ориентиры, подцели в целевых ориентирах и индикаторы контроля. В заключении подчеркивается, что применение стратегической карты позволит объединить разрозненные инициативы, повысить управляемость трансформацией и создать устойчивую инфраструктуру для проектирования нефтегазовых объектов, что имеет важное значение для конкурентоспособности компаний в отрасли.

Ключевые слова: цифровизация, цифровые технологии, проектирование, нефтегазовая отрасль, нефтегазовое месторождение, стратегический подход, стратегическая карта.

Цитирование: Малащенко, М., Середин, Е., Терешко, Е., 2025. Цифровизация проектирования в нефтегазовой отрасли: вызовы и решения через стратегический подход. Sustainable Development and Engineering Economics. 3, 2. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.2>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Малащенко М., Середин Е., Терешко Е. 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.2>

DIGITALIZATION OF DESIGN IN THE OIL AND GAS INDUSTRY: CHALLENGES AND SOLUTIONS THROUGH A STRATEGIC APPROACH

Marina Malashenko^{}, Evgeny Seredin^{}, Ekaterina Tereshko*^{}

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, malashenko.marina.r@yandex.ru, seredin.evgeny2010@yandex.ru, ektereshko@mail.ru

*Corresponding author: ektereshko@mail.ru

Abstract

The article discusses the problem of digitalization of oil and gas field design, the purpose of which is to develop a strategic map for managing the process of digital transformation at the stage of field design. The relevance of the research is determined by the need to increase the efficiency and integration of new technologies in the context of increasing technological complexity. The object of the research is the process of designing oil and gas fields, and the methodology includes the analysis of modern problems of digital transformation and the study of implemented technologies such as BIM, digital twins, cloud platforms for collaboration, artificial intelligence, machine learning, AR/VR, Big Data. As a result of the analysis, key problems and directions of digitalization were identified, and the structure of the strategic map of the digital transformation of economic entities in the development of an oil and gas field (design process) was developed, which links digital initiatives with the goals of the company (economic entity). Targets, sub-targets in targets, and control indicators are defined for the strategic map. In conclusion, it is emphasized that the application of the strategic map will make it possible to combine disparate initiatives, increase the manageability of transformation and create a sustainable infrastructure for the design of oil and gas facilities, which is important for the competitiveness of companies in the industry.

Keywords: digitalization, digital technologies, design, oil and gas industry, oil and gas field, strategic approach, strategic map.

Citation: Malashenko, M., Seredin, E., Tereshko, E., 2025. Digitalization of design in the oil and gas industry: challenges and solutions through a strategic approach. *Sustainable Development and Engineering Economics* 3, 2. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.2>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Malashenko M., Seredin E., Tereshko E. 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

При строительстве нефтегазовых месторождений проектирование является ключевой стадией жизненного цикла месторождения. Качество выполнения работы на данном этапе влияет на технические, экономические и экологические показатели при дальнейшей эксплуатации. Именно при проектировании закладываются принципы организации производственной инфраструктуры, определяются принципы управления ресурсами, а также изучаются пути взаимодействия с окружающей средой. В условиях роста технологической сложности и необходимости повышения эффективности традиционные подходы к проектированию все чаще дополняются или заменяются цифровыми решениями.

Объектом данного исследования является процесс проектирования нефтегазовых месторождений, рассматриваемый в контексте цифровой трансформации.

В последнее время во всех секторах экономики, в том числе и в нефтегазовом секторе, процесс цифровизации и цифровой трансформации стал одним из приоритетов стратегического развития (Tikhonov and Stepanenko, 2021). Самыми популярными технологиями, внедряемыми компаниями, являются цифровые двойники (Digital Twins), интегрированные платформы, системы управления инженерными данными, искусственный интеллект и т.п. (Kovari, 2025). Тем не менее в области проектирования нефтегазового месторождения цифровая трансформация происходит несистемно и реализуется через отдельные инициативы. Это снижает эффект от внедрения современных цифровых технологий и замедляет процесс цифровизации отрасли (Sergeeva et al., 2018). На этом фоне разработка целостного управленческого подхода, который поможет создать комплексную стратегию цифрового развития проектирования нефтегазового месторождения, является крайне актуальной задачей. На ее основе можно сформулировать следующую *научную проблему*: на сегодняшний день отсутствует инструмент стратегического управления процессом цифровой трансформации, применяемый на стадии проектирования нефтегазовых месторождений.

Для решения данной проблемы, в рамках текущего исследования, предлагается использовать стратегическую карту как инструмент, способный объединить разрозненные цифровые инициативы в единую систему, связать их с целями компании (субъектом экономической деятельности) и обеспечить управляемость трансформацией. Стратегическая карта позволит наглядно отразить взаимосвязи между целями, задачами и цифровыми проектами, задать траекторию изменений и создать основу для мониторинга прогресса.

Таким образом, в качестве *предмета исследования* можно выделить цифровизацию процесса проектирования нефтегазового месторождения.

Цель исследования – разработка методики проектирования нефтегазового месторождения после цифровой трансформации стадии проектирования нефтегазовых месторождений для компаний (субъектов экономической деятельности). Реализация поставленной цели требует решения следующих *задач*:

1. выявить современные проблемы и направления цифровой трансформации в нефтегазовой отрасли;
2. проанализировать цифровые технологии, наиболее значимые для повышения эффективности проектирования;
3. разработать структуру стратегической карты, отражающую специфику проектирования нефтегазовых объектов;

4. наполнить стратегическую карту в соответствии с компонентами и разработать целевые индикаторы;
5. сформулировать рекомендации по практическому применению стратегической карты в процессе проектирования нефтегазового месторождения и разработать методику проектирования нефтегазового месторождения после цифровой трансформации.

Таким образом, в центре внимания исследования находится создание практико-ориентированного инструмента, способного создать стратегию цифровой трансформации этапа проектирования нефтегазового месторождения.

2. Обзор литературы

В мировой литературе описывается, что цифровая трансформация главным образом происходит на этапе эксплуатации месторождения, а именно в процессе добычи углеводородов, тогда как проектированию уделяется меньше внимания (Meza et al., 2024; Bhandari et al., 2024). Наиболее ярко это видно при рассмотрении цифровых двойников. Создаваемая цифровая модель месторождения позволяет повысить эффективность его эксплуатации, что включает в себя прогнозирование отказов, управление активами и оптимизацию процесса обслуживания (Yun et al., 2024). Это говорит о том, что акцент в использовании цифровых двойников делается на практическое применение, но практически не затрагивает использование цифровых решений на этапе проектирования.

Значительная часть исследований также посвящена использованию Интернета вещей (Internet of Things) и аналитике – датчики позволяют в реальном времени мониторить состояние оборудования и при необходимости принимать оперативные решения по оптимизации работы оборудования. Анализ статистики позволяет принимать управленческие решения, направленные на изменение режимов работы оборудования с целью повышения ее эффективности. Как и в случае с цифровым двойником, данные технологии используются и развиваются при эксплуатации месторождения (Liang et al., 2023; Beketov et al., 2024).

Помимо цифровых двойников и Интернета вещей, в мировой литературе отмечается широкий спектр других решений, которые активно внедряются в нефтегазовой отрасли. Особое место среди них занимают технологии анализа больших данных (Big Data), позволяющие объединять разрозненные массивы геологической, геофизической, производственной и финансовой информации (Mohammadpoor et al., 2020). Их использование существенно снижает уровень неопределенности при планировании и принятии управленческих решений, а также делает возможным построение более точных прогнозных моделей. Исследователи подчеркивают, что сочетание больших данных с алгоритмами машинного обучения открывает новые горизонты в понимании закономерностей поведения залежей, моделировании сложных процессов добычи и переработки, а также в создании систем предиктивной аналитики (Egbunokei et al., 2024). Однако практические примеры применения этих решений по-прежнему сосредоточены в сфере эксплуатации, тогда как вопросы их интеграции в проектные этапы остаются в значительной мере вне поля зрения научных работ (Patel et al., 2020).

Другим активно развивающимся направлением становятся облачные сервисы и платформенные решения. Они позволяют компаниям отказаться от масштабных инвестиций в собственную инфраструктуру и использовать распределенные вычислительные мощности и специализированные программные продукты для интеграции данных и ускоренной обработки информации (Stumpp et al., 2024), создавая условия для большей гибкости и оперативности

управления проектами. Наряду с этим набирают популярность технологии дополненной и виртуальной реальности: применяются для подготовки персонала, визуализации геологических моделей, удаленных инспекций и повышения безопасности работ (Junior et al., 2022; Mota et al., 2025). Несмотря на очевидные преимущества, их использование в контексте стратегического планирования носит эпизодический характер, что подчеркивает недостаточную проработку этой области в научных публикациях.

Говоря про стратегическое планирование цифровой трансформации, стоит упомянуть стратегические подходы самих компаний (Fernandez-Vidal. et al., 2022). В их основе лежат такие элементы, как создание корпоративных центров цифровых компетенций, переход к единой цифровой платформе управления активами, стандартизация процессов сбора и обработки данных и развитие концепции «умных месторождений». В литературе неоднократно отмечается, что цифровизация воспринимается компаниями не только как способ повышения производственной эффективности, но и как важный инструмент достижения экологических и социальных целей – от сокращения углеродного следа до оптимизации энергопотребления (Hanson et al., 2023).

Примеры стратегических программ крупнейших корпораций подтверждают этот тренд. Так, Shell реализует инициативу Smart Fields, в рамках которой создаются «виртуальные месторождения», позволяющие моделировать сценарии добычи и оперативно корректировать параметры работы оборудования. Однако акцент в этой программе смещен в сторону эксплуатации, тогда как проектный этап остается второстепенным¹. BP развивает стратегию цифровых двойников, предусматривающую создание цифровых копий не только отдельных установок, но и целых комплексов. Цифровые модели интегрируются с системами предиктивной аналитики и сенсорными данными, что повышает надежность оборудования и снижает риски простоев. При этом цифровая трансформация у BP в большей степени рассматривается как средство оптимизации текущих процессов, а не как инструмент совершенствования проектирования². Equinor в своей программе Omnia делает ставку на объединение геофизических данных, производственных показателей и экономических метрик в единой системе. При помощи облачных технологий и методов машинного обучения компания совершенствует процессы бурения и добычи, а также реализует инициативы по сокращению углеродного следа. Тем не менее даже столь продвинутая стратегия в большей мере нацелена на интеграцию данных и оперативное управление³. Saudi Aramco также продвигает концепцию Smart Fields, внедряя большие данные для прогнозирования объемов добычи, дополненную и виртуальную реальность (Augmented Reality / Virtual Reality, AR/VR) для обучения персонала и цифровые платформы для удаленного управления активами. В стратегическом плане

¹ McArdle, Sh., 2021. Unlocking the hidden value of data with a unified digital twin. Available at: <https://www.worldoil.com/magazine/2021/may-2021/features/unlocking-the-hidden-value-of-data-with-a-unified-digital-twin/> (accessed 17.02.2025); Davis, D., 2023. How Shell is Evolving its Digital Twin to Drive Business Value. Available at: <https://www.oilandgasiq.com/data-analytics/articles/how-shell-is-evolving-its-digital-twin-for-bigger-business-value> (accessed 17.02.2025).

² Oil & Gas IQ Editor, 2022. How BP and Chevron Use Digital Twins to Optimize Assets. Available at: <https://www.oilandgasiq.com/digital-transformation/articles/how-bp-and-chevron-use-digital-twins-to-optimize-assets> (accessed 17.02.2025).

³ GlobalData, 2024. Equinor ASA – Digital Transformation Strategies. Available at: <https://www.globaldata.com/store/report/equinor-asa-enterprise-tech-analysis/> (accessed 17.02.2025).

компания рассматривает цифровизацию как важнейший фактор устойчивого развития, связывая ее с задачами повышения энергоэффективности и экологической безопасности⁴.

Таким образом, сопоставление различных источников и практических кейсов показывает, что даже у крупнейших корпораций цифровизация преимущественно ассоциируется с эксплуатационной фазой. В то же время проектирование, от качества которого зависит эффективность всего последующего жизненного цикла месторождения, получает значительно меньше внимания. Этот пробел в существующих подходах подчеркивает научную и практическую актуальность исследования, в рамках которого цифровая трансформация рассматривается не только как инструмент повышения эффективности текущих процессов, но и как средство формирования более надежных и экономически обоснованных проектных решений. Помимо этого, рассмотренные примеры применения технологий или создания стратегий касаются отдельных компаний или производственных корпораций, тогда как только комплексное развитие отрасли позволит совершить процесс цифровой трансформации наиболее эффективным образом, что подчеркивает актуальность исследуемой темы.

3. Материалы и методы

Исследование проводилось в несколько этапов в соответствии с определенными задачами исследования.

Первый этап посвящен изучению проблем и направлений цифровой трансформации в нефтегазовом секторе на стадии проектирования. Для этого проводился качественный анализ открытых источников, включая отчеты нефтегазовых компаний, публикации в профильных изданиях и стратегические документы, касающиеся цифровизации. Такой подход позволил не только зафиксировать наличие цифровых инициатив, но и выявить ключевые затруднения: фрагментарность процессов, слабую интеграцию решений и недостаток стратегической координации именно на проектной стадии.

На втором этапе был проведен анализ применяемых цифровых технологий, с акцентом на те, которые могут быть использованы при проектировании. Для этого была сформирована сводная таблица цифровых решений, где рассматривались их функции, уровень внедрения в отрасли и потенциальное влияние на эффективность.

Третий этап включал в себя разработку логики и создание структуры стратегической карты, адаптированной не только под региональное развитие, но и учитывающее задачу повышения уровня цифровизации стадии проектирования.

Четвертый этап включал в себя наполнение стратегической карты и ее компонентов ключевыми целевыми ориентирами, а также разработку целевых индикаторов, которые в количественном выражении смогут показывать степень достижения того или иного ориентира в данный момент времени.

Завершающий этап исследования был направлен на подготовку практических рекомендаций и разработку методики проектирования нефтегазового месторождения после цифровой трансформации. Использовался сценарный подход – рассматривались несколько возможных моделей внедрения стратегической карты в практику компаний с разным уровнем цифровой

⁴ Derrick, M., 2024. How SLB & Aramco Drive Digital Solutions for Sustainability. <https://energydigital.com/sustainability/how-slb-aramco-drive-digital-solutions-for-sustainability> (accessed 17.02.2025).

зрелости. Это позволило предложить гибкую структуру, которую можно адаптировать под реальные условия.

4. Результаты

Современная нефтегазовая отрасль находится на этапе интенсивной цифровой трансформации, которая постепенно перестает ограничиваться лишь эксплуатацией объектов и выходит на стратегический уровень управления жизненным циклом месторождений. Цифровизация становится необходимостью не только для повышения производственной эффективности, но и для обеспечения устойчивого развития, экологической безопасности и снижения операционных рисков. В то же время процесс внедрения цифровых решений сопровождается целым рядом вызовов, характерных для отрасли (Haouel et al., 2024).

Одной из ключевых проблем является высокая капиталоемкость цифровых проектов. Внедрение технологий искусственного интеллекта, машинного обучения, предиктивной аналитики, облачных платформ и цифровых двойников требует значительных инвестиций не только в программное обеспечение, но и в сенсорные системы, вычислительную инфраструктуру и интеграцию с существующим оборудованием. Для многих компаний, особенно работающих в условиях волатильности мировых цен на углеводороды, вопрос окупаемости таких проектов остается открытым (Wanasinghe et al., 2020).

Сложности создает также интеграция цифровых решений с устаревшими производственными системами. Большинство объектов отрасли были построены десятилетия назад и часто не рассчитаны на подключение современных датчиков Интернета вещей, облачных платформ или высокопроизводительных вычислительных систем. В результате компании сталкиваются с необходимостью разработки индивидуальных интеграционных решений, что повышает как временные, так и финансовые издержки (Mohammed et al., 2022).

Не менее значимой является кадровая проблема. Эффективное использование цифровых технологий требует специалистов с компетенциями в инженерии, анализе данных, программировании, кибербезопасности и управлении проектами. Однако на рынке труда наблюдается нехватка профессионалов с таким комплексным набором навыков, что замедляет процесс внедрения инноваций.

Параллельно с этим сохраняется высокий уровень технологической и организационной неопределенности. Компании вынуждены адаптироваться к постоянным изменениям рыночной конъюнктуры, законодательных требований и экологических стандартов. Это требует гибких цифровых платформ, способных интегрировать разнородные данные – от геологических и геофизических исследований до показателей эксплуатации и финансовой аналитики – и предоставлять аналитические инструменты для принятия управленческих решений в реальном времени.

На фоне этих проблем можно выделить основные направления цифровой трансформации. К ним можно отнести:

1. цифровые двойники и виртуальные месторождения, позволяющие моделировать работу объектов в различных сценариях, прогнозировать отказ оборудования и оптимизировать процессы добычи и переработки;

2. применение больших данных и машинного обучения, интеграцию геологоразведочных, производственных и экономических данных для построения предиктивных моделей и сокращения неопределенности при принятии решений;

3. облачные и платформенные решения, обеспечивающие масштабируемость вычислительных мощностей, интеграцию разнородных источников информации и оперативное управление проектами на удаленных объектах;

4. AR/VR и инструменты визуализации, используемые для подготовки персонала, удаленных инспекций, моделирования технологических процессов и повышения безопасности работ;

5. экологическую цифровизацию, направленную на мониторинг углеродного следа, оптимизацию энергопотребления и снижение экологических рисков через интеграцию цифровых инструментов в процессы планирования и эксплуатации.

Таким образом, современная цифровая трансформация в нефтегазовой отрасли формирует комплексный подход, который сочетает технологии, организационные изменения и стратегическое планирование. Основная цель – создать цифровую экосистему, способную управлять всеми стадиями жизненного цикла месторождения, от проектирования до вывода из эксплуатации, минимизируя риски и повышая эффективность (Beketov et al., 2024). При этом наибольшие трудности остаются связаны с интеграцией устаревших систем, высокими затратами, кадровым дефицитом и необходимостью обеспечения кибербезопасности. Преодоление этих барьеров определяет будущее отрасли и задает вектор развития корпоративной стратегии цифровизации.

Несмотря на наличие барьеров, современное проектирование в нефтегазовой отрасли все же переживает изменения под воздействием развития цифровых технологий.

Традиционные методы, основанные на последовательной обработке геологических и инженерных данных, постепенно уступают место интегрированным цифровым платформам, которые позволяют объединять разнородные источники информации в единую систему. Одним из наиболее значимых направлений выступает внедрение технологий информационного моделирования (Building Information Modeling, BIM), которые дают возможность создавать цифровые двойники объектов инфраструктуры. Такие модели позволяют не только визуализировать проект на ранних стадиях, но и прогнозировать его поведение в эксплуатации, снижая риски дорогостоящих ошибок (Lee et al., 2018).

Большую роль играет использование облачных технологий и распределенных вычислений, благодаря которым команды проектировщиков, инженеров и подрядчиков могут работать синхронно, находясь в разных регионах, а иногда и странах. Это существенно сокращает время согласования решений и ускоряет переход от проектирования к строительству. Еще одним приоритетным направлением становится применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта, которые позволяют анализировать огромные объемы геофизических и производственных данных для выбора оптимальных проектных решений, прогнозирования ресурсоемкости и оценки возможных рисков.

Не менее важной технологией, усиливающей качество проектирования, является использование AR/VR. Данные технологии позволяют инженерам проводить «цифровые обходы» проектируемых объектов, выявлять слабые места на ранних стадиях и формировать более

точные спецификации оборудования, что напрямую связано с повышением безопасности, так как потенциальные инциденты моделируются еще до начала строительства.

Существенное значение имеет и применение больших данных для анализа исторической информации о буровых операциях, эксплуатации месторождений и техническом состоянии оборудования. Совместное использование этих массивов с интеллектуальными аналитическими системами дает возможность формировать более реалистичные и гибкие проектные сценарии (Perrons et al., 2013).

Таким образом, ключевыми технологиями, определяющими рост эффективности проектирования в нефтегазовой отрасли, становятся BIM и цифровые двойники, облачные платформы для совместной работы, искусственный интеллект и машинное обучение, AR/VR, а также большие данные. Их комплексное применение формирует основу для перехода от традиционного проектирования к интеллектуальному, что снижает издержки, ускоряет внедрение проектов и повышает их устойчивость в долгосрочной перспективе.

Для исследования возможности комплексного внедрения упомянутых технологий в процесс проектирования нефтегазовых месторождений было рассмотрено создание стратегической карты (Bolsunovskaya et al., 2023). Стратегическая карта включает четыре составляющие (компоненты): «Наука и инновации (в обучении и обществе)», «Промышленность и предпринимательство», «Общество и рынок» и «Региональные финансы», каждый из которых имеет свои целевые ориентиры (Kozlov and Tereshko, 2018; Kozlov et al., 2016).



Рисунок 1. Стратегическая карта цифровой трансформации субъектов экономической деятельности при разработке нефтегазового месторождения (процесс проектирования)

На рис. 1 представлена стратегическая карта, разработанная авторами в публикации (Malashenko et al., 2025), которая отражает, как нематериальные активы в компоненте «Наука и инновации (в обучении и обществе)» преобразуются в финансовые результаты, способствующие достижению целей в области региональных финансов в компоненте «Финансы региона». Отметим, что стратегическая карта формировалась с ориентиром на ключевые нормативные документы как на федеральном уровне (нац. проекты/программы: «Средства производства и автоматизации» – 2025– 2027 гг.; «Экономика данных» – 2025– 2030 гг.), так и на региональном («Стратегия в области цифровой трансформации отраслей экономики,

социальной сферы и государственного управления»). Данную стратегическую карту рассмотрим детально, введем подцели в целевых ориентирах и индикаторы контроля (см. табл. 1).

Таблица 1. Детализация составляющих стратегической карты

Цель	Индикатор контроля	Тип индикатора
НАУКА И ИННОВАЦИИ (В ОБУЧЕНИИ И ОБЩЕСТВЕ)		
<i>Исследования и разработки</i>		
Повышение эффективности процесса проектирования разработки месторождения за счет внедрения инновационных решений	Сокращение сроков проектирования по сравнению с базовым, % Число используемых передовых производственных технологий, ед.	Количественный Количественный
<i>Интеграция образовательных программ</i>		
Развитие цифровых компетенций персонала	Доля сотрудников, прошедших обучение на цифровых образовательных платформах, %	Количественный
<i>Создание инновационных экосистем</i>		
	Количество выданных патентов, ед.	Количественный
Обеспечение развития науки и инноваций в регионе	Удельный вес организаций, осуществляющих технологические инновации в общем числе обследованных организаций, % от общего числа организаций Уровень инновационной активности организаций	Количественный Качественный
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВО		
<i>Стимулирование инноваций</i>		
Обеспечение развития разработки нефтегазовых месторождений	Доля инвестиций в основной капитал в ВВП, в ВРП, % Прирост высокопроизводительных рабочих мест, ед	Количественный Количественный
<i>Увеличение производительности</i>		
Повышение производительности труда за счет внедрения цифровых технологий	Индекс производительности труда по основным отраслям экономике	Качественный
Рост эффективности использования основных фондов благодаря цифровой трансформации	Индексы изменения фондоотдачи	Качественный

Цель	Индикатор контроля	Тип индикатора
ОБЩЕСТВО И РЫНОК		
<i>Увеличение прозрачности процессов</i>		
Автоматизация бизнес-процессов	Сокращение времени подготовки управленческой отчетности, %	Количественный
Обеспечение прозрачности бизнес-процессов	Доля решений, принятых на основе цифровых данных, %	Количественный
<i>Рост инновационного и научного потенциала</i>		
Обеспечение роста уровня развития науки и инноваций	Доля ВРП по виду деятельности – профессиональная, научная и техническая, % (в текущих основных ценах; в % к итогу)	Количественный
Повышение вовлеченности организаций в инновации	Уровень инновационной активности организаций	Качественный
ФИНАНСЫ РЕГИОНА		
<i>Оптимизация инвестиционных потоков</i>		
Устойчивость финансов региональных строительных организаций	Кредитоспособность региональных строительных организаций	Качественный
Инвестиционная привлекательность региона	Доля привлеченных инвестиций, %	Количественный
<i>Снижение затрат на проектирование</i>		
Оптимизация затрат на проектирование	Снижение удельных затрат на проектирование, %	Количественный
Повышение эффективности проектирования	Доля проектов, выполненных при помощи цифровых технологий, %	Количественный

Далее рассмотрим рекомендации для субъектов экономической деятельности по практическому применению стратегической карты цифровой трансформации в процессе проектирования нефтегазовых месторождений, которые включают:

1. *оптимизацию процессов проектирования* – внедрение цифровых платформ, специализированных программных решений для моделирования и проектирования, способствует сокращению сроков проектирования и повышению точности результатов; стандартизация процессов проектирования позволит упростить и ускорить выполнение задач;

2. *инновационные технологии* – инвестиции в передовые технологии, такие как 3D-моделирование, AR/VR, могут значительно улучшить визуализацию проектов; создание условий для патентования разработанных технологий играет ключевую роль в стимулировании

инновационной активности сотрудников и формировании внутренней мотивации к генерации новых идей;

3. *обучение и развитие персонала* – систематическая организация курсов и тренингов по работе с цифровыми технологиями становится важным инструментом повышения квалификации специалистов; инвестиции в образовательные программы для инженеров и проектировщиков не только позволяют повысить уровень их компетенций, но и обеспечивают эффективное применение современных цифровых решений в практической деятельности;

4. *инвестиции и финансирование* – для долгосрочного успеха необходима разработка продуманных стратегий привлечения инвестиций в инновационные проекты; использование как государственных, так и частных источников финансирования формирует устойчивую основу для развития; при этом важным условием остается регулярная оценка финансовой устойчивости компаний, обеспечивающая надежность и предсказуемость проектной деятельности;

5. *управление на основе данных* – внедрение инструментов сбора и анализа информации позволяет принимать управленческие решения, опираясь на фактические данные, а не на интуицию; применение цифровых двойников месторождений значительно повышает качество планирования и эффективность управления проектами;

6. *инновации и устойчивое развитие* – проектирование объектов нефтегазовой отрасли должно учитывать экологическую составляющую; использование технологий, снижающих негативное воздействие на окружающую среду, в сочетании с поддержанием внутрикорпоративной культуры инноваций способствует росту конкурентоспособности и формированию позитивного имиджа компании.

7. *Мониторинг и оценку результатов* – создание системы контроля ключевых показателей эффективности (Key Performance Indicators, KPI) позволяет отслеживать ход цифровой трансформации и своевременно корректировать стратегические действия; сравнение достигнутых результатов с плановыми целями помогает выявлять слабые стороны и зоны для совершенствования;

8. *сотрудничество и партнерство* – активное взаимодействие с научными центрами, технологическими компаниями и отраслевыми организациями обеспечивает обмен опытом и способствует появлению совместных проектов; участие в специализированных конференциях и форумах позволяет быть в курсе современных тенденций и внедрять лучшие практики.

Применение перечисленных рекомендаций создает основу для эффективного использования стратегической карты цифровой трансформации в проектировании нефтегазовых месторождений. Это, в свою очередь, повышает общую эффективность деятельности компаний, способствует сокращению издержек и улучшает качество проектируемых объектов.

В качестве основного результата данного исследования на основе стратегической карты и рекомендаций, приведенных выше, была разработана концептуальная методика по проектированию нефтегазового месторождения. Данная методика будет представлена в контексте сравнения процессов AS IS – TO BE.

В классическом виде проектирование нефтегазового месторождения является сложным и многоэтапным процессом, включающим сбор и систематизацию геологических, гидрологических, экологических и технических данных, подготовку проектной документации, оценку

возможных рисков и ресурсов, а также контроль за выполнением всех проектных решений. В традиционной модели проектирования основной упор делается на ручной труд, при этом данные часто хранятся разрозненно, а возможности для прогнозирования и оперативного управления остаются ограниченными.

Цифровая трансформация проектного процесса нацелена на создание интегрированной и автоматизированной системы, которая не только ускоряет выполнение работ, но и повышает точность расчетов, улучшает качество проектных решений, снижает затраты и обеспечивает внедрение инновационных подходов в деятельности компании.

На этапе анализа текущего процесса можно выделить несколько ключевых моментов. Во-первых, сбор данных проводится из различных источников, включая полевые исследования, архивные материалы и инженерные расчеты. В существующей практике данные часто хранятся локально или в бумажном виде, что затрудняет их обработку, повышает вероятность ошибок при вводе информации и создает трудности при объединении разрозненных источников в единое информационное пространство.

Во-вторых, этап проектирования и моделирования реализуется преимущественно через традиционные инженерные расчеты и двухмерные чертежи. Проектировщики разрабатывают схемы размещения скважин, инфраструктуры и логистических маршрутов без применения централизованных цифровых моделей, что ограничивает возможности визуализации проектных решений и усложняет раннее выявление потенциальных проблем.

Третий аспект касается согласования и управления проектом. В традиционной модели это осуществляется через бумажные документы или электронную переписку с участием нескольких подразделений. Такой подход увеличивает риск задержек, ошибок и повторной проверки информации, а также не обеспечивает автоматизированного контроля сроков и бюджета. Решения, как правило, принимаются на основе опыта специалистов, что снижает оперативность и прозрачность процессов.

Наконец, контроль затрат и оценка эффективности проекта осуществляются вручную или с применением отдельных локальных инструментов. Отсутствие возможности мониторинга проекта в реальном времени затрудняет своевременное вмешательство и корректировку планов, что может приводить к перерасходу ресурсов или несвоевременному выявлению отклонений.

Таким образом, ключевые недостатки существующей практики включают длительность проектирования из-за низкой степени автоматизации, высокую вероятность ошибок и неточностей в данных, ограниченную прозрачность и доступность информации для всех участников процесса, слабую координацию между подразделениями, а также ограниченные возможности для анализа рисков и оптимизации проектных решений. Эти проблемы определяют необходимость перехода к цифровой модели проектирования, которая позволит повысить эффективность и управляемость всех этапов проектного процесса, минимизировать ошибки и создать основу для внедрения инновационных технологий.

Цифровая трансформация проектирования нефтегазового месторождения предполагает переход к интегрированной, автоматизированной и управляемой системе, которая обеспечивает слаженную работу всех участников проекта и повышает точность, скорость и качество принимаемых решений. В основе нового подхода лежит использование цифровых платформ,

современных программных средств моделирования, технологий визуализации и аналитики данных, что позволяет создавать единое информационное пространство и минимизировать зависимость от ручного труда.

На первом этапе цифрового проектирования формируется централизованная база данных, включающая геологические, гидрологические, экологические и технические сведения о месторождении. Данные поступают из полевых исследований, исторических архивов, сенсорных систем и геоинформационных источников, объединяются в единую цифровую платформу и становятся доступными в реальном времени для всех подразделений, участвующих в проекте. Такой подход обеспечивает прозрачность, упрощает обмен информацией и снижает риск ошибок при работе с данными.

Следующий этап предполагает создание цифрового двойника месторождения, включающего все ключевые объекты: скважины, инфраструктуру, транспортные маршруты и инженерные сети. Использование 3D-моделирования и технологий AR/VR позволяет проектировщикам визуально оценивать различные сценарии разработки, выявлять потенциальные проблемы на ранней стадии и проводить симуляцию чрезвычайных ситуаций, что значительно повышает надежность проектных решений.

Одним из ключевых элементов цифрового подхода является интегрированное управление проектом. Все подразделения работают через единую цифровую платформу, где автоматизировано распределяются задачи, фиксируются сроки и KPI. Применение алгоритмов оптимизации и машинного обучения позволяет прогнозировать производительность, выявлять узкие места, оценивать альтернативные сценарии и принимать решения на основании данных, а не только опыта специалистов.

Особое внимание в цифровой модели уделяется развитию компетенций персонала. Организуются онлайн-курсы, тренинги и практические занятия с цифровыми моделями и симуляторами, что позволяет специалистам быстро осваивать новые инструменты и технологии. Система сертификации и регулярной оценки навыков обеспечивает высокий уровень профессиональной подготовки и готовность сотрудников к работе с современными проектными решениями.

Контроль и мониторинг реализуются в режиме реального времени с использованием цифровых инструментов, что позволяет оперативно выявлять отклонения от плановых показателей, корректировать проектные решения и оптимизировать ресурсы. Система управления обеспечивает прозрачность всех процессов, фиксирует достижения по ключевым показателям стратегической карты и позволяет сравнивать текущие результаты с плановыми целями.

Цифровая трансформация также предполагает интеграцию инноваций и принципов устойчивого развития. В проект включаются экологические критерии, моделируются потенциальные воздействия на окружающую среду, оптимизируются транспортные и производственные потоки. Поддержка инновационной активности сотрудников, патентование новых решений и внедрение передовых технологий создают условия для непрерывного улучшения процессов и повышения конкурентоспособности компании.

В результате переход к цифровой модели проектирования позволяет сократить сроки и затраты на разработку месторождения, повысить точность и качество проектных решений, обеспечить прозрачность и управляемость всех этапов процесса, а также создать основу для

устойчивого внедрения инновационных технологий и повышения профессионального уровня сотрудников.

Табл. 2 представляет собой сравнение процесса проектирования нефтегазового месторождения по этапам в классическом варианте и при цифровой трансформации.

Таблица 2. Сравнение процесса проектирования нефтегазового месторождения по этапам в классическом варианте и при цифровой трансформации

Этап	AS IS	TO BE
Сбор данных	Локальные базы, бумажные документы, разрозненные источники	Централизованная цифровая платформа, Data Lake, интеграция сенсорных и GIS-данных
Проектирование	2D-чертежи, ручные расчеты, ограниченная визуализация	3D/VR/AR, цифровой двойник, автоматизированные расчеты, моделирование сценариев
Согласование	Бумажные документы, электронная почта, многократные итерации	Единая цифровая платформа, автоматизированное управление задачами, прозрачность KPI
Анализ рисков	Опыт проектировщиков	Машинное обучение, сценарное моделирование, прогнозирование аварийных ситуаций
Контроль	Ручной контроль, отчеты	Автоматический мониторинг KPI, корректировка проектов в реальном времени
Обучение персонала	Традиционные семинары и стажировки	Онлайн-курсы, практика на цифровых моделях, сертификация
Инновации	Ограниченная активность	Поддержка патентов, внедрение новых технологий, стимулирование сотрудников
Экология	Минимальный учет	Интеграция экологических критериев в проект и моделирование воздействия

Таким образом, цифровизация процессов проектирования нефтегазового месторождения существенно повышает их эффективность, позволяя оптимизировать работу и минимизировать ошибки. Использование цифровых двойников, технологий виртуальной и дополненной реальности, а также автоматизированных систем управления способствует сокращению сроков проектирования и снижению сопутствующих рисков. Единая платформа, объединяющая все подразделения и стандартизирующая процессы, обеспечивает прозрачность и контроль на каждом этапе реализации проекта. При этом развитие цифровых навыков сотрудников и поддержка инновационных решений создают прочную основу для стабильного и долгосрочного развития отрасли.

5. Обсуждение

В данном исследовании акцент сделан на критической оценке процесса проектирования нефтегазовых месторождений в контексте цифровой трансформации. Результаты, полученные в ходе анализа, подчеркивают, что традиционные подходы к проектированию становятся недостаточными для решения современных задач, связанных с увеличением технологической сложности и необходимостью повышения эффективности. В частности, выявлено, что отсутствие системного подхода к внедрению цифровых технологий приводит к фрагментации усилий и снижению общей эффективности процессов. Это подтверждает выводы других авторов (Winarni, 2024), которые также отмечают несогласованность инициатив в области цифровизации в нефтегазовом секторе.

Разработанная стратегическая карта цифровой трансформации субъектов экономической деятельности при разработке нефтегазового месторождения (процесс проектирования) как инструмент управления цифровой трансформацией представляет собой значимый инструмент в решении обозначенной проблемы. Она не только связывает разрозненные цифровые инициативы, но и интегрирует их в единую систему, что позволяет достичь синергетического эффекта. Это согласуется с мнением авторов (Tikhonov and Stepanenko, 2021), которые подчеркивают важность целостного подхода к стратегическому развитию в условиях цифровизации. Подводя итоги, можно отметить, что полученные результаты подтверждают необходимость разработки комплексных управленческих инструментов, которые будут способствовать более результативному внедрению цифровых технологий в нефтегазовую сферу.

Проведенный анализ показывает, что стратегическая карта способна существенно повысить прозрачность процессов проектирования и наладить более эффективное взаимодействие со всеми заинтересованными сторонами. Это особенно важно в условиях возрастающего внимания к экологическим и социальным аспектам деятельности компаний отрасли. Как подчеркивается в (Kovari, 2025), цифровые решения могут выступать катализатором для развития диалога с обществом и укрепления доверия к реализуемым проектам.

Использование стратегической карты не ограничивается лишь визуализацией целей и задач: она также обеспечивает системный мониторинг хода их достижения, что имеет ключевое значение для продвижения идей устойчивого развития. Практическая ценность проведенного исследования заключается в возможности применения его выводов при подготовке рекомендаций по интеграции стратегической карты в процессы проектирования месторождений. Это позволит компаниям не только эффективнее управлять цифровой трансформацией, но и повысить качество взаимодействия с внешними и внутренними стейкхолдерами.

Отдельно стоит подчеркнуть, что успешное внедрение подобного инструмента возможно лишь при активном включении всех участников процесса – от бизнеса и государственных структур до местных сообществ. Такой подход обеспечивает комплексное рассмотрение задач проектирования и соответствует современным тенденциям развития рынка. В этом контексте данное исследование не только выявляет актуальные проблемы, но и предлагает практические решения, направленные на совершенствование проектной деятельности в нефтегазовой отрасли.

Методика проектирования нефтегазового месторождения, разработанная на основе стратегической карты, позволяет оптимизировать процесс проектирования месторождений, а также повысить надежность этого процесса.

6. Заключение

В исследовании обоснована необходимость применения стратегической карты для управления цифровой трансформацией на стадии проектирования нефтегазовых месторождений. Традиционные подходы, хоть и эффективные, не удовлетворяют требованиям современного рынка, требующего гибкости и интеграции новых технологий. Предложенная стратегическая карта цифровой трансформации субъектов экономической деятельности при разработке нефтегазового месторождения (процесс проектирования) объединяет разрозненные инициативы в единую систему, соответствующую стратегическим целям компании (экономического субъекта).

Анализ показал, что компании сталкиваются с трудностями в интеграции новых технологий из-за отсутствия единой стратегии, нехватки квалифицированных кадров и разрозненности решений. Стратегическая карта предлагает системный подход к решению этих проблем, визуализируя взаимосвязи между целями и проектами.

Созданная структура карты выстроена с учетом особенностей проектирования объектов нефтегазовой отрасли и включает ключевые элементы, необходимые для цифровой трансформации. Использование индикаторов в ее наполнении дает возможность отслеживать динамику реализации целей и оперативно корректировать управленческие решения в зависимости от изменений внешней и внутренней среды. Это делает управление ресурсами более результативным.

Представленные рекомендации по применению стратегической карты и разработанная методика ориентированы на повышение эффективности и укрепление конкурентных позиций компаний в условиях цифровизации. Внедрение предложенного подхода позволит не только ответить на существующие вызовы, но и сформировать устойчивую основу для дальнейшего развития проектных решений в нефтегазовом комплексе. Практическая ценность работы заключается в укреплении методической базы управления проектами, а ее теоретическая значимость – в расширении представлений о механизмах цифровой трансформации отрасли.

Список литературы

- Bhandari, S., Paudyal, D.R., Chadalavada, S., 2024. Spatial Digital Twin Architecture for the Field Design Process of Oil and Gas Projects in Australia. *Land* 13 (7), 902. <https://doi.org/10.3390/land13070902>
- Egbumokei, P.I., Dienagha, I.N., Digitemie, W.N., Onukwulu, E.C., Oladipoet, O.T., 2024. The role of digital transformation in enhancing sustainability in oil and gas business operations. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation* 5 (5), 2582–7138. DOI: <https://doi.org/10.54660/ijmrge.2024.5.5.1029-1041>
- Fernandez-Vidal, J., Gonzalez, R., Gasco, J., Llopiset, J., 2022. Digitalization and corporate transformation: The case of European oil & gas firms. *Technological Forecasting and Social Change* 174, 121293. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121293>
- Hanson, E., Nwakile, Ch., Adebayo, Y.A., Esiriet, A.E., 2023. Conceptualizing digital transformation in the energy and oil and gas sector. *Global Journal of Advanced Research and Reviews* 1 (2), 15–30. <https://doi.org/10.58175/gjarr.2023.1.2.0059>
- Haouel, C., Nemeslaki, A., 2024. Digital Transformation in Oil and Gas Industry: Opportunities and Challenges. *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences* 32 (1), 1–16. <https://doi.org/10.3311/ppso.20830>
- Junior, L.G.S.D., Ferreira, C.V., Winkler, I., 2022. Virtual reality applied to product development in the oil and gas industry: A brief review. *Journal of Bioengineering, Technologies and Health* 5(4), 329–334. <https://doi.org/10.34178/jbth.v5i4.259>
- Kovari A.A., 2025. A Framework for Integrating Vision Transformers with Digital Twins in Industry 5.0 Context. *Machines* 13 (1), 36. <https://doi.org/10.3390/machines13010036>
- Lee, C.Y., Chong, H.Y., Wang, X., 2018. Streamlining Digital Modeling and Building Information Modelling (BIM) Uses for the Oil and Gas Projects. *Archives of Computational Methods in Engineering* 25 (2), 349–396. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9201-4>
- Liang, J., Ma, L., Liang, Sh., Zhang, H., Zuo, Zh., Dai, J., 2023. Data-driven digital twin method for leak detection in natural gas pipelines. *Computers and Electrical Engineering* 110, 108833. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108833>
- Meza, E.B.M., Souza, D.G.B. de, Copetti, A., Sobral, A.P.B., Silva, G.V., Tammela, I., Cardoso, R., 2024. Tools, Technologies and Frameworks for Digital Twins in the Oil and Gas Industry: An In-Depth Analysis. *Sensors* 24 (19), 6457. <https://doi.org/10.3390/s24196457>
- Mohammadpoor, M., Torabi, F., 2020. Big data analytics in oil and gas industry: An emerging trend. *Petroleum* 6 (4), 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.11.001>

- Mohammed, A.S., Reinecke, Ph., Burnap, P., Rana, O., Anthiet, E., 2022. Cybersecurity Challenges in the Offshore Oil and Gas Industry: An Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS) Perspective. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems (TCPS)* 6 (3), 1–27. <https://doi.org/10.1145/3548691>
- Mota, R., Sharlin, E., Alim, U., 2025. Designing Reality-Based VR Interfaces for Geological Uncertainty arXiv:2504.09355. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.09355>
- Patel, H., Prajapati, D., Mahida, D., Shahet, M., 2020. Transforming petroleum downstream sector through big data: A holistic review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 10 (6), 2601–2611. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00889-2>
- Perrons, R. K., Hems, A., 2013. Cloud computing in the upstream oil & gas industry: A proposed way forward. *Energy Policy* 56, 732–737. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.016>
- Stumpp, N., Aschenbrenner, D., Stahl, M., ABmuth, A., 2024. PLASMA – Platform for Service Management in Digital Remote Maintenance Applications arXiv:2405.11836. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.11836>
- Wanasinghe, T.R., Wroblewski, L., Petersen, B.K., Gosine, R.G., Jameset, L.A., De Silva, O. Mann, G.K.I., Warriar, P.J., 2020. Digital Twin for the Oil and Gas Industry: Overview, Research Trends, Opportunities, and Challenges. *IEEE Access* 8, 104175–104197. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998723>
- Winami E., Mujannahet, S., Halik, A., Pardosi, P., 2024. Reskilling and Upskilling: HR Adaptation Strategies to Digital Transformation in the Traditional Sector. *EKOMA: Jurnal Ekonomi, Manajemen, Akuntansi* 4 (1), 2747–2756. <https://doi.org/10.56799/ekoma.v4i1.6237>
- Yun, J., Kim, S., Kim, J., 2024. Digital Twin Technology in the Gas Industry: A Comparative Simulation Study. *Sustainability* 16 (14), 5864. <https://doi.org/10.3390/su16145864>
- Бекетов, С.М., Федяевская, Д.Э., Схведиани, А.Е., Редько, С.Г., Бурлуцкая, Ж.В., Цифровой инструмент автоматизации процессов сбора, хранения и обработки данных об инновационном развитии регионов // *Экономика. Информатика*. 2024. Т. 51. № 3. С. 735–748. <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2024-51-3-735-748>
- Болсуновская М.В., Гинцяк А.М., Федяевская Д.Э., Петряева А.А., Бурлуцкая Ж.В. Комплексное моделирование процессов нефтедобычи: аналитический обзор // *Автоматизация и информатизация ТЭК*. 2023. № 2 (595). С. 51–62. [https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2\(595\)-51-62](https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2(595)-51-62)
- Козлов А.В., Гутман С.С., Зайченко И.М., Рытова Е.В. Комплекс региональных индикаторов как инструмент формирования стратегии инновационно-промышленного развития районов Крайнего Севера // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. 2016. № 4 (246). С. 252–263. <https://doi.org/10.5862/JE.246.22>
- Козлов А.В., Терешко Е.К. Стратегическая карта развития образовательной системы мурманской области в условиях цифровой трансформации экономики. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2018. № 4 (60). С. 111–122. <https://doi.org/10.25702/KSC.2220-802X.4.2018.60.111-122>
- Малашенко М.Р., Середин Е.П., Терешко Е.К. Цифровая трансформация проектирования промышленных объектов: кейс нефтегазового месторождения // *Современные подходы в системном инжиниринге и цифровом моделировании сложных производственных систем*. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025. С. 83–90. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id25-191>
- Сергеева О.А., Ларионова О.А., Захарова О.Л. Цифровая трансформация – инновационный путь повышения эффективности управления в НГЛ России // *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. 2018. № 9. С. 33–37. <https://doi.org/10.30713/1999-6942-2018-9-33-37>
- Тихоной Ю.М., Степаненко Д.А. Цифровая трансформация в нефтегазовой отрасли // *Стратегии бизнеса*. 2021. Т. 9. № 2. С. 58–61. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2021-2-58-61>

References

- Beketov, S.M., Fedyaevskaya, D.E., Shvediani, A.E., Redko, S.G., Burlutskaya, J.V., 2024. A Digital Tool for Automating the Processes of Collecting, Storing and Processing Data on the Innovative Development of Regions. *Economics. Information Technologies* 51 (3), 735–748. <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2024-51-3-735-748>
- Bhandari, S., Paudyal, D.R., Chadalavada, S., 2024. Spatial Digital Twin Architecture for the Field Design Process of Oil and Gas Projects in Australia. *Land* 13 (7), 902. <https://doi.org/10.3390/land13070902>
- Bolsunovskaya, M.V., Gintciak, A.M., Fedyaevskaya, D.E., Petryaeva, A.A., Burlutskaya, Zh.V., 2023. Complex modeling of oil production processes: an analytical review. *Automation and informatization of the Fuel and Energy Complex* 2 (595), 51–62. [https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2\(595\)-51-62](https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2(595)-51-62)
- Egbumokei, P.I., Dienagha, I.N., Digitemie, W.N., Onukwulu, E.C., Oladipoet, O.T., 2024. The role of digital transformation in enhancing sustainability in oil and gas business operations. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation* 5 (5), 2582–7138. DOI: <https://doi.org/10.54660/ijmrge.2024.5.5.1029-1041>
- Fernandez-Vidal, J., Gonzalez, R., Gasco, J., Llopiset, J., 2022. Digitalization and corporate transformation: The case of European oil & gas firms. *Technological Forecasting and Social Change* 174, 121293. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121293>
- Hanson, E., Nwakile, Ch., Adebayo, Y.A., Esiriet, A.E., 2023. Conceptualizing digital transformation in the energy and oil and gas sector. *Global Journal of Advanced Research and Reviews* 1 (2), 15–30. <https://doi.org/10.58175/gjarr.2023.1.2.0059>
- Haouel, C., Nemeslaki, A., 2024. Digital Transformation in Oil and Gas Industry: Opportunities and Challenges. *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences* 32 (1), 1–16. <https://doi.org/10.3311/ppso.20830>
- Junior, L.G.S.D., Ferreira, C.V., Winkler, I., 2022. Virtual reality applied to product development in the oil and gas industry: A brief review. *Journal of Bioengineering, Technologies and Health* 5(4), 329–334. <https://doi.org/10.34178/jbth.v5i4.259>
- Kovari A.A., 2025. A Framework for Integrating Vision Transformers with Digital Twins in Industry 5.0 Context. *Machines* 13 (1), 36. <https://doi.org/10.3390/machines13010036>
- Kozlov, A.V., Gutman, S.S., Zaychenko, I.M., Rytova, E.V., 2016 The System of Regional Indicators as a Tool for Strategic Innovative Industrial Development of the Far North Regions. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics* 4 (246), 252–263. <https://doi.org/10.5862/JE.246.22>

- Kozlov, A.V., Tereshko, E.K., 2018. Strategic map for the development of the educational system of the Murmansk region in the context of the digital transformation of the economy. *The North and the Market: The Formation of an Economic Order* 4 (60), 111–122. <https://doi.org/10.25702/KSC.2220-802X.4.2018.60.111-122>
- Lee, C.Y., Chong, H.Y., Wang, X., 2018. Streamlining Digital Modeling and Building Information Modelling (BIM) Uses for the Oil and Gas Projects. *Archives of Computational Methods in Engineering* 25 (2), 349–396. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9201-4>
- Liang, J., Ma, L., Liang, Sh., Zhang, H., Zuo, Zh., Dai, J., 2023. Data-driven digital twin method for leak detection in natural gas pipelines. *Computers and Electrical Engineering* 110, 108833. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108833>
- Malashenko, M.R., Seredin, E.P., Tereshko, E.K., 2025. Digital transformation of industrial design: Case study of an oil and gas field, in: *Modern Approaches in System Engineering and Digital Modeling of Complex Production Systems*. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, pp. 83–90. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id25-191>
- Meza, E.B.M., Souza, D.G.B. de, Copetti, A., Sobral, A.P.B., Silva, G.V., Tammela, I., Cardoso, R., 2024. Tools, Technologies and Frameworks for Digital Twins in the Oil and Gas Industry: An In-Depth Analysis. *Sensors* 24 (19), 6457. <https://doi.org/10.3390/s24196457>
- Mohammadpoor, M., Torabi, F., 2020. Big data analytics in oil and gas industry: An emerging trend. *Petroleum* 6 (4), 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.11.001>
- Mohammed, A.S., Reinecke, Ph., Burnap, P., Rana, O., Anthiet, E., 2022. Cybersecurity Challenges in the Offshore Oil and Gas Industry: An Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS) Perspective. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems (TCPS)* 6 (3), 1–27. <https://doi.org/10.1145/3548691>
- Mota, R., Sharlin, E., Alim, U., 2025. Designing Reality-Based VR Interfaces for Geological Uncertainty arXiv:2504.09355. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.09355>
- Patel, H., Prajapati, D., Mahida, D., Shahet, M., 2020. Transforming petroleum downstream sector through big data: A holistic review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 10 (6), 2601–2611. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00889-2>
- Perrons, R. K., Hems, A., 2013. Cloud computing in the upstream oil & gas industry: A proposed way forward. *Energy Policy* 56, 732–737. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.016>
- Sergeeva, O.A., Larionova, O.A., Zaharova, O.L., 2018. Digital transformation as an innovational approach of enhancing management efficiency at Russian oil and gas industry. *Problems of economics and management of oil and gas complex* 9, 33–37. <https://doi.org/10.30713/1999-6942-2018-9-33-37>
- Stumpp, N., Aschenbrenner, D., Stahl, M., Abmuth, A., 2024. PLASMA – Platform for Service Management in Digital Remote Maintenance Applications arXiv:2405.11836. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.11836>
- Tikhopoy, Yu.M., Stepanenko, D.A., 2021. Digital transformation in the oil and gas industry. *Business Strategies* 9 (2), 58–61. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2021-2-58-61>
- Wanasinghe, T.R., Wroblewski, L., Petersen, B.K., Gosine, R.G., Jameset, L.A., De Silva, O. Mann, G.K.I., Warrian, P.J., 2020. Digital Twin for the Oil and Gas Industry: Overview, Research Trends, Opportunities, and Challenges. *IEEE Access* 8, 104175–104197. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998723>
- Winarni E., Mujannahet, S., Halik, A., Pardosi, P., 2024. Reskilling and Upskilling: HR Adaptation Strategies to Digital Transformation in the Traditional Sector. *EKOMA: Jurnal Ekonomi, Manajemen, Akuntansi* 4 (1), 2747–2756. <https://doi.org/10.56799/ekoma.v4i1.6237>
- Yun, J., Kim, S., Kim, J., 2024. Digital Twin Technology in the Gas Industry: A Comparative Simulation Study. *Sustainability* 16 (14), 5864. <https://doi.org/10.3390/su16145864>

Статья поступила в редакцию 02.07.2025, одобрена после рецензирования 16.07.2025, принята к публикации 24.07.2025

The article was submitted 02.07.2025, approved after reviewing 16.07.2025, accepted for publication 24.07.2025.

Информация об авторах

1. Марина Малашенко, специалист, Лаборатория “Цифровое моделирование производственных систем” ПИИШ «Цифровой инжиниринг» СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0008-5130-1774>, malashenko.marina.r@yandex.ru
2. Евгений Середин, специалист, Лаборатория “Цифровое моделирование производственных систем” ПИИШ «Цифровой инжиниринг» СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0003-6108-0323>, seredin.evgeny2010@yandex.ru
3. Екатерина Терешко, к.э.н, научный сотрудник, Лаборатория “Промышленные системы потоковой обработки данных” ПИИШ «Цифровой инжиниринг» СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0000-0001-7117-7549>, ektereshko@mail.ru

About authors:

1. Marina Malashenko, Specialist, Laboratory “Digital modeling of production systems” Faculty of Digital Engineering, SPbPU, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0009-0008-5130-1774>, malashenko.marina.r@yandex.ru
2. Evgeny Seredin, Specialist, Laboratory “Digital modeling of production systems” Faculty of Digital Engineering, SPbPU, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0009-0003-6108-0323>, seredin.evgeny2010@yandex.ru
3. Ekaterina Tereshko, PhD in Economics, Researcher, Laboratory "Industrial Systems of Streaming Data Processing", Digital Engineering Research Institute, SPbPU, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-7117-7549>, ektereshko@mail.ru

Научная статья

УДК 519.876.2

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.3>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ СВЯЗЕЙ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В КОНТЕКСТЕ ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПИСАНИЯ

Жанна Бурлуцкая*, Полина Шарко, Алексей Гинцяк, Капитон Поспелов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, zhanna.burlutskaya@spbpu.com, polina.sharko@spbpu.com, gintsyak_am@spbpu.ru, kapiton.pospelov@spbpu.com

*Автор, ответственный за переписку: zhanna.burlutskaya@spbpu.com

Аннотация

Данная работа посвящена формализации задачи составления расписания в распределенных производственных системах. В рамках работы приводится исследование особенностей сложных производственных систем, включая характерную для реальных производственных систем неопределенность, мультиагентный характер взаимодействия элементов и множественность целевых функций, а также их влияние на процесс составления производственного расписания. В ходе работы приводится анализ научной литературы в области моделирования распределенных производственных систем на основании научных публикаций, представленной в Scopus и РИНЦ. На основании результатов анализа международного опыта моделирования распределенных производственных систем приводится описание структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания. Результатом работы является онтологическая модель процесса формирования расписания в распределенных производственных системах как набора стратегических взаимодействий в терминологии теории игр и мультиагентных систем. Для описания игровых взаимодействий приводится набор формализованных стратегий и выигрышей агентов при нисходящем паттерне игрового взаимодействия, также приводится описание в терминах BDI моделей агентов мультиагентной системы, участвующих в составлении производственного расписания. Также приводится онтологическая модель коммуникационной сети структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания. Полученные результаты являются основой для разработки системы поддержки принятия решений по формированию расписания в распределенных производственных системах.

Ключевые слова: производственное расписание, сложные системы, распределенные производственные системы, мультиагентный подход, теория игр.

Цитирование: Бурлуцкая Ж., Шарко П., Гинцяк А., Поспелов К., 2025. Определение и формализация связей структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания Sustainable Development and Engineering Economics. 3, 3. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.3>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Бурлуцкая Ж., Шарко П., Гинцяк А., Поспелов К., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.3>

DEFINITION AND FORMALIZATION OF THE RELATIONSHIPS OF THE STRUCTURAL ELEMENTS OF DISTRIBUTED PRODUCTION SYSTEMS IN THE CONTEXT OF THE TASK OF FORMING A SCHEDULE

Zhanna Burlutskaya*, Polina Sharko, Aleksei Gintciak, Kapiton Pospelov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, zhanna.burlutskaya@spbpu.com, polina.sharko@spbpu.com, gintsyak_am@spbstu.ru, kapiton.pospelov@spbpu.com

*Corresponding author: zhanna.burlutskaya@spbpu.com

Abstract

This paper is devoted to formalizing the task of scheduling in distributed production systems. The paper examines the features of complex production systems, including the uncertainty characteristic of real production systems, the multi-agent nature of the interaction of elements and the multiplicity of target functions, as well as their impact on the parameters of the production schedule. The paper provides an analysis of scientific literature in the field of distributed production system modeling based on scientific publications presented in Scopus and RSCI. Based on the results of the analysis of international experience in modeling distributed production systems, the structural elements of distributed production systems are described in the context of the task of scheduling. The result of the work is an ontological model of the scheduling process in distributed production systems as a set of strategic interactions in the terminology of game theory and multi-agent systems. To describe game interactions, a set of formalized strategies and agent payoffs in a top-down pattern of game interaction is provided, and a description in terms of BDI models of agents of a multi-agent system involved in the production schedule is also provided. An ontological model of the communication network of the structural elements of distributed production systems is also given in the context of the task of scheduling. The results obtained are the basis for the development of a decision support system for scheduling in distributed production systems.

Keywords: production schedule, complex systems, distributed production systems, multi-agent approach, game theory.

Citation: Burlutskaya, Z., Sharko, P., Pospelov, K., Gintciak, A., 2025. Definition and formalization of the relationships of the structural elements of distributed production systems in the context of the task of forming a schedule. *Sustainable Development and Engineering Economics* 3, 3. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.3>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Burlutskaya Z., Sharko P., Pospelov K., Gintciak A., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

Современные методы производственного планирования не позволяют учесть мультиагентную природу взаимодействий, присущую реальным процессам в распределенных производственных системах, выражающуюся во множественности целей и возможностей участников. Это приводит к снижению эффективности решений, поскольку глобальные стратегические ориентиры системы не всегда согласуются с интересами отдельных агентов, что затрудняет устойчивую реализацию полученных планов. В связи с этим возникает необходимость разработки подходов, учитывающих как глобальные цели системы, так и локальные целевые функции ее элементов. Такой подход должен позволять формировать расписания, устойчивые к неопределенности и сбалансированные по интересам участников, что обеспечивает согласованное взаимодействие в рамках всей производственной системы. Данная работа посвящена формализации задачи составления расписания в распределенных производственных системах. В исследовании рассматриваются ключевые особенности таких систем: неопределенность, мультиагентный характер взаимодействия и множественность целевых функций, а также их влияние на параметры расписания. На основании анализа опыта разработки мультиагентных систем (МАС) и применения методов теории игр для решения задачи составления расписаний предложено описание структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания в терминах теории игр и МАС. Представленные онтологическая модель коммуникационной сети МАС, формализация агентов в терминах BDI и теоретико-игрового подхода, онтологическая модель процесса формирования расписания позволяют реализовать цифровую модель системы теоретико-игровых агентов модели распределенной производственной системы в контексте задачи формирования расписания. Теоретико-игровая формализация представлена для различных типов игр, что позволяет отразить многообразие коммуникативных стратегий участников моделируемой системы. Решение представлено для восходящего и нисходящего паттернов игрового взаимодействия, отражающих различные подходы к управлению распределенными производственными системами. Модель позволяет учесть особенности управления распределенной системой, имеющей черты иерархической. Разработанная модель может служить теоретической основой для разработки системы поддержки принятия решений при планировании расписания в распределенных производственных системах.

2. Материалы и методы

Представленное исследование находится на пересечении предметных областей: производственного планирования и теории МАС. Рассмотрение МАС также связано с использованием математического аппарата теории игр, поскольку именно этот раздел математики формализует стратегические взаимодействия нескольких сторон. Для обзора современного состояния исследований в этой области целесообразно обобщить имеющиеся в научной среде сведения как о производственном планировании и МАС по отдельности, так и об исследованиях, объединяющих эти предметные области.

Проблематика исследования операций в целом и составления производственных расписаний в частности для научного дискурса новой не является. Существует значительное количество работ, рассматривающих задачи планирования производств как в теоретическом, так и в прикладном ракурсах. Примерами базовых фундаментальных исследований по теме могут служить работы по исследованию операций (Taha, 2005; Lapshenkov, 2010) и ряда

других отечественных и зарубежных исследовательских групп (Hooker, 2006; Massart et al., 2003). Существуют отдельные фундаментальные труды, в том числе и в ограниченной предметной области теории расписаний: речь идет о работах А.А. Лазарева и Е.Р. Гафарова (Lazarev et al., 2011), Д.Р. Кирана (Kiran, 2019) и других.

Помимо фундаментальных работ, обобщающих и систематизирующих математические инструменты и методы решения типовых задач производственного планирования, существует значительное количество исследований, охватывающих отдельные практические аспекты применения этих инструментов и методов, в частности, в различных видах производственных систем. Подобные работы касаются таких крупных разделов теории расписаний, как транспортные расписания (Lazarev et al., 2011; Guzha et al., 2019) и производственные расписания (назначения) (Zagidullin, 2020; Zakharchenkov et al., 2018). Подобные исследования ведутся как в России (Rodionov & Alfer'yev, 2020; Karimov, 2021), так и за рубежом (Hartmann & Briskorn, 2022; Xiong et al., 2022).

В ходе исследования современного состояния предметной области были выделены три кластера публикаций по теме, а именно:

– фундаментальные и/или формально теоретические работы, нацеленные на развитие математических и алгоритмических средств решения типовых (общих) задач, например (Таха, 2005; Lazarev et al., 2012; Taillard, 1993) и др.;

– концептуальные работы, в которых излагается идеология решения отдельных задач или групп задач без практических примеров таких решений и детального описания инструментов и методов, например (Zakharchenkov et al., 2018; Karimov, 2021) и др.;

– узкоспециализированные практико-ориентированные работы, предлагающие инструменты и методы для решения конкретных частных задач предметной области, например (Lazarev et al., 2012; Guzha et al., 2019; Zagidullin, 2020) и др.

Проблематика задач производственного планирования – и, в частности, задач формирования производственного расписания – заключается в многоуровневом характере сопутствующих решению проблем. Так, например, исследователям и практикам при решении задач в данной предметной области необходимо пройти по пути последовательного разрешения нескольких организационно-технических проблем.

Организационная проблема решения задач производственного планирования в парадигме теории игр состоит в практической трудности выделения агентов, формализации их требований и определения потребности в учете тех или иных сторон взаимодействия как агентов. Подобные задачи ставятся в исследованиях и решаются в том числе в контексте задач производственного планирования (Shorikov et al., 2023).

Алгоритмическая проблема решения подобных задач состоит в сложности недвусмысленной формализации целевых функций агентов, равно как и в формализации их реальных взаимодействий. Количество, гетерогенность и разнородная степень влияния организационных ограничений также существенно усложняют процессы формализации производственных задач, что не позволяет применять к ним математические методы и инструменты без специфической адаптации данных и средств решения под цели конкретного расчета. Исследования, посвященные этой теме, также ведутся (Zeng et al., 2009; Volkova et al., 2016; Grivachev & Sazonov, 2016). Наконец, математическая проблема состоит в принципиальной сложности

решения многих задач построения расписаний и схожих задач. Некоторые задачи данной предметной области классифицируются как NP-трудные задачи, т.е. задачи с недетерминированной полиномиальной трудностью по времени. Такие задачи могут не иметь устойчивого решения или требовать для разрешения существенных временных затрат и вычислительных мощностей. Это требует применения сложных алгоритмов для получения удовлетворительных решений (Garey & Johnson, 1979; Moukrim et al., 2015). Таким образом, решение задач в заявленной предметной области сопряжено с множеством локальных организационно-технических проблем, решение которых не всегда формализовано в достаточной степени, чтобы применение универсальных инструментов и методов оказалось эффективным.

Большинство задач производственного планирования сводится к нескольким основным видам типовых задач, решения которых алгоритмически хорошо проработаны. Существуют традиционные методы для решения, в частности, задач упаковки (Lutsan & Nuzhnov, 2014), задач о назначениях (Mingozzi et al., 1998), частных их постановок, например RCPSP-задач (Resource-Constrained Project Scheduling Problems) (Hartmann & Briskorn, 2022; Ding et al., 2023), задач коммивояжера (Boroznov, 2009) и других задач, в той или иной степени соответствующих практическим задачам производственного планирования. Существующие методы гарантируют возможность нахождения решений математических постановок таких задач при их существовании в рамках таких постановок, однако вопросы формализации все еще остаются существенными, поскольку без их решения невозможно приложение конкретного эффективного алгоритма к рассматриваемой производственной системе.

Существуют интегрированные интеллектуальные системы решения задач планирования производства, в частности ERP-системы (Enterprise Resource Planning Systems), MES-системы (Manufacturing Execution Systems) и APS-системы (Advanced Planning and Scheduling Systems) (Gromov & Tarasov, 2011). Подобные системы решают широкий перечень технических задач, таких как активация производственных мощностей на основе пооперационного планирования производства, отслеживание состояния производственных мощностей, сбор информации от систем автоматизации производственного процесса, датчиков, оборудования, персонала, программных систем, отслеживание и контроль параметров качества и пр. Однако такие инструменты в первую очередь основаны на математических подходах и алгоритмах, использующихся в задачах оптимизации, квазиоптимизации или составления удовлетворительных производственных планов с учетом заданных ограничений. Подобные системы, как правило, не учитывают множество целевых функций заинтересованных агентов, что сохраняет при их применении ключевые организационные сложности: установление расписания, соответствующего формально определенной целевой функции, с их помощью возможно, но собственно формальное определение целевой функции остается задачей вне контура таких систем.

Кроме того, при рассмотрении полученных решений может быть полезно сопоставить достигнутые при применении традиционных методов и основанные на мультиагентности системы результаты – для определения фактического влияния мультиагентности на систему и выработки лучших организационных решений. Исходя из представленных выше сведений об исследовании операций и теории расписаний, их практических методах, исследованиях в области и реализованных средствах работы с задачами в описываемой предметной области, можно заключить, что изучение проблем производственного планирования сейчас активно продолжается как в России, так и за рубежом. При этом, несмотря на большой объем

различных работ, посвященных проблемам производств, некоторые вопросы все еще остаются актуальными для детального изучения. В частности, имеет смысл выработка способов оценки влияния мультиагентности на систему при различных конфигурациях целевых функций, собственных агентам, и их взаимоотношений. Также имеет смысл проработка комплекса организационно-технических проблем, связанных с формализацией и решением производственных задач.

Поскольку одним из ключевых направлений исследования является применение мультиагентного подхода для решения задач производственного планирования, необходимо проанализировать современные исследования в этой области, а также практики применения теории МАС в целом. Следует отметить, что теория МАС и практики ее применения для решения различных задач разрабатываются уже несколько десятилетий. При этом данный подход не получил широкого индустриального распространения, несмотря на то что регулярно включается в список наиболее перспективных направлений исследований. Данный парадокс вызван несколькими причинами (Chernyshev, 2023; Gorodetsky et al, 2017):

- мультиагентные модели сложны как с точки зрения математической формализации, так и с точки зрения программной реализации, поэтому зачастую используются исключительно для концептуального описания поставленных задач;
- не существует общепринятой терминологической базы в контексте мультиагентного подхода, что затрудняет обмен результатами исследований внутри научного сообщества, а также между разработчиками программных решений;
- интерес к индустриальному внедрению МАС с момента их появления значительно снизился за счет технологического развития и появления альтернативных инструментов, обладающих узким назначением и относительной легкостью программной реализации;
- позиционирование мультиагентного подхода в качестве универсального инструмента на данный момент не реализовано на практике, что повлияло на развитие отдельных практик применения подхода для узкоспециализированных задач.

Однако мультиагентный подход остается перспективным инструментом решения сложных, многокритериальных и плохо формализуемых задач. МАС представляется как совокупность интеллектуальных агентов, среды и организационной структуры (Wooldridge, 2009; Sharko & Burlutskaya, 2025). При этом структура убеждений, желаний, планов, организационная структура и структура среды МАС могут быть представлены онтологией (Boissier et al., 2020). Ранее была построена инвариантная онтология мультиагентных взаимодействий в сложной производственной системе (Sharko & Burlutskaya, 2025). За основу структуры агента зачастую принимается BDI-модель, выбор обусловлен ее популярностью, многообразием программных инструментов для реализации на ее основе архитектуры когнитивного агента и обширной теоретической базой по применению данной модели в построении МАС, в том числе проектируемых на основе онтологий (Wooldridge, 2009; Boissier et al., 2020; Hadzic et al., 2009; Calegari et al., 2021; Drobnjakovic et al., 2022; May et al., 2022; Lim et al. 2023). Среди успешных практик применения мультиагентного подхода можно выделить задачи по извлечению знаний, распознаванию образов, управлению ресурсами (Gorodetsky et al., 2019; Skobelev, 2011) и непосредственно составлению расписаний (Gorodetsky et al., 2017; Gorodetsky et al., 2001). Также интересны практики применения мультиагентного подхода для управления организационными системами и, в частности, конфликтными ситуациями (Magomedov & Chernyshev, 2022; Shveczov et al., 2022). Таким образом, развитие исследований МАС может

быть достигнуто за счет сужения сфер применения на основании опыта успешных практик, а также разработки формализованных инструментов реализации частных мультиагентных моделей (Chernyshev, 2023; Gorodetsky et al., 2017; Vladimirov, 2014). Выполнялись как фундаментальные исследования основ МАС, так и практические разработки отдельных инструментов в области транспортной логистики, включая составление расписаний (Granichin et al., 2013; Gorodetsky et al., 2012; Skobelev, 2011) и управление инцидентами (Gorodetsky et al., 2008). Примечательно, что в разное время в данных научных школах реализовывались проекты по разработке методик и языков создания МАС (Tushkanova et al., 2015; Gorodetsky et al., 2015). Вопросы формирования расписания с использованием МАС были затронуты в исследованиях упомянутых авторов, но не получили развития в виде формализованных методов и моделей. При этом актуальность и перспективность подобных исследований упомянута сразу в нескольких работах (Gorodetsky et al., 2017; Gorodetsky et al., 2001).

Одним из достоинств мультиагентного подхода являются возможность имитации децентрализованности взаимодействий и множественности агентов и, как следствие, определение качественно новых эмерджентных свойств системы (Novikov, 2016). Отсюда рождается преимущество применения МАС для задачи составления расписаний, в том числе при оперативном планировании. МАС по сравнению с традиционными методами более гибки, упрощают корректировку расписаний при оперативном планировании и позволяют получать решения, более устойчивые к нарушениям в расписании (Shukla et al., 2021). Помимо уточнения решений, МАС более производительны, что ускоряет процесс формирования расписаний и делает возможным использование подхода при оперативном управлении. Набор требуемых для использования мультиагентной модели данных различается в реализациях. Можно утверждать, что данные, необходимые для описания отличительных особенностей агентов, могут быть подготовлены предварительно и в процессе использования инструмента могут обновляться только на основании подробной и достаточно точно известной информации. Информация для обновления моделей как субъектов, так и объектов системы может быть получена из промежуточных результатов работы системы либо определена путем сбора данных с датчиков, что и используется в реализациях современных МАС предприятий (Gorodetsky et al., 2017; Shpilevoy et al., 2013; Siatras et al., 2023).

3. Результаты

3.1. Теоретико-игровая формализация связей структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания

Задача построения производственного расписания в общем виде может быть формализована в терминах теории игр. Типовое теоретико-игровое взаимодействие может быть впоследствии использовано для формализации конкретных задач управления.

В рамках формализуемого взаимодействия участвуют три группы агентов: агенты-производители, агенты обеспечения и агенты ресурсных пулов.

Теоретико-игровые агенты-производители – представляют собой отражения сотрудников и руководителей производственных подразделений системы. Целевые функции в общем сводятся к выполнению и/или перевыполнению производственного плана либо извлечению максимального дохода от реализации, но в частности могут отличаться.

Теоретико-игровые агенты обеспечения – представляют собой отражения сотрудников и руководителей подразделений системы, занимающихся обеспечением производства. Целевые функции в общем сводятся к минимизации издержек и максимально возможной непрерывности производственного плана, но в частностях могут отличаться.

Теоретико-игровые агенты ресурсных пулов – представляют собой, как правило, набор фиктивных агентов, отвечающих за сохранение общих ресурсных пулов: необходимы для того, чтобы действия агентов других видов не приводили к перепотреблению ресурсов. Целевые функции всегда сводятся к максимизации буфера ресурсного пула, за который отвечает агент.

Агенты Заказчика, Поставщика, Предприятия в общей модели не представлены – они не участвуют в составлении производственного расписания, но задают для него следующие условия и ограничения (табл. 1).

Таблица 1. Ограничения, вводимые агентами Заказчиком, Поставщиком, Предприятием при решении задачи формирования расписания в распределенных производственных системах

Агент	Условия и ограничения для игрового взаимодействия
Заказчик	$\max(t_{\text{кон}}^i) \leq T_{\text{треб}}$ – сроки выполнения всех работ не могут превышать некоторый требуемый предел.
Поставщик	$t_{\text{нач}}^i \geq \tau$ – сроки возможного начала i -й работы не могут быть меньше, чем некоторый базовый срок (срок поставки материалов);
Предприятие	W – задает множество всех работ; $t_{\text{нач}}^i \geq \max(t_{\text{кон}}^j \in J: \forall t^j \in J \rightarrow t^i)$ – задает нормативную последовательность некоторых работ (работа не может быть начата прежде, чем не закончатся все предшествующие ей работы).

Агенты работников (сотрудников) предприятия репрезентованы в рамках частных вариаций агентов-производителей, агентов обеспечения, агентов ресурсных пулов.

Среди агентов, входящих в игровое взаимодействие, возможна иерархичность. Каждый агент-производитель или агент обеспечения представлен двумя уровнями иерархии: руководство и исполнение. В общем случае можно считать, что и в одном, и в другом случае руководство и исполнения представлены единственными агентами. В более сложных частных вариациях модели возможно расширение, при котором агентный состав взаимодействия будет расширен (например, для учета ограниченной рациональности отдельных лиц, принимающих решения, или исполнителей работ). Таким образом, формируется типовой набор агентов игрового взаимодействия (табл. 2).

Таблица 2. Типовой набор агентов игрового взаимодействия при решении задачи формирования расписания в распределенных производственных системах

	Агент Производитель	Агент Обеспечение	Агент ресурсного пула
Руководство	Агент Производитель-руководство	Агент Обеспечение-руководство	Множество агентов ресурсных пулов (по одному на каждый пул)
Исполнение	Агент Производитель-исполнение	Агент Обеспечение-исполнение	

Игра, представляющая процесс составления производственного расписания, в любом случае является игрой с множественными участниками, итеративной игрой с ненулевой суммой. Кооперативный характер игры не гарантируется. Рассмотренный набор игр – кооперативная, конкурентная последовательная и конкурентная одновременная – позволяют отразить особенности коммуникативных стратегий агентов, давая возможность представить в модели агентов со склонностью к кооперации, конкуренции, коопетиции.

Специфика игрового взаимодействия (наборы стратегий, наборы выигрышей агентов) будет зависеть от паттерна реализации игры. Вводится два основных паттерна игрового взаимодействия: восходящий (инициативный) и нисходящий (директивный). Эти паттерны могут быть впоследствии дополнены более сложными конструкциями. Рассмотрим восходящий (инициативный) паттерн игрового взаимодействия (табл. 3).

Заказчик может выставить требование по сроку готовности всех работ. Поставщик(и) может (могут) выставить ограничения по срокам поставки материалов. Предприятие сообщает участникам игрового взаимодействия множество работ и нормативные последовательности работ. Агенты Производитель-исполнение и Обеспечение-исполнение начинают совместно составлять расписание выполнения работ с учетом строгих ограничений и собственных целевых функций:

- либо построение выполняется в формате кооперативной игры;
- либо построение выполняется в виде конкурентной игры, где в итоге принимается равновесное решение.

После первичного составления расписания выполняется проверка расписания агентами ресурсных пулов. В случае недостижения критериев качества расписания агент соответствующего ресурсного пула возвращает предупреждение. Далее агенты уровня исполнения могут принять решение о пересмотре расписания (опционально).

Составленное расписание вместе с ограничениями, диктуемыми агентами уровня исполнения, эскалируется на уровень руководства: агенты Производитель-руководство и Обеспечение-руководство совместно вырабатывают возможные правки в расписание соответственно своим целевым функциям (одной из стратегий профилей агентов является оставление расписания без изменений):

- либо внесение правок выполняется в формате кооперативной игры;
- либо внесение правок выполняется в виде конкурентной игры, где в итоге принимается равновесное решение.

После внесения правок в расписание выполняется проверка расписания агентами ресурсных пулов. В случае недостижения критериев качества расписания агент соответствующего ресурсного пула возвращает предупреждение. Далее агенты уровня руководство могут принять решение о пересмотре расписания (опционально). Игра итеративно повторяется.

Таблица 3. Набор стратегий и выигрышей агентов при восходящем (инициативном) паттерне игрового взаимодействия

Агент	Набор стратегий	Набор выигрышей
<i>Кооперативная игра</i>		
Производство-исполнение	$S_{\text{исп}} = \{\zeta_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{\text{исп}} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Обеспечение-исполнение		
Производство-руководство	$S_{\text{рук}} = \{\zeta_i\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{\text{рук}} = \{\zeta_i\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Обеспечение-руководство		
Ресурсный пул	$S_{\text{рп}} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{\text{рп}} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса
<i>Конкурентивная последовательная игра</i>		
Доминирующий агент Исполнение	$\hat{S}_{\text{ди}} = \{\zeta_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$\hat{P}_{\text{ди}} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Доминируемый агент Исполнение	$\check{S}_{\text{ди}} = \{\zeta_i, \rho'_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними дополнительных ограничений для корректировок	$\check{P}_{\text{ди}} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi'_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с дополняющими ограничениями)
Доминирующий агент Руководство	$\hat{S}_{\text{др}} = \{\zeta_i, \rho''_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними дополнительных ограничений для корректировок	$\hat{P}_{\text{др}} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi''_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с дополняющими ограничениями)

Агент	Набор стратегий	Набор выигрышей
Доминируемый агент Руководство	$\check{S}_{др} = \{\zeta_i\}$ – набор возможных к построению расписаний	$\check{P}_{др} = \{\zeta_i\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Ресурсный пул	$S_{рп} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{рп} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса
Конкурентная одновременная игра		
Производство-исполнение	$S_{пи} = \{\zeta_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{пи} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Обеспечение-исполнение	$S_{ои} = \{\zeta_j, \rho_j\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{ои} = \{\varepsilon_j: f(\zeta_j, \xi_j)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Производство-руководство	$S_{пр} = \{\zeta_m\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{пр} = \{\zeta_m\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Обеспечение-руководство	$S_{ор} = \{\zeta_k\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{ор} = \{\zeta_k\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Ресурсный пул	$S_{рп} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{рп} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса

Стоит заметить, что понятия «доминирующий» и «доминируемый» используются для обозначения приоритета в постановке ограничений. Доминирующий агент имеет более широкий перечень опций в построении расписания.

Рассмотрим нисходящий (директивный) паттерн игрового взаимодействия (табл. 4). Заказчик может выставить требование по сроку готовности всех работ. Поставщик(и) может (могут) выставить ограничения по срокам поставки материалов. Предприятие сообщает участникам игрового взаимодействия множество работ и нормативные последовательности работ. Агенты Производитель-руководство и Обеспечение-руководство начинают совместно составлять расписание выполнения работ с учетом строгих ограничений и собственных целевых функций:

- либо построение выполняется в формате кооперативной игры;

– либо построение выполняется в виде конкурентной игры, где в итоге принимается равновесное решение.

После первичного составления расписания выполняется проверка расписания агентами ресурсных пулов. В случае недостижения критериев качества расписания агент соответствующего ресурсного пула возвращает предупреждение. Далее агенты уровня Руководство могут принять решение о пересмотре расписания (опционально).

Составленное расписание вместе с ограничениями, диктуемыми агентами уровня руководство, деэскалируется на уровень исполнения: агенты Производитель-исполнение и Обеспечение-исполнение совместно вырабатывают возможные правки в расписание соотносно своим целевым функциям (одной из стратегий профилей агентов является оставление расписания без изменений):

- либо внесение правок выполняется в формате кооперативной игры;
- либо внесение правок выполняется в виде конкурентной игры, где в итоге принимается равновесное решение.

После внесения правок в расписание выполняется проверка расписания агентами ресурсных пулов. В случае недостижения критериев качества расписания агент соответствующего ресурсного пула возвращает предупреждение. Далее агенты уровня исполнение могут принять решение о пересмотре расписания (опционально). Игра итеративно повторяется.

Таблица 4. Набор стратегий и выигрышей агентов при нисходящем (директивном) паттерне игрового взаимодействия

Агент	Набор стратегий	Набор выигрышей
<i>Кооперативная игра</i>		
Производство-исполнение	$S_{исп} = \{\zeta_i\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{исп} = \{\zeta_i\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Обеспечение-исполнение		
Производство-руководство	$S_{рук} = \{\zeta_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{рук} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Обеспечение-руководство		
Ресурсный пул	$S_{рп} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{рп} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса
<i>Конкурентная последовательная игра</i>		
Доминирующий агент Исполнение	$\hat{S}_{ди} = \{\zeta_i, \rho''_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и	$\hat{P}_{ди} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi''_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий

Агент	Набор стратегий	Набор выигрышей
	связанных с ними дополнительных ограничений для корректировок	(совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с дополняющими ограничениями)
Доминируемый агент Исполнение	$\check{S}_{ди} = \{\zeta_i\}$ – набор возможных к построению расписаний	$\check{P}_{ди} = \{\zeta_i\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Доминирующий агент Руководство	$\hat{S}_{др} = \{\zeta_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$\hat{P}_{др} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Доминирующий агент Руководство	$\check{S}_{др} = \{\zeta_i, \rho'_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними дополнительных ограничений для корректировок	$\check{P}_{др} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi'_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с дополняющими ограничениями)
Ресурсный пул	$S_{рп} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{рп} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса

Конкурентная одновременная игра

Производство-исполнение	$S_{пи} = \{\zeta_m\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{пи} = \{\zeta_m\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Обеспечение-исполнение	$S_{ои} = \{\zeta_k\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{ои} = \{\zeta_k\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Производство-руководство	$S_{пр} = \{\zeta_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{пр} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Обеспечение-руководство	$S_{ор} = \{\zeta_j, \rho_j\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{ор} = \{\varepsilon_j: f(\zeta_j, \xi_j)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)

Агент	Набор стратегий	Набор выигрышей
Ресурсный пул	$S_{pp} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{pp} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса

Стоит заметить, что понятия «доминирующий» и «доминируемый» используются для обозначения приоритета в постановке ограничений. Доминирующий агент имеет более широкий перечень опций в построении расписания.

В ряде случаев представленные положения формализации модели могут нуждаться в дополнении для успешной имплементации модели в процессы управления. Для этого делается ряд замечаний:

1. В случае наличия конкуренции на одном уровне иерархии и в одной агентной плоскости модели (например, при наличии нескольких производственных филиалов/подразделений, имеющих независимые требования к результативности и общие ресурсные пулы) возможно размножение агентов на этом уровне – т.е. допускается существование нескольких идентичных структурно агентов с различающимися в частности целевыми функциями (например, имеется ряд агентов, стремящихся к выравниванию загрузки на собственных предприятиях: в таком случае целевые функции будут структурно сходны, но будут касаться различных исполнителей производственного расписания).

2. В случае наличия факторов, не позволяющих частным сотрудникам принимать рациональные решения при составлении производственного расписания, возможно размножение агентов соответствующего иерархического уровня и соответствующей агентной плоскости – т.е. допускается существование нескольких агентов с различающимися в частности целевыми функциями.

В обоих случаях логика построения модели не меняется. На каждом из описанных выше этапов игрового взаимодействия увеличивается число игроков, что затрудняет поиск равновесного решения (вплоть до невозможности выделения конкретного равновесного решения), однако алгоритмически процесс игры остается неизменным.

Представленная теоретико-игровая формализация структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания может быть реализована с использованием различных подходов к цифровому моделированию. Для рассматриваемой задачи, требующей отражения индивидуальных целей и возможностей участников, следует использовать подход, позволяющий реализовывать структурные элементы как отдельные сущности с личными убеждениями, целями, стратегиями. Данные особенности моделируемых систем позволяет отражать мультиагентный подход.

3.2. Онтологические модели мультиагентных взаимодействий структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания

Реализация цифровой модели распределенной производственной системы может быть выполнена на базе мультиагентного подхода. При формализации задачи в терминах мультиагентного подхода необходимо определить структуру интеллектуальных агентов, среду и

организационную структуру системы. При формализации распределенной производственной системы в контексте задачи формирования расписания в терминах МАС необходимо описать теоретико-игровых агентов, принимающих решения при формировании расписания и коммуникативную сеть системы. Среда системы в общем случае определена не будет, так как для ее задания требуется дополнительная информация об объектах, необходимых агентам для принятия решений. Нормы для агентов обозначенных типов введены в рамках коммуникационной структуры системы и не могут быть уточнены без дополнения постановки задачи. Определение протоколов является технической задачей, при решении задачи формирования расписания в распределенной производственной системе могут быть использованы стандартные протоколы. Описание интеллектуальных агентов представлено в терминах BDI, коммуникационная сеть представлена онтологической моделью.

Онтологическая модель коммуникационной сети структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания (рис. 1) построена на основе представленного в рамках теоретико-игровой формализации описания последовательности действий агентов. Заказчик, Предприятие, Поставщик представлены в коммуникационной сети, хоть и не являются теоретико-игровыми агентами. Представление их в рамках онтологии обусловлено необходимостью отражения влияния данных структурных элементов на процесс формирования производственного расписания путем определения ограничений системы. Подход к реализации данных структурных элементов в рамках МАС зависит от реализуемого ими подхода к определению ограничений системы – в зависимости от требуемой степени автономности и способности к рассуждению данные элементы могут быть реализованы и как функции, и как агенты, и как интеллектуальные агенты. Рассматривая наиболее общий случай, в список агентов МАС мы их не включаем, но отмечаем, что реализация их при построении МАС как интеллектуальных агентов допустима – в этом случае в коммуникативную сеть они должны быть включены так, как отмечено на рис. 1.

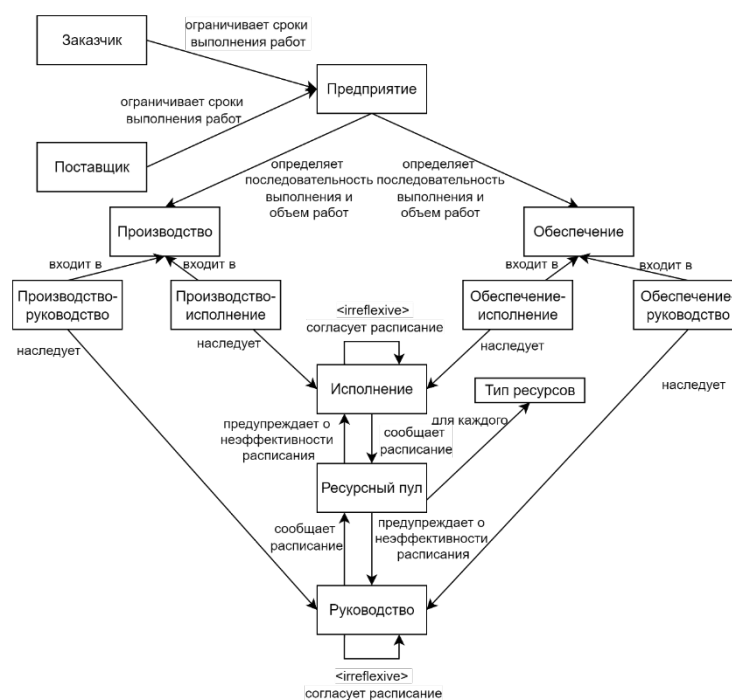


Рисунок 1. Онтологическая модель коммуникационной сети структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания

Как и в теоретико-игровой формализации, производство и обеспечение представлены агентами Производство-руководство и Производство-исполнение, Обеспечение-руководство и Обеспечение-исполнение соответственно. Данные агенты реализованы в соответствии с агентами Исполнение и Руководство, отличаясь в рамках решаемой задачи целевыми функциями, типами ограничений и типами результатов труда. Процесс формирования расписания, однако, для агентов-наследников Руководства не отличается, как и для агентов-наследников Обеспечения, и потому описан едино (рис. 2). Агенты ресурсного пула представлены для каждого типа ресурсов системы. Их поведение также не зависит от типов ресурсов, различаются агенты целевыми функциями и типами ресурсов, данные о которых им необходимы. Агенты Производство-руководство и Обеспечение-руководство согласуют расписания в соответствии с описанными в рамках теоретико-игровой формализации подходами, аналогично согласуют расписание агенты Обеспечение-руководство и Обеспечение-исполнение. После согласования агенты передают согласованные расписания ресурсным пулам. Агенты ресурсного пула после оценки сообщают ее Исполнению и Руководству. Для описания протекающих при формировании расписания процессов требуется формализация агентов в терминах BDI (табл. 5).

Таблица 5 Описание в терминах BDI агентов MAC для формирования расписания в распределенной производственной системе

Агент	Убеждения	Желания	Доступные действия
Производство-исполнение	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограничения сроков производства; 2. Последовательность работ по производству; 3. Объем продукта, который должен быть произведен; 4. Объем произведенного продукта; 5. Расписание руководства; 6. Расписание исполнения; 7. Выбранная стратегия для согласования; 8. Согласованность стратегии; 9. Оценка расписания ресурсным пулом; 10. Тип игры; 11. Доступные стратегии (варианты расписаний). 	<p>Выполнение и/или перевыполнение производственного плана либо извлечение максимального дохода от реализации</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Составление доступных стратегий (варианты расписаний); 2. Оценка эффективности расписания; 3. Сообщение расписания ресурсному пулу; 4. Сообщение игроку выбранной стратегии.
Обеспечение-исполнение	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограничения сроков выполнения работ; 2. Последовательность работ; 3. Объем работ, который должен быть выполнен; 4. Издержки на проведение работ; 5. Расписание руководства; 6. Расписание исполнения; 	<p>Минимизация издержек и максимально возможной непрерывности производственного плана</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Составление доступных стратегий (варианты расписаний); 2. Оценка эффективности расписания; 3. Сообщение расписания ресурсному пулу;

Агент	Убеждения	Желания	Доступные действия
	<ul style="list-style-type: none"> 7. Выбранная стратегия для согласования; 8. Согласованность стратегии; 9. Оценка расписания ресурсным пулом; 10. Тип игры; 11. Доступные стратегии (варианты расписаний). 		<ul style="list-style-type: none"> 4. Сообщение игроку выбранной стратегии.
Производство-руководство	<ul style="list-style-type: none"> 1. Ограничения сроков производства; 2. Последовательность работ по производству; 3. Объем продукта, который должен быть произведен; 4. Объем произведенного продукта; 5. Доступные стратегии; 6. Расписание руководства; 7. Расписание исполнения; Выбранная стратегия для согласования; 8. Согласованность стратегии; 9. Оценка расписания ресурсным пулом; 10. Тип игры; 11. Доступные стратегии (варианты расписаний). 	<ul style="list-style-type: none"> Выполнение и/или перевыполнение производственного плана либо извлечение максимального дохода от реализации 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Составление доступных стратегий (варианты расписаний); 2. Оценка эффективности расписания; 3. Сообщение расписания ресурсному пулу; 4. Сообщение игроку выбранной стратегии.
Обеспечение-руководство	<ul style="list-style-type: none"> 1. Ограничения сроков выполнения работ; 2. Последовательность работ; 3. Объем работ, который должен быть выполнен; 4. Издержки на проведение работ; 5. Доступные стратегии; 6. Расписание руководства; 7. Расписание исполнения; Выбранная стратегия для согласования; 8. Согласованность стратегии; 9. Оценка расписания ресурсным пулом; 10. Тип игры; 11. Доступные стратегии (варианты расписаний). 	<ul style="list-style-type: none"> Минимизация издержек и максимально возможной непрерывности производственного плана 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Составление доступных стратегий (варианты расписаний); 2. Оценка эффективности расписания; 3. Сообщение расписания ресурсному пулу; 4. Сообщение игроку выбранной стратегии.

Агент	Убеждения	Желания	Доступные действия
Ресурсный пул	<ol style="list-style-type: none"> 1. Буфер доступных ресурсов контролируемого агентом типа; 2. Расписание руководства; 3. Расписание исполнения; 4. Оценка расписания. 	Максимизации буфера ресурсного пула, за который отвечает агент	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка допустимости расписания; 2. Сообщение о допустимости расписания.

В табл. 2 описаны убеждения и желания агентов мультиагентной модели распределенной производственной системы в контексте задачи формирования расписания. Описание дополнено возможными действиями агентов, что может быть учтено при реализации МАС путем введения планов. Желания определены в соответствии с введенными в рамках теоретико-игровой формализации целями агентов. Убеждения, представленные в табл. 2, отражают ограничения, налагаемые на агентов, доступные теоретико-игровые стратегии агентов, расписания агентов, дополнительные данные для коммуникации агентов, необходимые для моделирования игр. Действия агентов включают составление расписаний, оценку эффективности переданных от ресурсных пулов расписаний и действия, позволяющие организовать коммуникацию агентов. В соответствии с приведенными в табл. 3 действиями агентов, а также теоретико-игровой формализацией разработана онтологическая модель процесса формирования расписания в распределенной производственной системе.

В рамках МАС не может быть определен единый процесс формирования расписания – данная особенность необходима при построении систем, учитывающих индивидуальные цели и возможности участников. На рис. 2 представлена онтологическая модель процесса формирования расписания в распределенной производственной системе, декомпозированная на модели процессов формирования расписания, реализуемых типовыми агентами системы. В онтологической модели отражена специфика поведения агентов в зависимости от паттерна игрового взаимодействия.

Представленные онтологические модели позволяют реализовать мультиагентную модель распределенной производственной системы в контексте задачи формирования расписания, определив коммуникационную сеть в соответствии с разработанной онтологией и структуру агентов в соответствии с предложенным описанием убеждений, желаний, и планов, состоящих из описанных действий агентов, объединенных представленной онтологией процесса. Представленная формализация в терминах МАС позволяет реализовать предложенный теоретико-игровой подход.

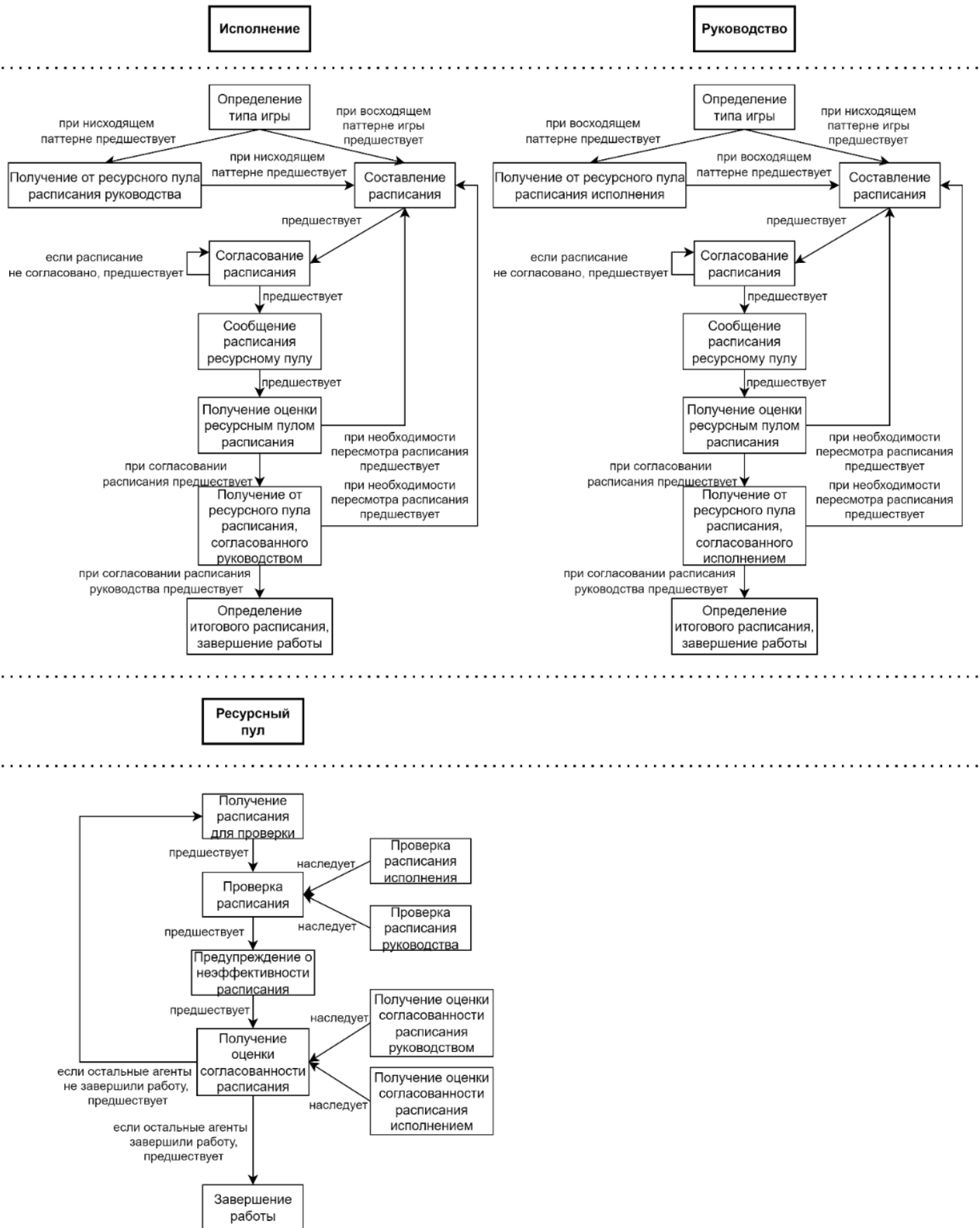


Рисунок 2. Онтологическая модель процесса формирования расписания в распределенной производственной системе

4. Обсуждение

Методы теории игр широко применяются при построении МАС. Инструменты, использующие возможности мультиагентного подхода и теории игр, применяются при решении задач различных отраслей: робототехники (Korivand, 2024), энерготехнологий (Lin, 2024; Park, 2022; Xi, 2015), управления в чрезвычайных ситуациях (Liu, 2022), аэрокосмической отрасли (Zhao, 2024). Разрабатываются и универсальные решения (Shankar, 2023; Li, 2022). В научном дискурсе представлены как решения, основанные на MARL (multiagent reinforcement learning) (Li, H. et al., 2025; Korivand, 2024; Lin, 2024; Shankar, 2023; Park, 2022; Li, 2022; Liu, 2022; Zhao, 2024; Xi, 2015), так и не предполагающие обучения агентов (Argoneto et al., 2013; Krenczyk et al., 2015; Wang et al., 2019; Renna, 2024). При построении гибридных решений как рассматривают кооперативные (Korivand, 2024; Lin, 2024; Shankar, 2023; Park, 2022) и конкурентные (Li, 2022) игры в отдельности, так и предоставляют агентам возможность выбора кооперации или конкуренции (Liu, 2022; Zhao, 2024; Xi, 2015).

Многие разработки данного направления связаны с MARL (Li, H. et al., 2025; Korivand, 2024; Lin, 2024; Shankar, 2023; Park, 2022; Li, 2022; Liu, 2022; Zhao, 2024; Xi, 2015) и учитывают особенности данного подхода, из-за чего представленные в данном направлении решения по построению когнитивных агентов неприменимы для решения задач, не требующих MARL, без адаптации инструментов. В контексте разработанной формализации задачи составления расписания в распределенных производственных системах наиболее интересны из представленных решений те, в которых агентам предоставлена возможность выбирать кооперацию или конкуренцию. Разнообразие сценариев, вызванное возможностью выбора кооперации или конкуренции, влияет на вид Q-функции, а также на процесс работы агентов (Liu, 2022; Zhao, 2024; Xi, 2015).

Разработаны (Liu, 2022) модель равновесия в мультиагентной системе выработки аварийной энергии и теоретический фреймворк, основанный на Q-обучении Нэша (Nash Q-learning) и учитывающий индивидуальные предпочтения поставщиков. Вариативность коммуникативных стратегий агентов учитывается при расчете значений Q-функции индивидов и их групп.

Предложены алгоритм и архитектура мультиагентной системы для решения задачи друг-или-враг (Friend-or-Foe Game) (Zhao, 2024). Решение протестировано на примере задачи управления беспилотными летающими средствами в открытом космосе. Решение основано на алгоритме актор-критик. Конкуренция и кооперация учитываются при задании Q-функции. Друзьями – агентами, с которыми определяющий значение функции кооперирует, – являются агенты, действия которых максимизируют Q-функцию. Минимизирующие Q-функцию агента считаются его врагами. Подробности построения Q-функции агента не освещаются. В ходе действий агент максимизирует значение Q-функции с использованием DDPG (Deep Deterministic Policy Gradients) алгоритма.

Разработана мультиагентная схема управления для автоматического управления координацией взаимосвязанных сложных энергетических систем (Xi, 2015). В решении для агентов задается множество смешанных стратегий, отражающих способности агента к конкуренции и кооперации. Подход к построению агента, способного выбирать конкурентные и кооперативные стратегии, подробно не описан.

Представлено множество гибридных инструментов, объединяющих возможности МАС и теории игр, и при этом не использующих RL (Argoneto et al., 2013; Krenczyk et al, 2015; Wang et al., 2019). Среди данных решений есть и разработанные для построения расписаний в производственных системах (Wang et al., 2019), однако решений с предоставлением агентам возможности выбора коммуникативных стратегий среди них нет. Среди решений по планированию работ в распределенных географически сетях производств (Argoneto et al., 2013; Krenczyk et al, 2015) также нет решений, основанных на МАС и при этом позволяющих рассматривать и кооперативные, и конкурентные игры.

Представлены исследования, целью которых была разработка гибридных инструментов, объединяющих МАС и методы теории игр. Данные решения применимы в различных предметных областях, реализуются как с использованием RL, так и без него. Представленная формализация заполняет лауну в научном дискурсе, представляя способ формирования когнитивных агентов в мультиагентных системах, имеющих возможность выбирать коммуникативные стратегии и адаптированных для решения не требующих применения RL задач составления расписания в распределенных производственных системах.

5. Заключение

В работе представлена формализация задачи составления расписания в распределенных производственных системах с учетом их ключевых особенностей – неопределенности, мультиагентного характера взаимодействия и множественности целевых функций. На основе анализа опыта применения МАС и методов теории игр предложено описание структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания. Построены онтологическая модель коммуникационной сети МАС, формализация агентов в терминах BDI и теоретико-игрового подхода, онтологическая модель процесса формирования расписания в распределенной производственной системе. Реализация данных моделей позволяет разработать цифровую модель системы теоретико-игровых агентов, отражающую различные типы взаимодействия участников, в том числе восходящий и нисходящий паттерны игрового взаимодействия. Это обеспечивает возможность моделирования различных сценариев управления распределенными производственными системами. Предложенный подход позволяет учесть многообразие коммуникативных стратегий и согласовать локальные цели участников системы, что повышает устойчивость управленческих решений по формированию расписаний и их практическую применимость. Полученные результаты могут служить основой для разработки систем поддержки принятия решений в области планирования расписания распределенных производственных систем.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00322, <https://rscf.ru/project/25-21-00322/>

Список литературы

- Argoneto, P.; Renna, P. Capacity sharing in a network of enterprises using the Gale–Shapley model. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013, 69, 1907–1916.
- Boissier, O., Bordini, R.H., Hübner, J.F., Ricci, A., 2020. *Multi-Agent Oriented Programming: Programming Multi-Agent Systems Using JaCaMo*. MIT Press.
- Calegari, R., Ciatto, G., Denti, E., Omicini, A., 2021. Logic-based technologies for multi-agent systems: a systematic literature review. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 35 (1), 1. <https://doi.org/10.1007/s10458-020-09478-3>
- Ding, H., Zhuang, C., Liu, J., 2023. Extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *Automation in Construction* 153, 104955. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104958>
- Drobnjakovic, M., Kulvatunyou, B., Ameri, F., Will, C., Smith, B., 2022. The industrial ontologies foundry (IOF) core ontology.

- Garey, M.R., Johnson, D.S., 1979. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, 1st ed. W. H. Freeman and Company, New York.
- Gorodetsky, V., Karsaev, O., Konyushiy, V., Samoylov, V., 2012. Transportation Logistics Services from Cloud, in: 2012 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology. IEEE, pp. 215–219. <https://doi.org/10.1109/WI-IAT.2012.55>
- Gorodetsky, V., Karsaev, O., Samoylov, V., Skormin, V., 2008. Multi-Agent Technology for Air Traffic Control and Incident Management in Airport Airspace, in: 5th International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT-08), pp. 118–125.
- Gorodetsky, V., Kozhevnikov, S., Novichkov, D., Skobelev, P., 2019. The Framework for Designing Autonomous Cyber-Physical Multiagent Systems for Adaptive Resource Management, in: *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Springer, Cham, pp. 52–64. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27878-6_5
- Gorodetsky, V., Samoylov, V., Trotsky, D., 2015. The reference ontology of collective behavior of autonomous agents and its extensions. *Journal of Computer and Systems Sciences International* 54 (5), 765–782. <https://doi.org/10.1134/S1064230715030089>
- Granichin, O., Skobelev, P., Lada, A., Mayorov, I., Tsarev, A., 2013. Cargo Transportation Models Analysis using Multi-Agent Adaptive Real-Time Truck Scheduling System, in: *Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence – Volume 2: ICAART*, pp. 244–249. <https://doi.org/10.5220/0004225502440249>
- Hadzic, M., Taslimi, M.S., Chang, E., 2009. *Ontology-Based Multi-Agent Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01904-3>
- Han, Z.; Bian, X.; Ding, Z.; Sun, D. Optimisation of group batch scheduling in flexible flow shop based on multi-player cooperative game. *Int. J. Model. Identif. Control* 2022, 40, 114–126.
- Hartmann, S., Briskorn, D., 2022. An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 297 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.004>
- Hooker, J.N., 2006. *Operations Research Methods in Constraint Programming*, in: Rossi, F., van Beek, P., Walsh, T. (eds.), *Foundations of Artificial Intelligence*. Elsevier, pp. 527–570. [https://doi.org/10.1016/S1574-6526\(06\)80019-2](https://doi.org/10.1016/S1574-6526(06)80019-2)
- Kiran, D.R., 2019. *Production Planning and Control: A Comprehensive Approach*. Butterworth-Heinemann.
- Korivand, S.; Galvani, G.; Ajoudani, A.; Gong, J.; Jalili, N. Optimizing Human-Robot Teaming Performance through Q-Learning Based Task Load Adjustment and Physiological Data Analysis. *Sensors* 2024, 24, 2817.
- Krenczyk, D.; Olender, M. Simulation Aided Production Planning and Scheduling Using Game Theory Approach. *Appl. Mech. Mater.* 2015, 809–810, 1450–1455.
- Lapshenkov, G.I., 2010. *Sistemnyj analiz. Issledovanie operacij: uchebnoe posobie [System Analysis. Operations Research: a textbook]*. MITHT im. M.V. Lomonosova, Moscow.
- Li, H., Yang, P., Liu, W., Yan, S., Zhang, X., & Zhu, D. (2025). Multi-Agent Reinforcement Learning in Games: Research and Applications. *Biometrics*, 10(6), 375.
- Li, X.; Xi, L.; Zha, W.; Peng, Z. Minimax Q-learning design for H_∞ control of linear discrete-time systems. *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.* 2022, 23, 438–451.
- Lim, J., Lanza, F., Nycz, T., Lu, Y., Morris, K.C., 2023. Ontology-Based Feedback to Improve Runtime Control for Multi-Agent Manufacturing Systems, in: 2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CASE56687.2023.10260630>
- Lin, S.-W.; Chu, C.-C. Distributed Q-Learning-Based Voltage Restoration Algorithm in Isolated AC Microgrids Subject to Input Saturation. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2024, 60, 5447–5459.
- Liu, X. A large-scale equilibrium model of energy emergency production: Embedding social choice rules into Nash Q-learning automatically achieving consensus of urgent recovery behaviors. *Energy* 2022, 259, 125023.
- Massart, D.L., Vandeginste, B.G.M., Deming, S.N., Michotte, Y., Kaufman, L. (eds.), 2003. *Operations Research*, in: *Data Handling in Science and Technology*. Elsevier, pp. 419–435.
- May, M.C., Batsaikhan, M., Lu, Y., Morris, K.C., 2022. Ontology-Based Production Simulation with OntologySim. *Applied Sciences* 12 (3), 1608. <https://doi.org/10.3390/app12031608>
- Mingozzi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S., Bianco, L., 1998. An Exact Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem Based on a New Mathematical Formulation. *Management Science* 44 (5), 714–729. <https://doi.org/10.1287/mnsc.44.5.714>
- Moukrim, A., Quilliot, A., Toussaint, H., 2015. An effective branch-and-price algorithm for the Preemptive Resource Constrained Project Scheduling Problem based on minimal Interval Order Enumeration. *European Journal of Operational Research* 244 (2), 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.037>
- Park, Y.-J.; Kim, J.-E.; Lee, S.-H.; Cho, K.-H. An Effective Design Formula for Single-Layer Printed Spiral Coils with the Maximum Quality Factor (Q-Factor) in the Megahertz Frequency Range. *Sensors* 2022, 22, 7761.
- Renna, P. (2024). A review of game theory models to support production planning, scheduling, cloud manufacturing and sustainable production systems. *Designs* 8 (2): 26.
- Shankar, S.; Young, R.A.; Young, M.E. Action-Project Method: An approach to describing and studying goal-oriented joint actions. *Med. Educ.* 2023, 57, 131–141.
- Shpilevoy V. et al. Multi-agent system “Smart Factory” for real-time workshop management in aircraft jet engines production //IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – T. 46. – №. 7. – C. 204-209.
- Shukla O. J. et al. A review of multi agent-based production scheduling in manufacturing system //Recent Patents on Engineering. – 2021. – T. 15. – №. 5. – C. 15-32.
- Siatras V. et al. On the use of asset administration shell for modeling and deploying production scheduling agents within a multi-agent system //Applied Sciences. – 2023. – T. 13. – №. 17. – C. 9540.
- Skobelev, P., 2011. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Applications, in: 5th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011). Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23181-0_1
- Taha, H.A., 2005. *Operations Research: An Introduction*, 7th ed. Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Taillard, E.D., 1993. Benchmarks for basic scheduling problems. *European Journal of Operational Research* 64 (2), 278–285. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90182-M](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90182-M)

- Tushkanova, O., Gorodetsky, V., 2015. Data-driven semantic concept analysis for automatic actionable ontology design, in: 2015 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). IEEE, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/DSAA.2015.7344893>
- Volkova, V.N., Loginova, A.V., Shirokova, S.V., Iakovleva, E.A., 2016. Models for the study of the priorities of innovative companies, in: 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). IEEE, pp. 515–517. <https://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519831>
- Wang, J.; Zhang, Y.; Liu, Y.; Wu, N. Multiagent and Bargaining-Game-Based Real-Time Scheduling for Internet of Things-Enabled Flexible Job Shop. *IEEE Internet Things J.* 2019, 6, 2518–2531.
- Wooldridge, M.J., 2009. An Introduction to Multiagent Systems. John Wiley & Sons Publ., Chichester, UK.
- Xi, L.; Yu, T.; Yang, B.; Zhang, X. A novel multi-agent decentralized win or learn fast policy hill-climbing with eligibility trace algorithm for smart generation control of interconnected complex power grids. *Energy Convers. Manag.* 2015, 103, 82–93.
- Xiong, H., Shi, S., Ren, D., Hu, J., 2022. A survey of job shop scheduling problem: The types and models. *Computers & Operations Research* 142, 105731. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105731>
- Zeng, M., Wei, W., Zhang, X., Ju, Y., 2009. The Risk Evaluation of Human Resources for Power Supplying Company Based on Cloud Model, in: 2009 International Conference on Management and Service Science. IEEE, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2009.5303651>
- Zhao, X.; Hu, H.; Sun, D. Cooperation with Humans of Unknown Intentions in Confined Spaces Using the Stackelberg Friend-or-Foe Game. In *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2024; pp. 1–13.
- Борознов В.О. Исследование решения задачи коммивояжера // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2. С. 147–151.
- Владимиров А.В. Моделирование взаимодействия агентов в многоагентной системе с помощью цветных сетей Петри и нечеткой логики // Программные продукты и системы. 2014. № 1 (105). С. 44–50.
- Городецкий В.И., Бухвалов О.Л., Скобелев П.О. Современное состояние и перспективы промышленных применений многоагентных систем // Управление большими системами: сборник трудов. 2017. № 66. С. 94–157.
- Городецкий В.И., Карсаев О.В. Многоагентная система планирования и составления расписаний: разработка распределенной базы знаний // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2001. Т. 22. № 4. С. 25–38.
- Гривачев А.В., Сазонов С.Ю. Сравнительный анализ подходов и методов многокритериального выбора сложных мобильных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 5. С. 35–43.
- Громов С.А., Тарасов В.Б. Интегрированные интеллектуальные системы оперативного планирования производства // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. Т. 120. № 7. С. 60–67.
- Гужа Е.Д., Романенко В.А., Скороход М.А. Нечёткая оценка эффективности трансферной системы авиаперевозок // Управление большими системами: сборник трудов. 2019. № 77. С. 219–260.
- Загидуллин Р.Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP. Полная версия. Старый Оскол: ТНТ, 2021.
- Захарченков К.В., Мрочек Ж.А., Мрочек Т.В. Алгоритм решения многокритериальной задачи планирования производства труб и фасонных изделий // Системный анализ и прикладная информатика. 2018. № 4. С. 4–10. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2018-4-4-10>
- Каримов Ж.Х. Процедуры оптимизации глобальных целей системы управления многостадийными процессами // Universum: технические науки. 2021. № 11–1 (92). С. 48–52.
- Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний: задачи и алгоритмы. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011.
- Лапшенков Г.И. Системный анализ. Исследование операций. М.: МИТХТ, 2010.
- Лудан М.В., Нужнов Е.В. Решение задачи трехмерной упаковки с палитированием контейнеров // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 7. С. 196–204.
- Магомедов О.Р., Чернышев С.А. Мультиагентная система поддержки принятия решений для минимизации стоимости группируемых товаров // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы модели, анализ и управление. 2022. № 4. С. 97–107. <https://doi.org/10.18137/RNU.V9187.22.04.P.97>
- Новиков Д. А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. – 2016.
- Родионов Д.Г., Алферьев Д.А. Устойчивость оптимального плана производства инновационной продукции промышленного предприятия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2020. Т. 13. № 5. С. 106–119. <https://doi.org/10.18721/JE.13508>
- Чернышев С.А. Проблемы мультиагентных систем и возможные пути их решения // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы модели, анализ и управление. 2023. № 3. С. 103–113. <https://doi.org/10.18137/Rnu.v9187.23.03.p.231>
- Шарко П.А., Бурлуцкая Ж.В. Подход к выбору организационной структуры агентов при моделировании сложных организационных систем // Интеллектуальная инженерная экономика и Индустрия 6.0 (ИНПРОМ-2025). СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. С. 523–526. <https://doi.org/10.18720/IEP/2025.2/142>
- Швецов А.Н., Дианов С.В., Дианов Д.С. Проектирование мультиагентной системы разрешения межфункциональных конфликтов на предприятии. Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1 (106). С. 74–89. <https://doi.org/10.23859/1995-0665-2022-1-106-6>
- Шориков А.Ф., Коровин Г.Б., Сиротин Д.В. Методология управления промышленным комплексом региона: архитектура агент-ориентированной модели // Управленец. 2023. Т. 14. № 6. С. 63–76. <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2023-14-6-5>

References

- Argoneto, P.; Renna, P. Capacity sharing in a network of enterprises using the Gale–Shapley model. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013, 69, 1907–1916.
- Boissier, O., Bordini, R.H., Hübner, J.F., Ricci, A., 2020. Multi-agent oriented programming: programming multi-agent systems using JaCaMo. Mit Press.
- Boroznov, V.O., 2009. Issledovanie resheniya zadachi kommiwoyazhera [Research of the solution to the traveling salesman problem]. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 2, 147–151.
- Calegari, R., Ciatto, G., Denti, E., Omicini, A., 2021. Logic-based technologies for multi-agent systems: a systematic literature review. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 35 (1), 1. <https://doi.org/10.1007/s10458-020-09478-3>
- Chernyshev, S.A., 2023. Problems Of Multi-Agent Systems and Possible Ways to Solve Them. *Vestnik of the Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis, Management* 3, 103–113. <https://doi.org/10.18137/Rnu.v9187.23.03.p.231>

- Ding, H., Zhuang, C., Liu, J., 2023. Extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *Automation in Construction* 153, 104955. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104958>
- Drobnjakovic, M., Kulvatunyou, B., Ameri, F., Will, C., Smith, B., 2022. The Industrial Ontologies Foundry (IOF) Core Ontology, in: *Formal Ontologies Meet Industry (FOMI) 2022*. Tarbes.
- Garey, M.R., Johnson, D.S., 1979. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, 1st ed. W. H. Freeman and Company, New York.
- Gorodetsky, V.I., Buhvalov, O.L., Skobelev, P.O., 2017. Industrial Applications of Multi-Agent Systems: Current State and Prospects. *Large-Scale Systems Control: Proceedings* 66, 94–157.
- Gorodetsky, V.I., Karsaev, O.V., 2001. Mnogoagentnaya sistema planirovaniya i sostavljeniya raspisanij: razrabotka raspredelennoj bazy znaniy [Multi-agent planning and scheduling system: development of a distributed knowledge base]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences* 22 (4), 99–105.
- Gorodetsky, V., Karsaev, O., Konyushiy, V., Samoylov, V., 2012. Transportation Logistics Services from Cloud, in: *2012 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*. IEEE, pp. 215–219. <https://doi.org/10.1109/WI-IAT.2012.55>
- Gorodetsky, V., Karsaev, O., Samoylov, V., Skormin, V., 2008. Multi-Agent Technology for Air Traffic Control and Incident Management in Airport Airspace, in: *5th International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT-08)*, pp. 118–125.
- Gorodetsky, V., Kozhevnikov, S., Novichkov, D., Skobelev, P., 2019. The Framework for Designing Autonomous Cyber-Physical Multiagent Systems for Adaptive Resource Management, in: *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Springer, Cham, pp. 52–64. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27878-6_5
- Gorodetsky, V., Samoylov, V., Trotsky, D., 2015. The reference ontology of collective behavior of autonomous agents and its extensions. *Journal of Computer and Systems Sciences International* 54 (5), 765–782. <https://doi.org/10.1134/S1064230715030089>
- Granichin, O., Skobelev, P., Lada, A., Mayorov, I., Tsarev, A., 2013. Cargo Transportation Models Analysis using Multi-Agent Adaptive Real-Time Truck Scheduling System, in: *Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence – Volume 2: ICAART*, pp. 244–249. <https://doi.org/10.5220/0004225502440249>
- Grivachov A.V., Sazonov S.Y., 2016. Comparative Analysis of Approaches and Methods of Multi-Criteria Selection for Sophisticated Mobile Systems. *Proceedings of the Southwest State University* 5, 35–43.
- Gromov, S.A., Tarasov, V.B., 2011. Integrated Intelligent Systems of Production Planning and Scheduling. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences* 120 (7), 60–67.
- Guzha, E.D., Romanenko, V.A., Skorokhod, M.A., 2019. Fuzzy Assessment of Performance of Air Transportation Transfer System. *Large-Scale Systems Control: Proceedings* 77, 219–260.
- Hadzic, M., Taslimi, M.S., Chang, E., 2009. *Ontology-Based Multi-Agent Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01904-3>
- Han, Z.; Bian, X.; Ding, Z.; Sun, D. Optimisation of group batch scheduling in flexible flow shop based on multi-player cooperative game. *Int. J. Model. Identif. Control* 2022, 40, 114–126.
- Han, Z.; Zhu, Y.; Ma, X.; Chen, Z. Multiple rules with game theoretic analysis for flexible flow shop scheduling problem with component altering times. *Int. J. Model. Identif. Control* 2016, 26, 1–18.
- Hartmann, S., Briskorn, D., 2022. An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 297 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.004>
- Hooker, J.N., 2006. Operations Research Methods in Constraint Programming, in: Rossi, F., van Beek, P., Walsh, T. (eds.), *Foundations of Artificial Intelligence*. Elsevier, pp. 527–570. [https://doi.org/10.1016/S1574-6526\(06\)80019-2](https://doi.org/10.1016/S1574-6526(06)80019-2)
- Karimov, J.H., 2021. Procedures for optimizing global goals of a multistage process control system. *Universum: Technical Sciences* 11–1 (92), 48–52.
- Kiran, D.R., 2019. *Production Planning and Control: A Comprehensive Approach*. Butterworth-Heinemann.
- Korivand, S.; Galvani, G.; Ajoudani, A.; Gong, J.; Jalili, N. Optimizing Human-Robot Teaming Performance through Q-Learning Based Task Load Adjustment and Physiological Data Analysis. *Sensors* 2024, 24, 2817.
- Krenczyk, D.; Olender, M. Simulation Aided Production Planning and Scheduling Using Game Theory Approach. *Appl. Mech. Mater.* 2015, 809–810, 1450–1455.
- Lazarev, A.A., Gafarov, E.R., 2011. *Teoriya raspisanij: Zadachi i algoritmy [Scheduling Theory: Problems and Algorithms]*. Moscow University Press, Moscow.
- Lapshenkov, G.I., 2010. *Sistemnyj analiz. Issledovanie operacij: uchebnoe posobie [System Analysis. Operations Research: a textbook]*. MITHT im. M.V. Lomonosova, Moscow.
- Li, H., Yang, P., Liu, W., Yan, S., Zhang, X., & Zhu, D. (2025). Multi-Agent Reinforcement Learning in Games: Research and Applications. *Biometrics*, 10(6), 375.
- Li, X.; Xi, L.; Zha, W.; Peng, Z. Minimax Q-learning design for H_∞ control of linear discrete-time systems. *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.* 2022, 23, 438–451.
- Lin, S.-W.; Chu, C.-C. Distributed Q-Learning-Based Voltage Restoration Algorithm in Isolated AC Microgrids Subject to Input Saturation. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2024, 60, 5447–5459.
- Lim, J., Lanza, F., Nycz, T., Lu, Y., Morris, K.C., 2023. Ontology-Based Feedback to Improve Runtime Control for Multi-Agent Manufacturing Systems, in: *2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CASE56687.2023.10260630>
- Liu, X. A large-scale equilibrium model of energy emergency production: Embedding social choice rules into Nash Q-learning automatically achieving consensus of urgent recovery behaviors. *Energy* 2022, 259, 125023.
- Massart, D.L., Vandeginste, B.G.M., Deming, S.N., Michotte, Y., Kaufman, L. (eds.), 2003. *Operations Research*, in: *Data Handling in Science and Technology*. Elsevier, pp. 419–435.
- May, M.C., Batsaikhan, M., Lu, Y., Morris, K.C., 2022. Ontology-Based Production Simulation with OntologySim. *Applied Sciences* 12 (3), 1608. <https://doi.org/10.3390/app12031608>
- Mingozzi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S., Bianco, L., 1998. An Exact Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem Based on a New Mathematical Formulation. *Management Science* 44 (5), 714–729. <https://doi.org/10.1287/mnsc.44.5.714>
- Moukrim, A., Quilliot, A., Toussaint, H., 2015. An effective branch-and-price algorithm for the Preemptive Resource Constrained Project Scheduling Problem based on minimal Interval Order Enumeration. *European Journal of Operational Research* 244 (2), 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.037>

- Park, Y.-J.; Kim, J.-E.; Lee, S.-H.; Cho, K.-H. An Effective Design Formula for Single-Layer Printed Spiral Coils with the Maximum Quality Factor (Q-Factor) in the Megahertz Frequency Range. *Sensors* 2022, 22, 7761.
- Renna, P. (2024). A review of game theory models to support production planning, scheduling, cloud manufacturing and sustainable production systems. *Designs* 8 (2): 26.
- Shankar, S.; Young, R.A.; Young, M.E. Action-Project Method: An approach to describing and studying goal-oriented joint actions. *Med. Educ.* 2023, 57, 131–141.
- Shpilevoy V. et al. Multi-agent system “Smart Factory” for real-time workshop management in aircraft jet engines production //IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – Т. 46. – №. 7. – С. 204-209.
- Shukla O. J. et al. A review of multi agent-based production scheduling in manufacturing system //Recent Patents on Engineering. – 2021. – Т. 15. – №. 5. – С. 15-32.
- Siatras V. et al. On the use of asset administration shell for modeling and deploying production scheduling agents within a multi-agent system //Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – №. 17. – С. 9540.
- Skobelev, P., 2011. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Applications, in: 5th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011). Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23181-0_1
- Taha, H.A., 2005. Operations Research: An Introduction, 7th ed. Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Taillard, E.D., 1993. Benchmarks for basic scheduling problems. *European Journal of Operational Research* 64 (2), 278–285. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90182-M](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90182-M)
- Tushkanova, O., Gorodetsky, V., 2015. Data-driven semantic concept analysis for automatic actionable ontology design, in: 2015 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). IEEE, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/DSAA.2015.7344893>
- Volkova, V.N., Loginova, A.V., Shirokova, S.V., Iakovleva, E.A., 2016. Models for the study of the priorities of innovative companies, in: 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). IEEE, pp. 515–517. <https://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519831>
- Wang, J.; Zhang, Y.; Liu, Y.; Wu, N. Multiagent and Bargaining-Game-Based Real-Time Scheduling for Internet of Things-Enabled Flexible Job Shop. *IEEE Internet Things J.* 2019, 6, 2518–2531.
- Wooldridge, M.J., 2009. An Introduction to Multiagent Systems. John Wiley & Sons Publ., Chichester, UK.
- Xi, L.; Yu, T.; Yang, B.; Zhang, X. A novel multi-agent decentralized win or learn fast policy hill-climbing with eligibility trace algorithm for smart generation control of interconnected complex power grids. *Energy Convers. Manag.* 2015, 103, 82–93.
- Xiong, H., Shi, S., Ren, D., Hu, J., 2022. A survey of job shop scheduling problem: The types and models. *Computers & Operations Research* 142, 105731. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105731>
- Zeng, M., Wei, W., Zhang, X., Ju, Y., 2009. The Risk Evaluation of Human Resources for Power Supplying Company Based on Cloud Model, in: 2009 International Conference on Management and Service Science. IEEE, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2009.5303651>
- Zhao, X.; Hu, H.; Sun, D. Cooperation with Humans of Unknown Intentions in Confined Spaces Using the Stackelberg Friend-or-Foe Game. In *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2024; pp. 1–13

Статья поступила в редакцию 01.07.2025, одобрена после рецензирования 14.07.2025, принята к публикации 23.07.2025.

The article was submitted 01.07.2025, approved after reviewing 14.07.2025, accepted for publication 23.07.2025.

Информация об авторах:

1. Жанна Бурлуцкая, без звания, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, <https://orcid.org/0000-0002-5680-1937>, zhanna.burlutskaya@spbpu.com
2. Полина Шарко, без звания, инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, <https://orcid.org/0009-0006-4775-5189>, polina.sharko@spbpu.com
3. Алексей Гинцяк, канд. техн. наук, без звания, Заведующий лабораторией, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, <https://orcid.org/0000-0002-9703-5079>, gintsyak_am@spbstu.ru
4. Капитон Поспелов, без звания, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, <https://orcid.org/0009-0001-6160-8218>, kapiton.pospelov@spbpu.com

About the authors:

1. Zhanna Burlutskaya, posten, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, <https://orcid.org/0000-0002-5680-1937>, zhanna.burlutskaya@spbpu.com
2. Polina Sharko, posten, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, <https://orcid.org/0009-0006-4775-5189>, polina.sharko@spbpu.com
3. Aleksei Gintciak, Head of the laboratory, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, <https://orcid.org/0000-0002-9703-5079>, gintsyak_am@spbstu.ru
4. Kapiton Pospelov, posten, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, <https://orcid.org/0009-0001-6160-8218>, kapiton.pospelov@spbpu.com

Научная статья

УДК 519.876.2

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.4>

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЮ СКЛАДСКИМИ ЗАПАСАМИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

София Степанова^{}, Сальбек Бекетов*^{}

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,
stepanova2.sv@edu.spbstu.ru, salbek.beketov@spbpu.com

*Автор, ответственный за переписку: salbek.beketov@spbpu.com

Аннотация

Статья посвящена разработке гибридного подхода к моделированию процессов управления складскими запасами. Рассмотрены типовые особенности управления складскими запасами в условиях изменчивого спроса, сезонности и неопределенности поставок, характерных для строительной отрасли. В рамках исследования было выполнено описание текущего состояния складских и логистических процессов и построены типовые BPMN-диаграммы, отражающие полный цикл движения материалов: от формирования потребности и закупки до приемки, хранения и передачи материалов на строительные объекты. На основе данного процессного подхода предложено создание гибридной имитационной модели, сочетающей дискретно-событийное моделирование и элементы системной динамики, что позволит учитывать сезонные колебания спроса, изменения условий поставок и другие внешние факторы. Результаты исследования являются базой для разработки модели целевого состояния процессов, направленной на снижение рисков дефицита и избыточного накопления материалов, а также повышение эффективности складских и логистических процессов. Предлагаемый подход ориентирован на формирование устойчивой системы управления запасами, обеспечивающей снижение избыточного накопления материалов, сокращение потерь и рациональное использование ресурсов. Использование гибридной имитационной модели позволит учитывать как долгосрочные тенденции изменения спроса и условий функционирования системы, так и операционные особенности складских процессов, что повысит устойчивость и адаптивность управления запасами.

Ключевые слова: управление запасами, складские запасы, строительные материалы, автоматизация управления, логистические процессы, моделирование материальных потоков.

Цитирование: Степанова, С., Бекетов, С., 2025. Гибридный подход к моделированию процессов управления складскими запасами строительных материалов. Sustainable Development and Engineering Economics. 3, 4. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.4>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Степанова С., Бекетов С., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.4>

A HYBRID APPROACH TO PROCESS MODELING AND INVENTORY MANAGEMENT OF BUILDING MATERIALS

Sofia Stepanova^{}, Salbek Beketov*^{}

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, stepanova2.sv@edu.spbstu.ru, salbek.beketov@spbpu.com

*Corresponding author: salbek.beketov@spbpu.com

Abstract

The article is devoted to the development of a hybrid approach to modeling inventory management processes. Typical features of inventory management in conditions of variable demand, seasonality and uncertainty of supplies typical for the construction industry are considered. As part of the study, the current state of warehouse and logistics processes was described and typical BPMN diagrams were constructed that reflect the full cycle of material movement: from demand generation and procurement to acceptance, storage and transfer of materials to construction sites. Based on this process approach, it is proposed to create a hybrid simulation model combining discrete event modeling and elements of system dynamics, which will allow taking into account seasonal fluctuations in demand, changes in supply conditions and other external factors. The results of the study are the basis for developing a model of the target state of processes aimed at reducing the risks of shortage and excessive accumulation of materials, as well as improving the efficiency of warehouse and logistics processes. The proposed approach is focused on the formation of a sustainable inventory management system that ensures the reduction of excessive accumulation of materials, reduction of losses and rational use of resources. The use of a hybrid simulation model will allow taking into account both long-term trends in demand and operating conditions of the system, as well as operational features of warehouse processes, which will increase the stability and adaptability of inventory management.

Keywords: inventory management, inventory, building materials, management automation, logistics processes, material flow modeling.

Citation: Stepanova, S., Beketov, S., 2025. A hybrid approach to process modeling and inventory management of building materials. *Sustainable Development and Engineering Economics* 3, 4. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.4>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Stepanova S., Beketov S., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

Эффективное управление складскими запасами строительных материалов является одним из ключевых факторов обеспечения устойчивого развития строительных предприятий, поскольку напрямую влияет на рациональное использование ресурсов, снижение потерь и стабильность производственных процессов (Bulatnikova & Radaev, 2025; Oropku et al., 2022). Строительная отрасль отличается высокой чувствительностью к временным отклонениям, вследствие чего дефицит необходимых материалов на складе может привести к простоям, увеличению сроков реализации проектов и росту совокупных издержек. В то же время избыточные запасы способствуют нерациональному использованию складских площадей и отвлечению оборотных средств, снижая общую экономическую эффективность деятельности предприятия. Поддержание оптимального соотношения между уровнем запасов и фактической потребностью затруднительно без применения системного подхода, особенно в условиях нестабильного спроса и неопределенности в цепочках поставок (Becerra et al., 2022; Nigmatulin et al., 2025).

Дополнительную сложность в процесс планирования вносит неравномерность потребления строительных материалов, обусловленная сезонными факторами и спецификой отдельных строительных объектов. Колебания объемов спроса требуют более точного расчета параметров пополнения запасов и сроков размещения заказов. При этом возможные задержки поставок и изменения логистических условий повышают вероятность перебоев в обеспечении строительных процессов. В сложившихся условиях управление складскими запасами требует регулярного мониторинга, аналитической оценки отклонений и оперативного принятия корректирующих управленческих решений (Tao et al., 2024; Madamidola et al., 2024; Ernst et al., 1993).

Сложности усиливаются ростом количества операций, связанных с движением материалов: закупкой, транспортировкой, приемкой, хранением, внутренними перемещениями и распределением между объектами. Ошибки на любом этапе могут приводить к потере времени, увеличению затрат или возникновению дефицита. Чтобы избежать подобных ситуаций, необходимо применять методы, которые позволяют не только отслеживать запасы, но и прогнозировать будущие потребности, учитывать надежность поставщиков и возможные изменения в спросе (Tadayonrad & Ndiaye, 2023; Kaynov et al., 2024).

В последние годы управление запасами все чаще строится на использовании количественных методов. Это связано с тем, что традиционные подходы оказываются недостаточными при большом объеме данных и высокой изменчивости условий. Применение различных подходов к улучшению логистических процессов позволяет вычислять более точные параметры заказа, выбирать подходящие стратегии пополнения и снижать операционные издержки (Tao et al., 2024). При этом становится важным учитывать факторы, которые ранее редко включались в расчеты: надежность поставщиков, вероятность задержек, поведение спроса, ограничения по объемам хранения и транспорта и так далее (Qi et al., 2023).

Повышение эффективности управления запасами предполагает систематическое обновление и совершенствование применяемых методов и инструментов. Традиционные модели, основанные на предположении о постоянстве спроса и фиксированных интервалах поставок, в недостаточной степени отражают реальные условия функционирования складов строительных материалов. В отличие от них, расширенные методы управления запасами позволяют

учитывать особенности потребления материалов, влияние внешних факторов, а также потенциальные риски, связанные с нарушением поставок и изменением производственных условий (Kanike, 2023; Zhang et al., 2024). Применение таких подходов способствует поддержанию оптимального уровня запасов и снижению вероятности простоев при выполнении строительных работ.

В условиях высокой неопределенности возрастает значимость дополнительных аналитических и цифровых инструментов управления. Колебания спроса, несогласованность графиков поставок и изменения объемов строительной деятельности существенно усложняют процессы прогнозирования и планирования. В связи с этим разработка и внедрение методов и цифровых моделей, ориентированных на работу с неполной, нестабильной и динамически изменяющейся информацией, позволяют повысить точность оценки текущего состояния запасов и обеспечить более устойчивое и адаптивное функционирование складской системы (Stopková et al., 2019; Balakrishna et al., 2024).

Развитие цифровых технологий и методов обработки данных усиливает потребность в инструментах, которые помогают анализировать запасы комплексно. Такие решения позволяют выявлять «узкие» места, оценивать влияние различных факторов на уровень запасов и выбирать подходящую стратегию управления в меняющихся условиях (Gintsyak et al., 2023; Preil & Krapp, 2022). Это делает разработку новых инструментов и моделей важной частью современной практики складского управления.

Анализ существующих подходов к имитационному моделированию систем управления складскими запасами показывает, что в большинстве исследований используется одна модельная парадигма, например системная динамика для анализа агрегированных потоков (Lebedeva & Poluektova, 2013; Gridina & Shchukina, 2025) или дискретно-событийное моделирование для описания операционных процессов (Nigmatulin et al., 2025; Zagidullin & Filimonova, 2023; Danilov & Mayevskiy, 2025). Такие модели позволяют рассматривать отдельные аспекты управления запасами, однако оказываются ограниченными при необходимости одновременного учета долгосрочных тенденций и детальной логики выполнения складских операций. Это формирует исследовательский разрыв, связанный с недостаточной интеграцией различных уровней описания системы управления запасами.

Таким образом, целью данного исследования является использование гибридного подхода к автоматизации управления складскими запасами строительных материалов на основе формализации и анализа логистических и складских операций с целью повышения эффективности управления запасами, снижения рисков дефицита и избыточного накопления материалов, а также обеспечения устойчивости производственных и логистических процессов в условиях изменчивого спроса и нестабильных поставок.

Научная новизна исследования заключается в разработке и обосновании гибридного подхода к моделированию процессов управления складскими запасами строительных материалов, основанного на сочетании системной динамики и дискретно-событийного моделирования. В работе предложено разделение элементов между двумя контурами: системная динамика применяется для описания агрегированных и долгосрочных показателей, тогда как дискретно-событийное моделирование используется для представления операционной логики складских процессов.

2. Материалы и методы

Материалы и методы исследования основаны на применении процессного и имитационного подходов к анализу и моделированию системы управления складскими запасами строительных материалов. В качестве методологической базы использованы положения теории управления запасами, системного анализа, имитационного моделирования и процессного управления, а также современные исследования в области цифровизации логистических и складских процессов.

В качестве объекта исследования рассматривается система управления складскими запасами строительных материалов, функционирующая в условиях изменчивого спроса, сезонности и неопределённости поставок. Предметом исследования являются процессы формирования потребности, закупки, приёмки, хранения и распределения строительных материалов, а также методы их моделирования и автоматизации.

Исходными материалами для исследования послужили данные о типовых логистических и складских процессах на строительных предприятиях, а также результаты анализа научных публикаций, посвященных управлению запасами, имитационному моделированию и цифровизации логистики. Для описания процессов использовались укрупненные параметры, характерные для строительной отрасли, в том числе интенсивность спроса, сроки поставок, вероятность задержек, параметры хранения и потери материалов.

Методика исследования включала несколько последовательных этапов. На первом этапе был проведён анализ предметной области и существующих подходов к управлению складскими запасами строительных материалов. На втором этапе было выполнено описание текущего состояния процессов (AS-IS) с использованием BPMN-диаграмм, отражающих как полный цикл обеспечения строительных объектов материалами, так и отдельный контур движения материалов. На третьем этапе была разработана концептуальная архитектура гибридной имитационной модели, основанной на взаимодействии системно-динамического и дискретно-событийного контуров. На заключительном этапе были определены направления использования модели для анализа управленческих решений и формирования целевого состояния процессов (TO-BE).

Выбор гибридного подхода обусловлен необходимостью одновременного учёта факторов макроуровня, таких как сезонность спроса и изменение условий поставок, и особенностей складских операций на микроуровне. Применение системной динамики позволяет анализировать долгосрочное поведение системы управления запасами, а дискретно-событийное моделирование обеспечивает детальное описание логики выполнения операций и взаимодействия ресурсов.

Используемые материалы и методы исследования обеспечивают комплексный анализ процессов управления складскими запасами строительных материалов и создают основу для дальнейшей разработки цифровой модели поддержки принятия управленческих решений в условиях неопределённости и изменчивости внешней среды.

3. Результаты и обсуждение

В ходе исследования было выполнено подробное описание типовых процессов, связанных с обеспечением строительных объектов материалами, и была подготовлена процессная диаграмма (рис. 1), отражающая фактическую последовательность действий всех участников.

Данный подход используется для наглядного представления операций, их взаимосвязей и условий перехода между этапами в компании, что позволяет выявлять ключевые элементы управления запасами.

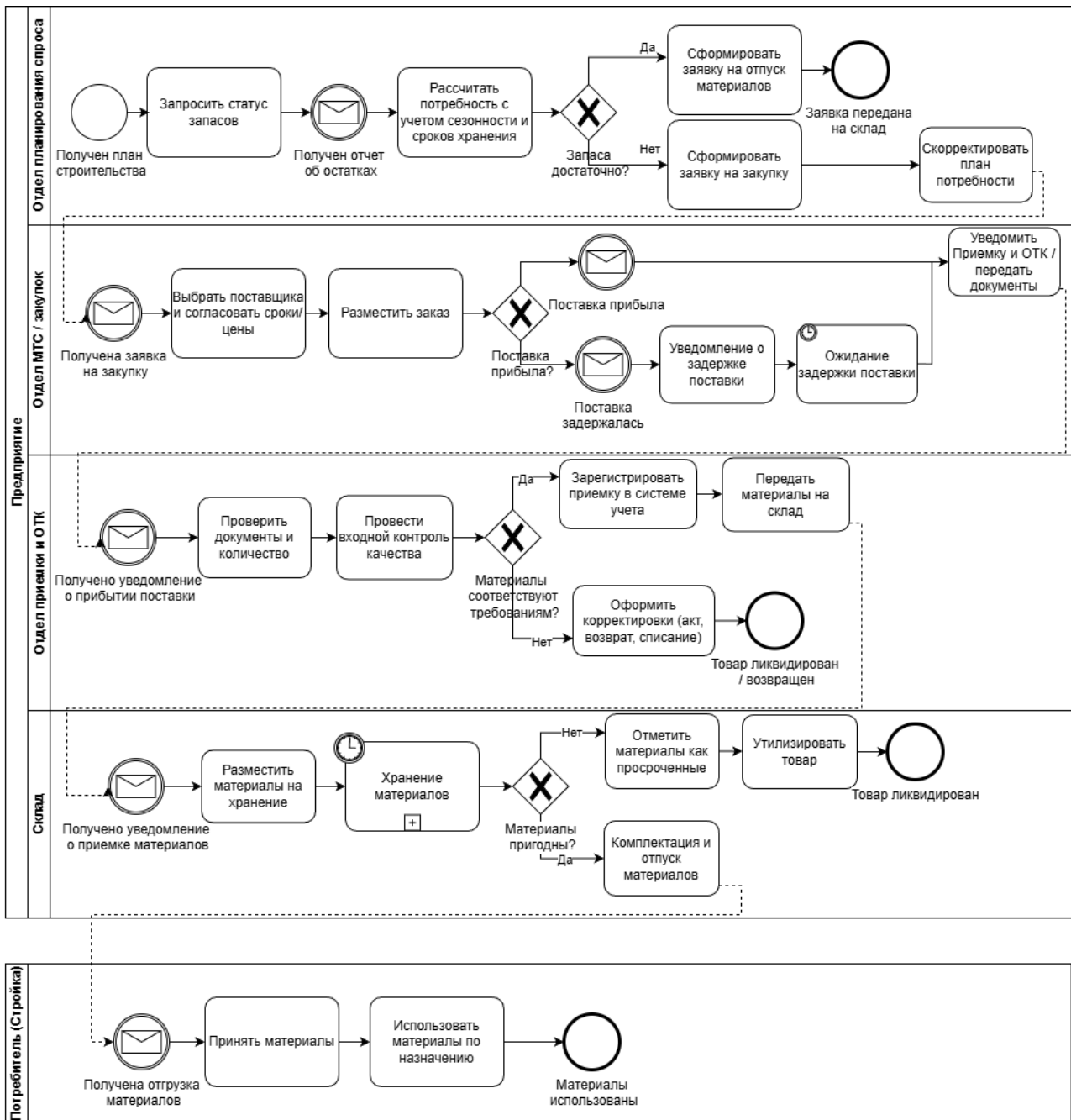


Рисунок 1. BPMN-диаграмма управления складскими запасами строительных материалов

Исходя из анализа компании, деятельность которой связана со строительными материалами, был проведен полный цикл деятельности: от получения планов строительства до передачи материалов конечному потребителю. Процесс начинается с получения информации о потребности и актуальных запасах. После сравнения ожидаемого расхода и имеющихся остатков принимается решение о необходимости пополнения. При недостатке запасов формируется заявка на закупку, которая передается в подразделение, отвечающее за взаимодействие с поставщиками. Также были учтены этапы выбора поставщика, согласования сроков, размещения заказа и контроля его исполнения. Возможны два варианта: своевременная поставка и

задержка. В случае задержки запускается процедура уведомления и уточнения сроков, что влияет на последующие операции планирования. Если поставка прибывает вовремя, процесс переходит к приемке и контролю качества.

Процессы, связанные с приемкой материалов, включают проверку сопроводительных документов и количественных показателей, входной контроль качества, а также фиксацию результатов проверки. В случае соответствия материалов установленным требованиям осуществляются их регистрация в информационной системе и последующая передача на склад. При выявлении несоответствий инициируется процедура корректировки, которая может включать оформление возврата, списания или утилизации материалов. Такая схема отражает реальные условия функционирования логистической цепочки и позволяет учитывать возможные отклонения в потоке материалов.

После регистрации материалы поступают на склад, где осуществляются определение места хранения, размещение и последующий контроль их состояния. На BPMN-диаграмме выделены операции, связанные с выявлением непригодных или просроченных материалов. В подобных случаях инициируются процессы утилизации. При подтверждении пригодности материалов выполняются операции комплектации и передачи конечному потребителю. Завершающим этапом логистической цепочки является использование материалов на строительном объекте.

Подробное отражение всех операций дает возможность оценить, как именно данные переходят между подразделениями, какие решения оказывают влияние на последующие этапы и где формируются потенциальные задержки. Такое представление важно для дальнейшего анализа, поскольку точность описания исходных процессов определяет качество последующих расчетов и моделирования (Sencer & Karaismailoglu, 2022; Stein Dani et al., 2022).

Отдельно сформирована BPMN-диаграмма, отражающая только операции, связанные с движением строительных материалов (рис. 2).

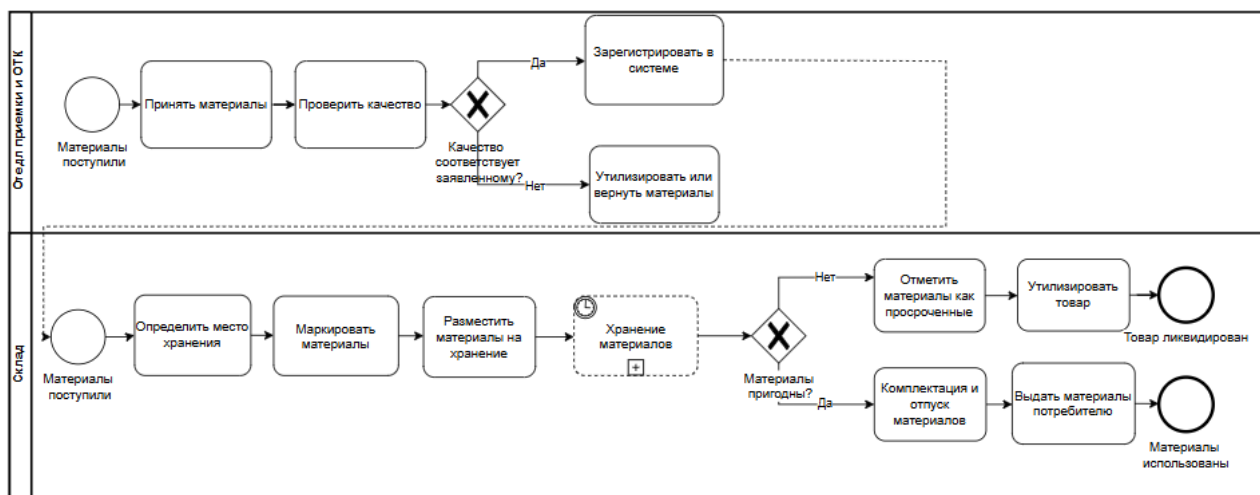


Рисунок 2. BPMN-диаграмма движения строительных материалов

В схему включены этапы приемки, проверки качества, регистрации поступления, определения места хранения, маркировки, размещения, контроля состояния материалов, выявления просроченных или непригодных запасов, а также действий по утилизации, возврату или передаче конечному потребителю. В сравнении с общей процессной диаграммой на

данном рисунке уточнены внутренняя логика операций, порядок переходов и последовательность действий сотрудников склада.

Данная схема является составной частью общей модели процессов компании AS-IS, однако выделена в отдельный блок, поскольку именно последовательность операций, связанных с движением и обработкой материалов, формирует основу для последующей разработки цифровой модели управления складскими запасами. Данный подход позволяет сосредоточиться на операциях, которые непосредственно определяют уровень и доступность запасов, а также влияют на параметры и результаты дальнейших расчетов.

В дальнейшем представленная диаграмма будет детализирована и перенесена в дискретно-событийную среду моделирования. Остальные процессы, не входящие непосредственно в контур движения материалов, планируется учитывать как внешние факторы, влияющие на поведение модели. На основе анализа процессов AS-IS предполагается реализовать гибридную имитационную модель, сочетающую дискретно-событийное моделирование с элементами системной динамики, что позволит учитывать такие факторы, как сезонность, изменение спроса и другие макроусловия функционирования склада. Разрабатываемая цифровая модель позволит автоматизировать ключевые функции управления запасами, включая контроль уровня складских остатков, прогнозирование потребности в строительных материалах, оценку влияния сезонных колебаний и спроса, а также поддержку принятия управленческих решений в условиях неопределенности.

Разработанные схемы отражают текущее состояние процессов (AS-IS) и фиксируют фактическую последовательность действий, связанных с обеспечением строительных объектов материалами. Данное представление необходимо для выявления ограничений существующей организации складской деятельности и определения операций и показателей, оказывающих наибольшее влияние на уровень и доступность запасов для дальнейшей оценки эффективности складских операций (Gunasekaran et al., 1999; Živičnjak et al., 2022; Abdul Rahman et al., 2023). На основе проведенного анализа и с учетом выявленных особенностей будет сформировано целевое состояние процессов (TO-BE), включающее рекомендации по совершенствованию организации работ, устранению избыточных операций и сокращению времени обработки строительных материалов.

Для обеспечения возможности комплексного анализа процессов управления запасами разработана концептуальная архитектура гибридного подхода к моделированию процессов управления складскими запасами строительных материалов, представленная на рис. 3. Архитектура основана на разделении модели на два взаимосвязанных контура: контур системной динамики и дискретно-событийный контур.

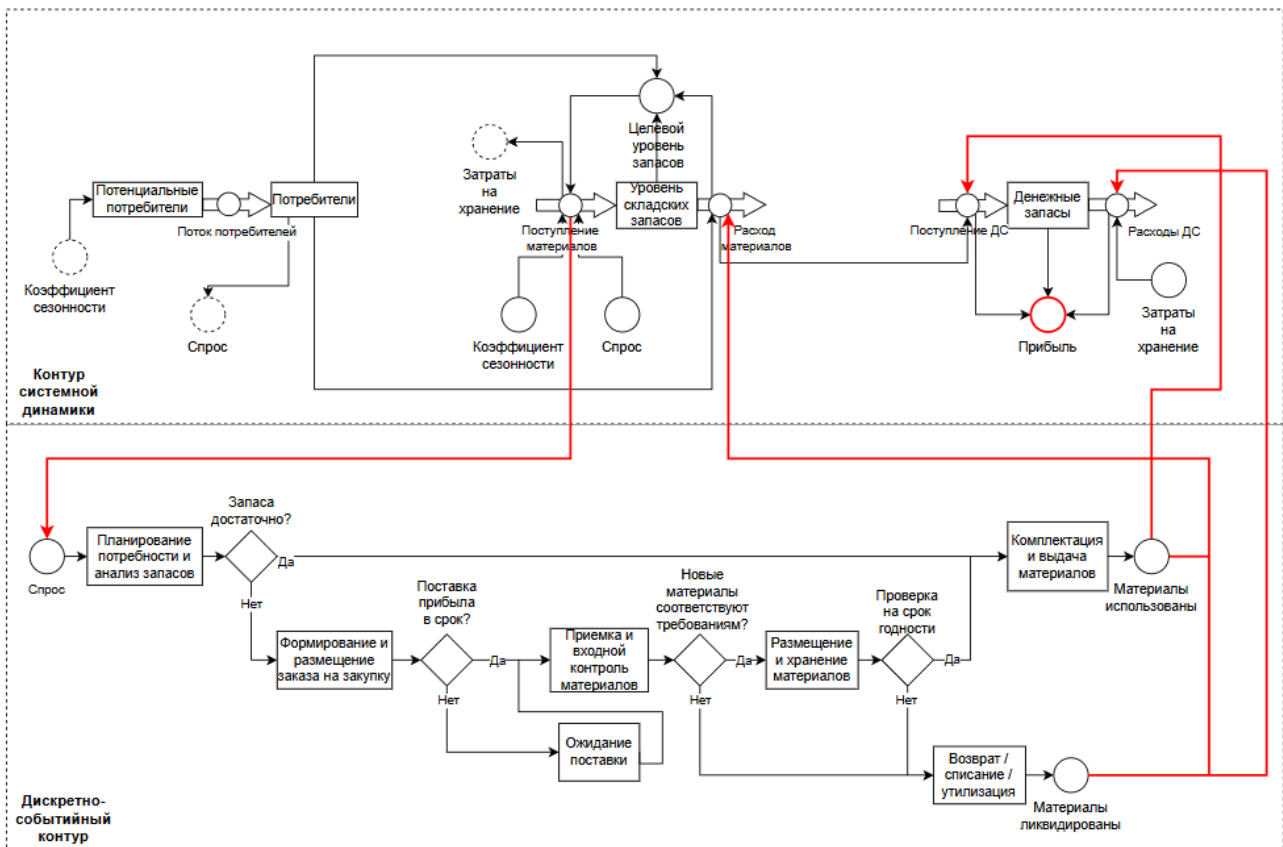


Рисунок 3. Концептуальная архитектура гибридного подхода к моделированию процессов управления складскими запасами строительных материалов

Представленная концептуальная схема отражает архитектуру гибридной имитационной модели управления складскими запасами строительных материалов и включает два контура: контур системной динамики и дискретно-событийный контур. Такое разделение позволяет учитывать как агрегированные изменения состояния системы во времени, так и детальную логику выполнения операционных процессов.

В контуре системной динамики находится уровень складских запасов, который изменяется под воздействием потоков поступления и расхода материалов. Поступление материалов формируется с учетом спроса и коэффициента сезонности, отражающего неравномерность потребления строительных материалов в течение года. Расход материалов определяется интенсивностью использования запасов потребителями и напрямую связан с фактическим спросом. Целевой уровень запасов используется как ориентир управления и сопоставляется с текущим уровнем складских остатков при формировании управленческих решений.

В контуре системной динамики также представлены экономические показатели. Потоки материальных ресурсов связаны с денежными потоками, формирующими уровень денежных запасов. На него влияют поступления денежных средств и расходы, включая затраты на хранение. В результате формируется показатель прибыли, позволяющий оценивать экономические последствия выбранной политики управления запасами. Таким образом, системно-динамический контур обеспечивает комплексный учет материальных аспектов функционирования складской системы.

Дискретно-событийный контур отражает операционные процессы управления запасами и движения материалов. Он начинается с этапа планирования потребности и анализа запасов,

инициируемого спросом. В зависимости от наличия материалов на складе принимается решение о необходимости закупки. При недостаточности запасов формируется и размещается заказ, после чего учитываются варианты своевременной поставки либо ожидания в случае задержки. Далее выполняются приемка и входной контроль материалов, а также проверка их соответствия установленным требованиям. Материалы, прошедшие контроль, размещаются на хранение с последующей проверкой сроков годности. При выявлении непригодных материалов запускаются процедуры возврата, списания или утилизации.

Связь между контурами реализуется за счет передачи ключевых параметров и фактических результатов. Спрос и параметры управления из системно-динамического контура определяют интенсивность поступления сущностей в дискретно-событийном контуре, тогда как результаты приемки, выдачи и списания материалов используются для корректировки потоков и запасов в системной динамике. Такое взаимодействие обеспечивает целостное описание системы управления запасами и создает основу для принятия управленческих решений с учетом устойчивости и эффективности функционирования складской системы.

В рамках исследования была выполнена декомпозиция процессов управления складскими запасами с учетом специфики строительных предприятий, характеризующихся проектным характером деятельности, неравномерностью потребления материалов и высокой зависимостью от внешних условий, например спроса. Предложенная структура процессов может рассматриваться как типовая для организаций, занимающихся управлением строительными материалами, поскольку отражает полный цикл работы с материалами – от формирования потребности до использования на объекте, а также позволяет адаптировать модель под различные масштабы и условия функционирования предприятия.

Разрабатываемая имитационная модель управления складскими запасами ориентирована на поддержку принятия управленческих решений. На основе результатов моделирования возможно оценивать влияние сезонных колебаний спроса на уровень запасов, анализировать последствия задержек поставок, выбирать параметры политики пополнения и прогнозировать потребность в материалах. Модель позволяет оценивать влияние управленческих решений на прибыль предприятия, включая управление уровнем запасов и сокращение времени обработки материалов, что одновременно обеспечивает повышение устойчивости и эффективности складской системы.

4. Заключение

В рамках проведенного исследования были рассмотрены процессы управления складскими запасами строительных материалов с точки зрения гибридного подхода и их формализации с использованием нотации BPMN. Был проведен анализ текущего состояния организации складской деятельности (AS-IS), охватывающий полный цикл обеспечения строительных объектов материалами: от формирования потребности и планирования закупок до приемки, хранения и передачи материалов конечному потребителю.

В результате исследования были построены процессные диаграммы, позволяющие отразить фактическую последовательность действий, взаимодействие подразделений и ключевые точки принятия решений. Отдельное выделение процессов, непосредственно связанных с движением материалов, позволило детализировать внутреннюю логику складских операций и определить этапы, которые оказывают наибольшее влияние на уровень и доступность запасов, а также на скорость и стабильность обеспечения строительных объектов.

Проведенная формализация процессов создает основу для дальнейшей цифровизации процессов управления складскими запасами. Предложенный подход позволяет перейти от описательного анализа к построению гибридной имитационной модели, сочетающей дискретно-событийное моделирование и элементы системной динамики. Использование гибридной имитационной модели обеспечит возможность учета изменчивого спроса, сезонных факторов и неопределенности поставок, а также позволит автоматизировать контроль складских остатков, прогнозирование потребности в материалах и обоснованное принятие управленческих решений.

Полученные результаты могут быть использованы при формировании модели целевого состояния процессов (ТО-ВЕ), направленной на улучшение складской деятельности, снижение рисков дефицита и избыточного накопления запасов, а также на повышение эффективности логистических и производственных процессов. Представленный подход может быть применен при разработке интеллектуальных систем управления запасами и служит основой для дальнейших исследований в области цифровизации складской логистики строительных предприятий.

Список литературы

- Abdul Rahman, N.S.F., Karim, N.H., Md Hanafiah, R., Abdul Hamid, S., Mohammed, A., 2023. Decision analysis of warehouse productivity performance indicators to enhance logistics operational efficiency. *International Journal of Productivity and Performance Management* 72 (4), 962–985. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2021-0373>
- Balakrishna Moorthy, C., Rajani, D., Pushpalatha, A.P., Ramya, S., Selvaraj, A., Mohit Tiwari, 2024. Enhancing Inventory Management through Advanced Technologies and Mathematical Methods: Utilizing Neutrosophic Fuzzy Logic. *International Journal of Neutrosophic Science* 24 (4), 50–58. <https://doi.org/10.54216/ijns.240403>
- Becerra, P., Mula, J., Sanchis, R., 2022. Sustainable Inventory Management in Supply Chains: Trends and Further Research. *Sustainability* 14 (5), 2613. <https://doi.org/10.3390/su14052613>.
- Ernst, R., Guerrero, J.L., Roshwalb, A., 1993. A quality control approach for monitoring inventory stock levels. *Journal of the Operational Research Society* 44 (11), 1115–1127.
- Gunasekaran A., Marri, H.B., Menci, F., 1999. Improving the effectiveness of warehousing operations: a case study. *Industrial Management & Data Systems* 99 (8), 328–339. <https://doi.org/10.1108/02635579910291975>
- Kanike U.K., 2023. Factors disrupting supply chain management in manufacturing industries. *Journal of Supply Chain Management Science* 4 (1–2), 1–24. <https://doi.org/10.18757/jscms.2023.6986>
- Kaynov, I., van Knippenberg, M., Menkovski, V., van Breemen, A., van Jaarsveld, W., 2024. Deep Reinforcement Learning for One-Warehouse Multi-Retailer inventory management. *International Journal of Production Economics* 267, 109088. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.109088>
- Madamidola, O.A., Daramola, O.A., Akintola, K., Adebaje, O., 2024. A Review of existing inventory management systems. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)* 12 (9), 40–50.
- Opoku A., Ahmed V., Ofori G., 2022. Realising the sustainable development goals through organisational learning and efficient resource management in construction. *Resources, Conservation and Recycling* 184, 106427. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106427>
- Preil, D., Krapp, M., 2022. Artificial intelligence-based inventory management: a Monte Carlo tree search approach. *Annals of Operations Research* 308 (1–2), 415–439. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-03935-2>
- Qi, M., Shi, Y., Qi, Y., Ma, Ch., Yuan, R., Wu, D., Shen, Z.-J. (Max), 2023. A Practical End-to-End Inventory Management Model with Deep Learning. *Management Science* 69 (2), P. 759–773. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2022.4564>
- Sencer, A., Karaismailoglu, A., 2022. A simulation and analytic hierarchy process based decision support system for air cargo warehouse capacity design. *Simulation* 98 (3), 235–255. <https://doi.org/10.1177/00375497211029915>
- Stein Dani, V., Freitas C.M.D.S., Thom L.H., 2022. Recommendations for visual feedback about problems within BPMN process models. *Software and Systems Modeling* 21 (5), 2039–2065. <https://doi.org/10.1007/s10270-021-00972-0>
- Stopková, M., Stopka, O., L'upták, V., 2019. Inventory Model Design by Implementing New Parameters into the Deterministic Model Objective Function to Streamline Effectiveness Indicators of the Inventory Management. *Sustainability* 11 (15), 4175. <https://doi.org/10.3390/su11154175>
- Tadayonrad Y., Ndiaye A.B., 2023. A new key performance indicator model for demand forecasting in inventory management considering supply chain reliability and seasonality. *Supply Chain Analytics* 3, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100026>
- Tao, S., Liu, Sh., Zhou, H., Mao, X., 2024. Research on Inventory Sustainable Development Strategy for Maximizing Cost-Effectiveness in Supply Chain. *Sustainability* 16 (11), 4442. <https://doi.org/10.3390/su16114442>
- Zhang, Q., Lu, D., Xiang, Q., Lo, W., Lin, Y., 2024. Design and optimization of dynamic reliability-driven order allocation and inventory management decision model. *PeerJ Computer Science* 10, e2294. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2294>
- Živičnjak, M., Rogić, K., Bajor I., 2022. Case-study analysis of warehouse process optimization. *Transportation Research Procedia* 64, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.026>
- Булатникова П.А., Радаев А.Е. Модель обоснования характеристик системы управления запасами материальных ресурсов с учетом различных категорий рисков // *π-Economy*. 2025. Т. 18. №. 4. С. 140–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.18721/ΠE.18408>
- Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Федяевская Д.Э., Поспелов К.Н., Ракова В.В. Цифровое моделирование социотехнических и социально-экономических систем. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. 164 с.

- Гридина В.В., Щукина А.А. Системно-динамическая модель оценки эффективности логистической деятельности предприятия оптово-розничной торговли // Новое в экономической кибернетике. 2025. № 2. С. 11–24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17081358>
- Данилов Г.Р., Маевский А.Г. Применение имитационного моделирования с целью эффективного внедрения инноваций в компании на примере логистики // Актуальные вопросы современной экономики. 2025. № 4. С. 162–172.
- Загидуллин Н.М., Филимонова Т.К. Разработка имитационной модели управления запасами в среде компьютерного моделирования AnyLogic // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 96–8. С. 46–49. <https://doi.org/10.18411/trnio-04-2023-404>
- Лебедева Л.М., Полуэктова Н.Р. Применение системной динамики для оценки изменения уровня запасов после внедрения ERP-систем // Проблемы экономики (Харьков). 2013. № 3. С. 321–329.
- Нигматулин А.Д., Бекетов С.М., Дергачев М.В. Совершенствование процессов управления запасами на предприятии в сфере электроники // Автоматизация в промышленности. 2025. № 8. С. 25–28.

References

- Abdul Rahman, N.S.F., Karim, N.H., Md Hanafiah, R., Abdul Hamid, S., Mohammed, A., 2023. Decision analysis of warehouse productivity performance indicators to enhance logistics operational efficiency. *International Journal of Productivity and Performance Management* 72 (4), 962–985. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2021-0373>
- Balakrishna Moorthy, C., Rajani, D., Pushpalatha, A.P., Ramya, S., Selvaraj, A., Mohit Tiwari, 2024. Enhancing Inventory Management through Advanced Technologies and Mathematical Methods: Utilizing Neutrosophic Fuzzy Logic. *International Journal of Neutrosophic Science* 24 (4), 50–58. <https://doi.org/10.54216/ijns.240403>
- Becerra, P., Mula, J., Sanchis, R., 2022. Sustainable Inventory Management in Supply Chains: Trends and Further Research. *Sustainability* 14 (5), 2613. <https://doi.org/10.3390/su14052613>
- Bulatnikova P.A., Radaev A.E., 2025. Model for substantiating the characteristics of a material resource inventory management system, taking into account various risk categories. *π-Economy* 18 (4), 140–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.18721/JE.18408>
- Danilov, G., Mayevskiy, A., 2025. Application of Simulation Modeling for the Effective Implementation of Innovations in a Company Using Logistics as an Example. *Aktualnyye voprosy sovremennoy ekonomiki [Current issues of modern economics]* 4, 162–172.
- Ernst, R., Guerrero, J.L., Roshwalb, A., 1993. A quality control approach for monitoring inventory stock levels. *Journal of the Operational Research Society* 44 (11), 1115–1127.
- Gintsyak, A.M., Burlutskaya, Zh.V., Fedyayevskaya, D.E., Pospelov, K.N., Rakova, V.V., 2023. Digital Modeling of Sociotechnical and Socio-Economic Systems. Publishing House of Polytechnical University, St. Petersburg.
- Gridina, V., Shchukina, A., 2025. System-Dynamic Model for Assessing the Efficiency of Logistics Activities of a Wholesale and Retail Trade Enterprise. *New in Economic Cybernetics* 2, 11–24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17081358>
- Gunasekaran A., Marri H.B., Menci F., 1999. Improving the effectiveness of warehousing operations: a case study. *Industrial Management & Data Systems* 99 (8), 328–339. <https://doi.org/10.1108/02635579910291975>
- Kanike U.K., 2023. Factors disrupting supply chain management in manufacturing industries. *Journal of Supply Chain Management Science* 4 (1–2), 1–24. <https://doi.org/10.18757/jscms.2023.6986>
- Kaynov, I., van Knippenberg, M., Menkovski, V., van Breemen, A., van Jaarsveld, W., 2024. Deep Reinforcement Learning for One-Warehouse Multi-Retailer inventory management. *International Journal of Production Economics* 267, 109088. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.109088>
- Lebedeva L.M., Poluektova, N.R., 2013. Primeneniye sistemnoy dinamiki dlya otsenki izmeneniya urovnya zapasov posle vnedreniya ERP-sistem [Application of system dynamics for assessment of changes of the level of stock after introduction of ERP systems]. *Problemy ekonomiki (Kharkov) [Problems of the Economy (Kharkiv)]* 3, 321–329.
- Madamidola, O.A., Daramola, O.A., Akintola, K., Adeboje, O., 2024. A Review of existing inventory management systems. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)* 12 (9), 40–50.
- Nigmatulin A.D., Beketov S.M., Dergachev M.V., 2025. Sovershenstvovaniye protsessov upravleniya zapasami na predpriyatii v sfere elektroniki [Improving inventory management processes at an electronics company]. *Automation in Industry* 8, 25–28.
- Opoku, A., Ahmed, V., Ofori, G., 2022. Realising the sustainable development goals through organisational learning and efficient resource management in construction. *Resources, Conservation and Recycling* 184, 106427. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106427>
- Preil, D., Krapp, M., 2022. Artificial intelligence-based inventory management: a Monte Carlo tree search approach. *Annals of Operations Research* 308 (1–2), 415–439. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-03935-2>
- Qi, M., Shi, Y., Qi, Y., Ma, Ch., Yuan, R., Wu, D., Shen, Z.-J. (Max), 2023. A Practical End-to-End Inventory Management Model with Deep Learning. *Management Science* 69 (2), P. 759–773. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2022.4564>
- Sencer, A., Karaismailoglu, A., 2022. A simulation and analytic hierarchy process based decision support system for air cargo warehouse capacity design. *Simulation* 98 (3), 235–255. <https://doi.org/10.1177/00375497211029915>
- Stein Dani V., Freitas C.M.D.S., Thom L.H., 2022. Recommendations for visual feedback about problems within BPMN process models. *Software and Systems Modeling* 21 (5), 2039–2065. <https://doi.org/10.1007/s10270-021-00972-0>
- Stopková, M., Stopka, O., L'upták, V., 2019. Inventory Model Design by Implementing New Parameters into the Deterministic Model Objective Function to Streamline Effectiveness Indicators of the Inventory Management. *Sustainability* 11 (15), 4175. <https://doi.org/10.3390/su11154175>
- Tadayonrad Y., Ndiaye A.B., 2023. A new key performance indicator model for demand forecasting in inventory management considering supply chain reliability and seasonality. *Supply Chain Analytics* 3, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100026>
- Tao, S., Liu, Sh., Zhou, H., Mao, X., 2024. Research on Inventory Sustainable Development Strategy for Maximizing Cost-Effectiveness in Supply Chain. *Sustainability* 16 (11), 4442. <https://doi.org/10.3390/su16114442>
- Zagidullin N.M., Filimonova T.K., 2023. Razrabotka imitatsionnoy modeli upravleniya zapasami v sfere kompyuternogo modelirovaniya anylogic [Development of a simulation model of inventory management in the AnyLogic computer modeling environment], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya [Trends in the development of science and education]* 96–8, 46–49. <https://doi.org/10.18411/trnio-04-2023-404>
- Zhang, Q., Lu, D., Xiang, Q., Lo, W., Lin, Y., 2024. Design and optimization of dynamic reliability-driven order allocation and inventory management decision model. *PeerJ Computer Science* 10, e2294. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2294>
- Živičnjak, M., Rogić, K., Bajor I., 2022. Case-study analysis of warehouse process optimization. *Transportation Research Procedia* 64, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.026>

Статья поступила в редакцию 25.06.2025, одобрена после рецензирования 06.07.2025, принята к публикации 20.07.2025.

The article was submitted 25.06.2025, approved after reviewing 06.07.2025, accepted for publication 20.07.2025.

Информация об авторах

1. София Степанова, магистрант, Высшая школа проектной деятельности и инноваций в промышленности, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, <https://orcid.org/0009-0006-4481-8383>, stepanova2.sv@edu.spbstu.ru
2. Сальбек Бекетов, ассистент, Высшая школа проектной деятельности и инноваций в промышленности, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, <https://orcid.org/0009-0009-6448-9486>, salbek.beketov@spbpu.com

About the authors:

1. Sofiia Stepanova, Master's student, Higher School of Project Activities and Innovations in Industry, Institute of Machinery, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia, <https://orcid.org/0009-0006-4481-8383> , stepanova2.sv@edu.spbstu.ru
2. Salbek Beketov, assistant, Higher School of Project Activities and Innovations in Industry, Institute of Machinery, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia, <https://orcid.org/0009-0009-6448-9486> , salbek.beketov@spbpu.com

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.5>

**STIMULATING INDUSTRIAL DEVELOPMENT OF THE REGION
IN THE CONTEXT OF TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY
USING A LEASING PAYMENT OPTIMIZATION MODEL**

Alla Ponomarenko*, Natalia Shemiakina

State-Funded Institution Economic Research Institute, Donetsk, Russia, ponomarenkoalla@mail.ru, nshemiakina@mail.ru

*Corresponding author: ponomarenkoalla@mail.ru

Abstract

This article analyzes the incentives for industrial growth from the perspective of modern Russia's strategic priorities to create an environment conducive for scientific, technological, and engineering advances. The key national challenges lie in overcoming the technological gap in industry at the regional level, which requires systematic, high-quality upgrading of production facilities. Since the technological capacity of the industrial sector is the fundamental factor in achieving technological sovereignty, the role of leasing as one of the instruments of industrial policy in this process is substantiated. The goal of the work is to improve the scientific and methodological approach to the use of leasing in stimulating industrial development in the context of technological sovereignty. The study focuses on several complex issues, analyzing conceptual approaches to technological sovereignty and industrial policy. Furthermore, we constructed a model for optimizing leasing payments adapted to the conditions of post-conflict industrial recovery in a new region of the Russian Federation based on fostering industrial partnerships. The main result of the study is the calculation of leasing payments taking into account the risk premium and interest rate subsidies, allowing to justify measures for economic stimulation of leasing operations in the industry of a region with specific economic conditions, increasing their mutual benefit for the lessor and the lessee.

Keywords: stimulation, industrial development, technological sovereignty, optimization model, leasing.

Citation: Ponomarenko, A., Shemiakina, N., 2025. Stimulating industrial development of the region in the context of technological sovereignty using a leasing payment optimization model. *Sustainable Development and Engineering Economics* 3, 5. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.5>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Ponomarenko A., Shemiakina, N., 2025. Published by Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University.

Научная статья

УДК 338

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.5>

СТИМУЛИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНА В КОНТЕКСТЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ЛИЗИНГОВЫХ ПЛАТЕЖЕЙ

Алла Пономаренко*, Наталья Шемякина

ГБУ «Институт экономических исследований», Донецк, Россия, ponomarenkoalla@mail.ru,
nshemiakina@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку: ponomarenkoalla@mail.ru

Аннотация

В статье стимулирование промышленного развития рассматривается с позиции стратегических ориентиров современной России, которые непосредственно связаны с формированием условий для внедрения достижений науки, технологий и техники. Решение ключевых задач находится в плоскости преодоления технологического отставания промышленности на региональном уровне, в том числе, за счет обновления материальной основы производства на качественной и регулярной основе, что свидетельствует об актуальности исследования. Исходя из того, что технико-технологическая обеспеченность промышленного производства определяется как базовый фактор достижения технологического суверенитета, в данном процессе обоснована роль лизинга, как одного из инструментов промышленной политики. Целью работы является совершенствование научно-методического подхода к использованию лизинга в стимулировании промышленного развития в контексте технологического суверенитета. Исследование сосредоточено на решении ряда комплексных задач, а именно, анализе концептуальных подходов к технологическому суверенитету и промышленной политике, разработке модели оптимизации лизинговых платежей, адаптированной к условиям постконфликтного восстановления промышленности нового региона РФ на основе развития партнерских отношений в промышленности. Основным результатом исследования является расчёт лизинговых платежей с учётом премии за риск и субсидирования процентных ставок, что позволяет обосновать меры экономического стимулирования лизинговых операций в промышленности региона со специфическими условиями хозяйственной деятельности, повышающие их взаимовыгодность для лизингодателя и лизингополучателя.

Ключевые слова: стимулирование, промышленное развитие, технологический суверенитет, модель оптимизации, лизинг.

Цитирование: Пономаренко А., Шемякина Н., 2025. Стимулирование промышленного развития региона в контексте технологического суверенитета с использованием модели оптимизации лизинговых платежей. *Sustainable Development and Engineering Economics*. 3, 5. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.5>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Пономаренко А., Шемякина Н., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

1. Introduction

The increasing importance of stimulating industrial development and ensuring the technological independence of the national economy necessitates import substitution across a wide range of products and components, making the material and technical base crucial for the domestic industrial sector. In this regard, research on measures and instruments of state support for industrial development in the context of technological sovereignty holds significant scientific and practical interest.

At the present stage, the sovereignty of technological reproduction is designated as the conceptual basis for the industrial development of the Russian economy. Key goals and directions for technological development up to 2030 within the context of the formation of a new industrial policy are enshrined in the Concept of Technological Development (Order of the Government of the Russian Federation dated May 20, 2023, No. 1315-r). The fundamental principle for implementing the Concept's new priorities is the idea of partnerships.

As global experience shows, the growing imperative to apply scientific discoveries and inventions into practice strengthens the involvement of state, business, and society in addressing the challenges of advancing technological innovation. Consequently, issues of technological sovereignty should be fully integrated into the goals and instruments of industrial policy (Crespi, Caravella et al., 2021). The dynamic nature of industrial policy, means that it evolves in response to changes in its goals, the chosen policy instruments and the level of support measures, which together shape how actively it is implemented (Heinrich et al., 2025). Technological sovereignty is considered as an organized action by the state that complements innovation policy, going beyond outdated perspectives or paradigms of economic competitiveness and socio-technological transformations (Edler et al., 2023). Therefore, the concept of technological sovereignty bridges industrial and innovation policies, forging stronger links between the industry and the economy by generating a synergistic effect.

However, the incomplete nature of systemic and structural reforms accompanying the implementation of industrial policy in Russia negatively affects achieving the country's technological sovereignty objectives (Shkodinsky, Prodchenko et al., 2024).

The scale of the necessary structural transformations in Russia, along with their place on the agenda for technological and industrial progress, depend on the realities and future trajectories for industrial development in regions with specific economic conditions. A key priority for modern Donbass is to address the problem of manufacturing on technologically obsolete equipment, whose wear and tear across the region amounts to more than 70%. In practice, a number of industries struggle to reach a new competitive level in the context of technological sovereignty if they rely solely on market mechanisms and classical support measures.

The specifics of leasing payments determine the benefits of leasing as a tool for technological modernization of production and stimulation of industrial development. Government subsidies are the primary tool for stimulating sales of equipment and machinery on the Russian market, directly influencing the dynamics of new transactions in the domestic machinery, equipment, and machinery segments. Market participants see underfunded regions as promising for business expansion.

A leasing transaction, when viewed from the perspective of a partnership, requires a balance of interests of the parties, so the execution of a leasing contract should result in achieving mutual benefit for both parties. Accordingly, it seems appropriate to construct an economic mathematical model for optimizing leasing payments based on the principles of partnership or mutual benefit for the participants.

This study aims to refine the modeling method proposed for optimizing leasing payments (Shmyrev and Osadchiy, 2001, Shmyrev and Safronova, 2004).

The object of the study comprises the economic processes involved in advancing technological sovereignty and executing the industrial policy to stimulate the industrial growth.

The subject of the research is the refinement of the scientific and methodological approach to using leasing as a catalyst for industrial growth, taking into account the specific economic conditions.

The hypothesis of the study is that improving the methods and instruments of state support based on partnership principles focused on production logistics will stimulate the industrial sector and help achieve the objectives of technological sovereignty.

2. Literature review

Prioritizing technological sovereignty in state strategies reflects a commitment to enhancing competitiveness and driving transformation, aimed at promoting production based on key technologies securing economic and political sovereignty (March and Schieferdecker, 2021).

In the geostrategic space, technology-intensive countries and major economic players compete for technological and industrial leadership. The configuration of global value chains reflects this process. Productivity and security are becoming vital interests of states and interstate relations. Therefore, the geopolitical context has important implications for the distribution of technological capacity in the global economy. Structural dependence on leading countries in various fields requires other countries to increase their level of technological sovereignty (Crespi, Caravella et al., 2021). The influence of global technological competition motivates countries specializing in high-value activities in global value chains to modernize their technological capabilities. Therefore, technologically leading countries seek control over key technologies and technological sovereignty (Edler et al., 2023).

The concept of technological sovereignty was shaped by the spread of technology platforms in global economic practice as an element of the open innovation model, which was subsequently identified as a source of extraterritorial institutional influence (Gareev, 2023).

In the developed market economy, leading industrialized countries provide comprehensive government support for technological development. A well-developed system of government regulation and incentives ensures the introduction of advanced technologies, new equipment, and the upgrading of personnel skills (Beliakov et al., 2019).

Globally, the importance of industrial policy as a tool for targeted stimulation of structural transformation of national economies, ensuring sustainable growth, is determined by economic crises and deepening globalization. In recent years, the needs and objectives of industrial policy have changed fundamentally under the influence of the emergence of a new face of the global economy, in which the demand for industrial policy is increasing (Aiginger and Ketels, C., 2024).

The prospects for industrial policy are linked to the emergence of new, more flexible forms of cooperation between the public and private sectors, aimed at addressing new challenges in a broader sphere than a focus on industry or manufacturing. The concept of industrial policy in the 21st century is to support and develop modern economic activities, including the service sector, and not just manufacturing (Aiginger and Rodrik, 2020). Gereffi et al. (2025) propose a concept of integrating

industrial policy and global value chains as a response to geopolitical upheavals and the reorientation of industrial policy by governments from welfare to security.

Establishing public-private partnerships in conflict-affected areas is a relatively new area of research. In such settings, specific conditions exacerbate the risks, resulting in stakeholder uncertainty about the feasibility of financial and non-financial investments and the effectiveness of government support measures (Kawther et al., 2025). The key role of public-private partnerships in the development of modern infrastructure is demonstrated in (Son and Duong, 2024). When implementing complex PPP projects, governments attract funding and expertise from the private sector. The effectiveness of partnerships is demonstrated in the management and sharing of risks, the alignment of stakeholders, and financial sustainability (Ehab et al. 2025).

Achieving Russia's technological development goals largely depends on the effectiveness of the science and technology governance system and the ability to adapt to the challenges of restoring the country's technological sovereignty (Kamolov et al., 2022). An effective national research and innovation sector requires a network of support organizations at various levels of the economic system. Network interaction, taking into account the synergy effects of various types of regional and state organizations, should ensure the growth of Russia's scientific and technological potential (Byvshev et al., 2020). However, even if Russia successfully pursues its course towards technological sovereignty, progress in innovation or sustained economic growth is by no means guaranteed (Smorodinskaya and Katukov, 2024).

Territorial differences across the Russian Federation are an undeniable economic factor influencing how the industry transforms to meet the state's industrial policy and technological sovereignty objectives. The uneven industrial development of Russia's regions results from their economic specialization, sectoral structure and resource base. Conversely, the technological embargo poses a direct challenge to the Russian economy faced with the dual objectives of achieving technological sovereignty and import substitution (Kapoguzov, Sheresheva, 2024).

Russia's industrial regions are potentially hubs of technological development and productivity growth. Timely and effective government support will be essential to realizing this potential (Korovin, 2021).

Despite the scope and relevance of the subject area of the stated research topic, measures to stimulate industrial development in the context of technological sovereignty require further development and improvement.

3. Materials and Methods

To confirm the proposed hypothesis, solve the stated problems, and validate the obtained results, general scientific and modern methods were used, including synthesis, induction and deduction, abstraction and systematization, economic analysis, and economic-mathematical modeling.

The research information base consists of statistical materials and reports from relevant agencies, departments, and organizations, as well as scientific and periodical literature.

The mathematical formulation of the problem, to be solved by constructing a lease payment optimization model, is based on the modeling method proposed in the works (Shmyrev and Osadchiy, 2001, Shmyrev and Safronova, 2004). The study's core premise is that modifying the lease payment optimization model by expanding its parameters will make it possible to solve the classical optimization problem. By incorporating a balance of interests to apply the partnership principle, the refined

model will help stimulate leasing operations in the industry of a new region of the Russian Federation in the context of post-conflict reconstruction.

The model describes the following leasing scheme: a bank provides a loan to the lessor; the lessor purchases the leased asset from the supplier using the loan amount; the lessor transfers the leased asset to the lessee for use; the lessee makes periodic lease payments to the lessor and, upon termination of the lease, can purchase the leased asset at its residual value; the lessor divides the payments received into two parts: one goes toward repaying the loan and paying taxes, and the other is retained as compensation for the service provided.

According to the assumption, the lessor's risk premium (ρ) and the interest rate subsidy (λ) are used as regulating parameters when calculating the discount factor. Table 1 summarizes the model assumptions used in its construction.

Table 1. Assumptions for constructing the lease payment optimization model

Designation	Description
Assumption 1	All settlements between the lessee and the lessor and the lessor and the bank, as well as the payment of taxes, occur simultaneously at the end of the i -th period.
Assumption 2	Value Added Tax is not taken into account or is considered to be automatically refundable.
Assumption 3	The lessor takes into account additional risk in the form of a risk premium, which increases the total interest rate, while the state can subsidize the high interest rate, thereby making it more profitable.
Assumption 4	The income tax rate, the risk-free interest rate, the lessor's risk premium and the amount of the interest rate subsidy are constant throughout the term of the lease agreement.

Assumption (3) is taken into account when calculating discount factors:

$$c_i = \frac{1}{(1 + (r + \rho))^i},$$

$$v_i = \frac{1}{(1 + (r + \rho - \lambda))^i},$$

The model has the following form:

objective function:

$$\sum_{j=1}^i c_j x_j \rightarrow \min,$$

assumption:

$$\sum_{j=1}^i x_j \geq \sum_{j=1}^i a_j + t \sum_{j=1}^i p_j, \quad i = 1, \dots, n,$$

$$p_i - l_i = x_i - b_i - \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} l_j, \quad i = 1, \dots, n,$$

$$\sum_{j=1}^n v_j (x_j - a_j - t p_j) \geq S,$$

$$p_j l_j = 0, \quad j = 1, \dots, n,$$

$$x_j, p_j, l_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n.$$

where: i, j are the period indices; c_i are the coefficients for bringing lease payments to the initial point in time; x_i is the amount of the lease payment in the i th period; a_i are the costs allocated to the lessor's cost; t is the income tax rate; p_i is the amount of losses in the j th period of the lessee; n is the term of the lease agreement; l_i is the amount of losses in the j th period of the lessee; b_i are the costs allocated to the cost of the lessee; k_{ij} are the coefficients that take into account the losses of the lessee's previous periods in the current period; v_i are the coefficients for discounting the amount of the lessor's remuneration; S is the specified level of the total present value of the lessor's remuneration.

4. Results

Optimal lease payment calculation scenarios were developed for the Donetsk People's Republic, Table 2. The risk-free rate corresponds to the Central Bank of the Russian Federation key rate, net of inflation. The lessor's risk premium reflects the current transition period conditions (ρ regulator). The interest rate subsidy reflects government support options (λ regulator)

Table 2. Optimal Lease Payment Calculation Scenarios

	Risk-free rate, r	Rate subsidy, λ	Risk premium, ρ
scenario 1	12%	0%	25%
scenario 2	12%	8%	25%
scenario 3	12%	8%	1%

Computational experiments are conducted based on a special algorithm developed for implementing the scenarios and an economic-mathematical model, which was tested using data from the annual reports of Sberbank Leasing JSC. The algorithm reflects the sequence of calculating the parameters of economic incentives for industrial leasing using an interest rate subsidy mechanism. Its purpose is to determine the subsidy amount λ that ensures a specified level of the lessor's total present value remuneration S . The calculation results are illustrated in Figure 1, which presents profitability graphs for all scenarios for the entire term of the leasing agreement. Based on the results of calculating optimal lease payments for a five-year lease agreement, the average profitability of the lessor for the scenarios was as follows: 6.08% for Scenario 1, 6.92% for Scenario 2, 11.25% for Scenario 3.

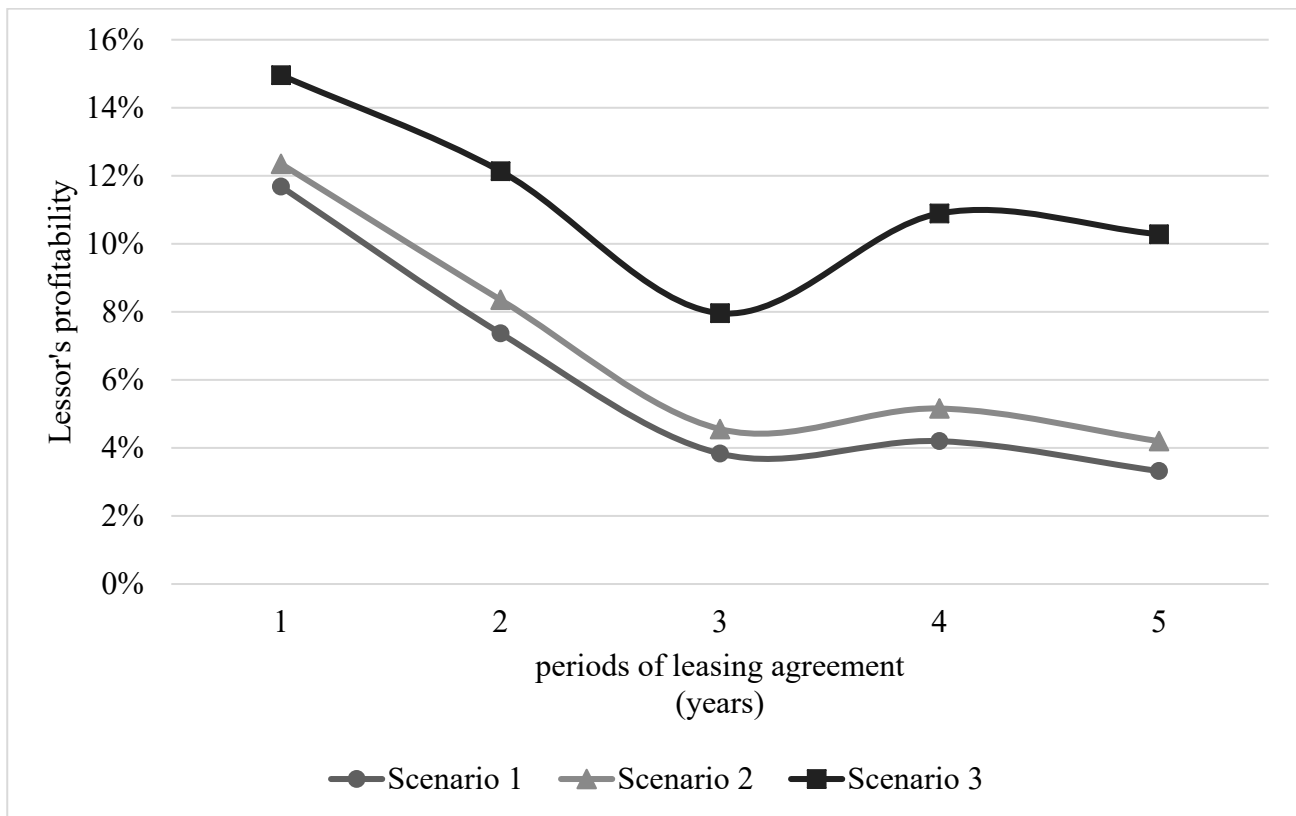


Figure 1. Lessor profitability under different economic incentive scenarios

As Figure 1 shows, under scenario 1 (business as usual), leasing operations have low profitability due to the very high real key rate of the Central Bank of the Russian Federation and the high risks of the post-conflict economy, which are factored into the discount rates. Scenario 2 (application of an interest rate subsidy) and scenario 3 (reduction of the risk premium), assuming optimal leasing payments, will have a positive impact on the attractiveness of leasing in the industry of the new region of the Russian Federation due to a significant increase in the lessor's profitability, which is the ratio of the average discounted profit for the period to the cost of the leased equipment.

The model is designed to substantiate measures to economically stimulate leasing operations in the industry of the new region, increasing their profitability for both the lessor and the lessee. It reflects modern approaches to leasing development using various forms of government subsidies, such as reimbursement of a portion of the advance payment under the leasing agreement; Providing a preferential loan to form an advance payment, allocating preferential finance to leasing companies for the subsequent conclusion of cheaper leasing transactions.

5. Discussion

The public-private partnership is a relatively new instrument in the state management of industrial development in Russia, focused on technological economic growth, as evidenced by the structure of the distribution of the total number of PPP projects across various sectors of the economy, Figure 2.

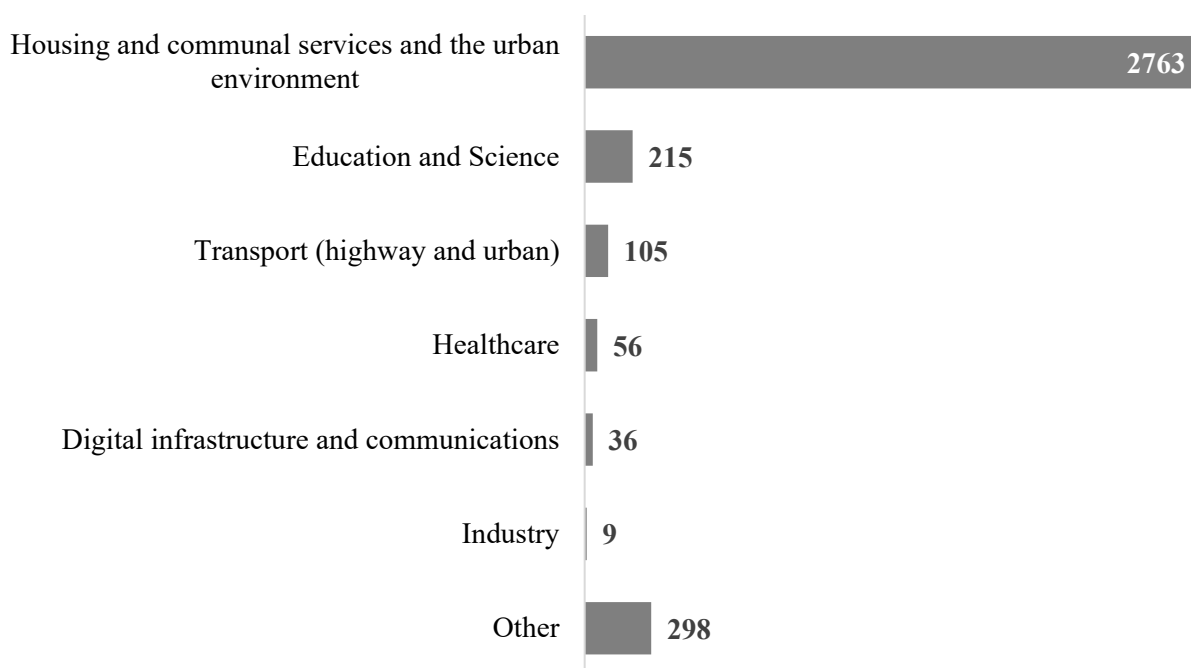


Figure 2. Number of PPP projects in various areas of infrastructure and industry^{1,2,3}

A statistical analysis of the PPP market reveals that, globally, as in Russia, public-private partnerships are used largely as a tool for infrastructure development. By design, the PPP mechanism represents a means for overcoming budget constraints and a new style of public administration. Public-private partnership mechanisms are traditionally applied in sectors like transportation and utilities infrastructure, housing and other real estate, education, healthcare, culture, sports, fire protection, the penitentiary system, and fundamental science, that is, sectors that are state-owned and/or under the responsibility of state and municipal governments.

According to the World Bank, the global regional dynamics of private investment in infrastructure PPP projects are as follows, Figure 3.

¹ Investments in infrastructure and PPP 2023. Analytical review / National Center for Public-Private Partnerships, VEB RF. Moscow: Rosinfra, 2023. <https://rosinfra.ru/library/956-investitsii-v-infrastrukturu-i-g-ch-p-2023-analiticheskii-obzor>

² Key trends and statistics of the PPP market by the end of 2023. Analytical review / National Center for Public-Private Partnerships, VEB RF. Moscow: Rosinfra, 2023. <https://pppcenter.ru/upload/iblock/b0f/b0fcbdbe6927a5b75f7526d86642cf47.pdf>

³ Public-Private Partnerships in Russia: 2023 Results and Key Trends / Analytical Digest of the AIIC. 2023. <https://data.tedo.ru/publications/ppp-digest.pdf>

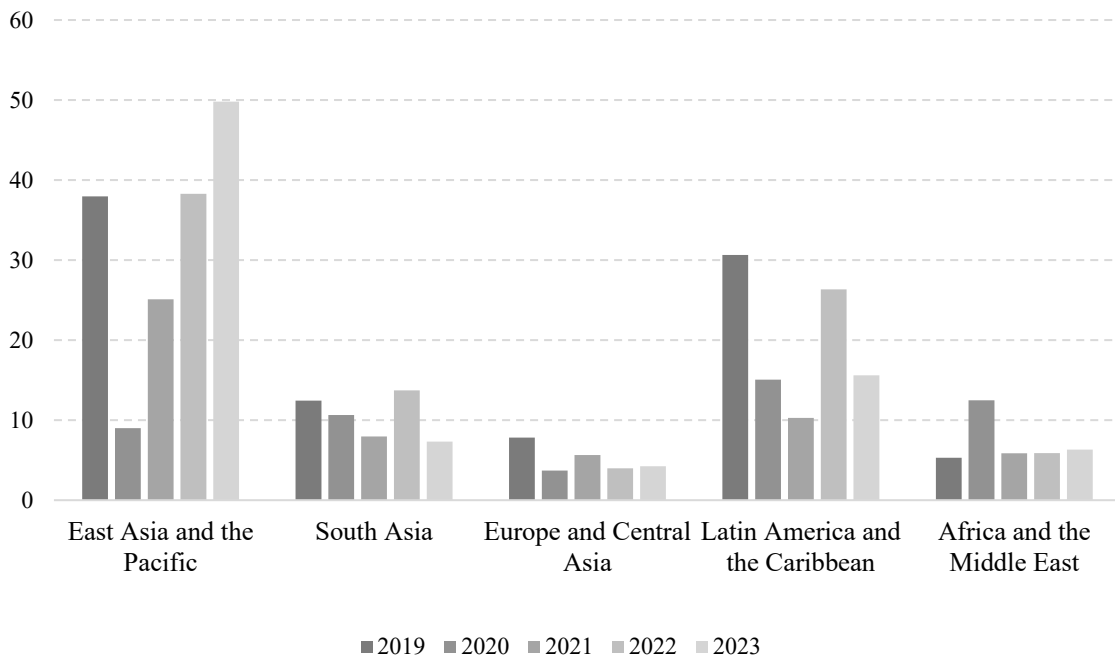


Figure 3. Dynamics of private investment in infrastructure PPP projects by region of the world, billion USD⁴

Of the presented group of countries, Russia demonstrates the lowest volumes of private investment in infrastructure PPP projects. Therefore, strategic approaches must be adopted to support and promote the development of the Russian PPP project market, Figure 4.

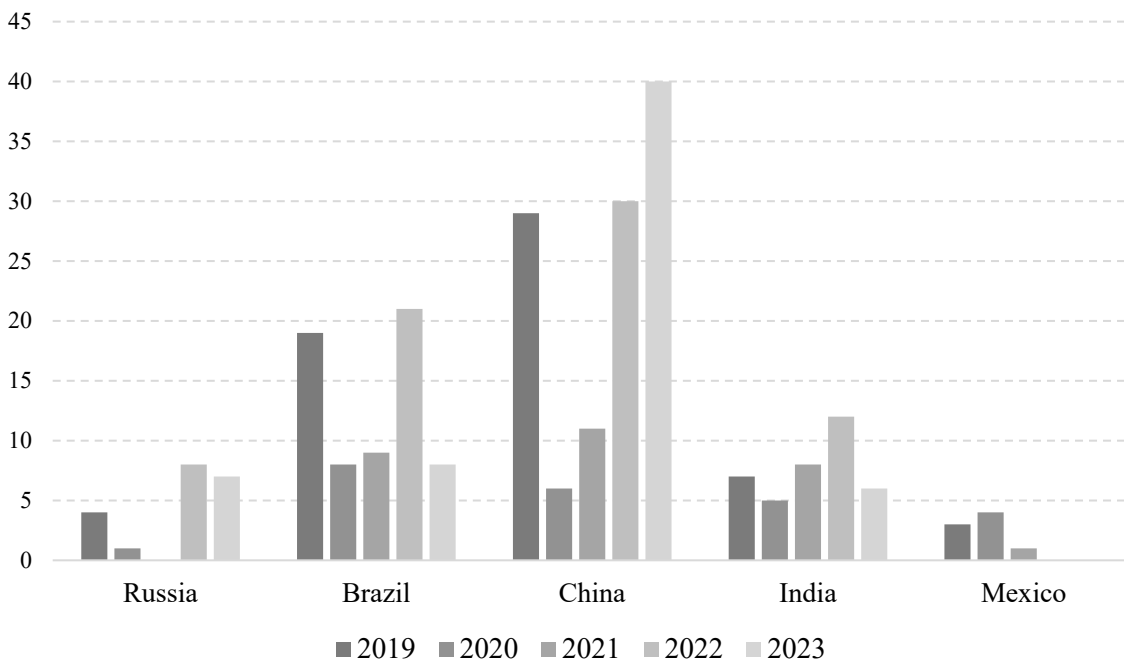


Figure 4. Dynamics of private investment in PPP infrastructure projects in developing countries, billion USD⁵

⁴ The World Bank. Infrastructure Finance, PPPs & Guarantees. <https://ppi.worldbank.org/en/customquery>.

⁵ Ibid.

Currently, public governance in Russian PPP projects is implemented through institutional support of a methodological, organizational, financial, and technological nature. One focus of state industrial policy is promoting the use of leasing, a “quasi” form of PPP. This is consistent with the findings of other studies (Drobot et al., 2021), which consider quasi-PPP forms as mechanisms for extending the potential of the partnership system to create and deploy optimal solutions for innovative modernization of national industry. To enhance regional industrial specialization and competitiveness of territorial industrial systems, it is essential to assess the effects of localization and monitor industrial progress in the region. This will help translate the concept of an effective state into actionable policies aimed at diversification of regional economies (Skhvediani et al., 2024). This concept of an effective state, now a defining feature of public-private partnerships, has evolved from the principles of New Public Management and Good Governance. State and business must combine their efforts in providing domestic manufacturers with high-tech equipment under sanctions, as demonstrated in (Kasatov, 2019), emphasizing the importance of a stable mechanism for renewing fixed assets to produce competitive industrial products. Polovyan et al. (2024) examine how trends in sanctions policy impact Russian industry, including the prospects for operation and industrial expansion in new regions, as well as factors shaping the country's industrial sovereignty..

Reviving industrial potential to spur economic growth is among the top priorities for modern Donbass. Rebuilding the industrial infrastructure and outfitting it with new equipment are critical, resource-intensive tasks for technological modernization of industry in this new region of the Russian Federation. For the Donetsk People's Republic, as for other Russian regions, economic growth and industrial progress depend on its resource base and business environment, as the key factors for recovery (Trubchanin et al., 2023, Shemiakina and Ponomarenko, 2024).

Integrating leasing into the framework of public-private partnerships leverages its advantages as a “protected” investment vehicle, a tool for technological modernization, and a means for improving production competitiveness. This facilitates the renewal of machinery, equipment, and technology, and reduces the risk of investment misuse. The benefits of leasing lie in its economic nature, which distinguishes it from other forms of financing, and the structure of lease payments, generated from revenues from the sale of products manufactured with leased equipment.

6. Conclusion

The new technological landscape for the global economy and its prospects for industrial development are reshaping the organizational and economic interactions between economic actors. In this environment, technological sovereignty and industrial policy, as organized actions of the state, in their interrelationship, ensure a country's competitive position in the global economy. The production of goods in the basic industries of the Donetsk People's Republic today determines the industrial potential of the new region, whose development prospects depend on the pace of modernization of the industrial sector and are directly linked to successfully transitioning towards a more advanced technological base to boost labor productivity.

In the context of technological sovereignty, unlocking the potential of partnerships between government and business is crucial for achieving high-quality industrial transformations. Public-private partnerships serve as a key mechanism for incorporating various elements that stimulate sustainable industrial development. Thus, the need for industrial material and technological retooling determines the organic integration of leasing into the PPP mechanism as one of its elements. Consequently, improving the scientific and methodological approach to leasing will enhance the

effectiveness of PPPs in fostering industrial growth. A unique economic mathematical model was constructed based on this approach for optimizing lease payments, combining a risk component and an interest rate subsidy, which allows the proposed method to be adapted to regions with unique economic conditions. By applying the model, governments can substantiate measures to economically stimulate leasing operations in industry by regulating the amount of the interest rate subsidy based on risk, thereby increasing their profitability for both the lessor and lessee.

Stimulating industrial development in the context of technological sovereignty for regions with specific conditions, such as Russia's newly industrialized regions, is directly linked to ensuring and providing state support for the transition to higher labor productivity based on technological advances. Therefore, further refining multilateral mechanisms for stimulating sustainable industrial development in the context of technological sovereignty based on public-private partnership principles represents a promising avenue, vital for further research.

References

- Aiginger, K., Ketels, C., 2024. Industrial policy reloaded. *Journal of Industry, Competition and Trade* 24, 7. <https://doi.org/10.1007/s10842-024-00415-8>
- Aiginger, K., Rodrik, D., 2020. Rebirth of Industrial Policy and an agenda for the twenty-First Century. *Journal of Industry Competition and Trade* 20 (2), 189–207. <https://doi.org/10.1007/s10842-019-00322-3>
- Beliakov, G., Ryzhaya, A., Shpak, A., Belyakov S., 2019. Organizational and economic mechanisms of state management of technological development of industrial companies. *Journal of Physics: Conference Series* 1399, 033084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/3/033084>
- Byvshev, V., Parfent'eva, K., Uskov, D., Panteleeva, I.A., 2020. Regional Institutions to Support Science and Innovation: Mechanisms to Improve the Efficiency of Their Operation. *Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences* 15(4), 559–579. <https://doi.org/10.17516/1997-1370-0706>
- Crespi F., Caravella S., Menghini M., Salvator, C., 2021. European Technological Sovereignty: An Emerging Framework for Policy Strategy. *Intereconomics* 56 (6), 348–354 <https://doi.org/10.1007/s10272-021-1013-6>
- Drobot, Ye. V., Makarov, I.N., Kolesnikov, V.V., Nazarenko, V.S., Nekrasova, Ye.A., Shirokova O.V., 2021. Public-private partnership and quasi-partner forms in the innovative development of national industry: institutional analysis. *Russian Journal of Innovation Economics* 11 (3), 1135–1150. <https://doi.org/10.18334/vinec.11.3.113479>
- Edler, J., Blind, K. Kroll, H., Schubert T., 2023. Technology sovereignty as an emerging frame for innovation policy. Defining rationales, ends and means. *Research Policy* 52 (6), 104765. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104765>
- Ehab, A., Saleh, K., Zakaria, M., Monier, A. 2025. Assessing Risk Factors in Infrastructure Public-Private Partnerships. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01947-7>
- Gareev, T.R., 2023. Technological sovereignty: From conceptual contradiction to practical implementation. *Terra Economicus* 21 (4), 38–54. <https://doi.org/10.18522/2073-6606-2023-21-4-38-54>
- Gereffi, G., Pananond, P., Tell, F. Fang, T., 2025. Navigating industrial policy and global value chains in an era of disruptions. *Journal of International Business Policy* 8, 207–223. <https://doi.org/10.1057/s42214-025-00223-9>
- Heinrich, C., Knill, C., Steinebach, Y., 2025. Analyzing industrial policy portfolios. *Policy Sciences* 58, 87–109. <https://doi.org/10.1007/s11077-024-09559-0>
- Kamolov, S., Lapshina, P., Alexeev, D., 2022. The System of Governance of Scientific and Technological Development in the Russian Federation. *International Journal of Technology* 13 (7), 1383–1392. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i7.6201>
- Kapoguzov, E.A., Sheresheva, M.Y., 2024. From import substitution to technological sovereignty: Related discourse and a narrative approach perspective. *Terra Economicus* 22 (3), 128–142. <https://doi.org/10.18522/2073-6606-2024-22-3-128-142>
- Kasatov, A., 2019. Public-Private Partnership in the Implementation of the Industrial Policy of Russia. *SHS Web of Conferences* 71, 02005. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20197102005>
- Kawther, M., Zhang, Z., Abdelkhalek, M., Ahmed, O., Anbar, D., Hemdan, W., 2025. Risk Management and Strategies to Alleviate Risks of Public–Private Partnership (PPP) in Conflict-torn Palestine. *Journal of the Knowledge Economy* 16 (2), 7112–7139. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13132-024-02103-8>
- Korovin, G.B., 2021. Efficiency of Government Support for the Manufacturing Sector in Russian Industrial Regions. *Ekonomika regiona [Economy of regions]* 17 (4), 1256–1269. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-15>
- March, C., Schieferdecker, I., 2021. Technological Sovereignty as Ability, Not Autarky. CESifo Working Papers 9139. Center for Economic Studies and Ifo Institute (CESifo), Munich. https://www.econstor.eu/bitstream/10419/236681/1/cesifo1_wp9139.pdf
- Polovyan, A., Lepa, R., Grinevskaia, S., 2024. Industrial Sovereignty and Development of New Regions in Russia. *Studies on Russian Economic Development* 35 (2), 199–207. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1075700724020138>
- Shemiakina, N.V., Ponomarenko, A.A., 2024. Specifics of Regional Innovative Development of the DPR Industry in the Context of Russia's Technological Sovereignty. *Regional and Sectoral Economics* 12 (150). DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.37>
- Shkodinsky, S.V., Prodchenko, I.A., Matyukhin, V.N., 2024. The contours of Russia's modern industrial policy in ensuring the country's technological sovereignty. *The Eurasian Scientific Journal* 16 (1), 07ECVN124. <https://esj.today/PDF/07ECVN124.pdf>
- Shmyrev, V.I., Osadchii, M.S., 2001. The problem of optimizing leasing payments. *Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki* 4 (2), 205–211.
- Shmyrev, V.I., Safronova, I.A., 2004. A new method for the problem of optimizing leasing payments. *Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki* 7 (4), 148–162.

- Skhvediani, A., Sosnovskikh, S., Kudryavtseva, T., Nalwanga, S., 2024. Modelling of a regional industry specialisation: the impact of agglomeration economies on labour productivity. *International Journal of Trade and Global Markets* 19 (3/4), 215–242. <https://doi.org/10.1504/IJTG.2024.138992>
- Smorodinskaya, N., Katukov, D., 2024. Moving towards technological sovereignty: a new global trend and the Russian specifics, *Baltic Region* 16 (3), 108–135. <https://doi.org/10.5922/2079-8555-2024-3-6>
- Son, P., Duong, L., 2024. Analyzing Trends and Emerging Issues in Public-Private Partnership (PPP) Projects in Construction: A Bibliometric Study. *Operations Research Forum* 5 (67). <https://doi.org/10.1007/s43069-024-00349-1>
- Trubchanin V.V., Shemiakina, N.V., Ponomarenko A.A., 2023. Prospects for Public-Private Partnerships in Assuring the Industrial Development of the Donetsk People's Republic. *Management Accounting* 5, 72–86. <https://doi.org/10.25806/uu5202372-86>

Список литературы

- Aiginger, K., Ketels, C., 2024. Industrial policy reloaded. *Journal of Industry, Competition and Trade* 24, 7. <https://doi.org/10.1007/s10842-024-00415-8>
- Aiginger, K., Rodrik, D., 2020. Rebirth of Industrial Policy and an agenda for the twenty-First Century. *Journal of Industry Competition and Trade* 20 (2), 189–207. <https://doi.org/10.1007/s10842-019-00322-3>
- Beliakov, G., Ryzhaya, A., Shpak, A., Belyakov S., 2019. Organizational and economic mechanisms of state management of technological development of industrial companies. *Journal of Physics: Conference Series* 1399, 033084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/3/033084>
- Byvshev, V., Parfent'eva, K., Uskov, D., Panteleeva, I.A., 2020. Regional Institutions to Support Science and Innovation: Mechanisms to Improve the Efficiency of Their Operation. *Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences* 15(4), 559–579. <https://doi.org/10.17516/1997-1370-0706>
- Crespi F., Caravella S., Menghini M., Salvator, C., 2021. European Technological Sovereignty: An Emerging Framework for Policy Strategy. *Intereconomics* 56 (6), 348–354 <https://doi.org/10.1007/s10272-021-1013-6>
- Edler, J., Blind, K. Kroll, H., Schubert T., 2023. Technology sovereignty as an emerging frame for innovation policy. Defining rationales, ends and means. *Research Policy* 52 (6), 104765. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104765>
- Ehab, A., Saleh, K., Zakaria, M., Monier, A. 2025. Assessing Risk Factors in Infrastructure Public-Private Partnerships. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01947-7>
- Gereffi, G., Pananond, P., Tell, F. Fang, T., 2025. Navigating industrial policy and global value chains in an era of disruptions. *Journal of International Business Policy* 8, 207–223. <https://doi.org/10.1057/s42214-025-00223-9>
- Heinrich, C., Knill, C., Steinebach, Y., 2025. Analyzing industrial policy portfolios. *Policy Sciences* 58, 87–109. <https://doi.org/10.1007/s11077-024-09559-0>
- Kamolov, S., Lapshina, P., Alexeev, D., 2022. The System of Governance of Scientific and Technological Development in the Russian Federation. *International Journal of Technology* 13 (7), 1383–1392. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i7.6201>
- Kasatov, A., 2019. Public-Private Partnership in the Implementation of the Industrial Policy of Russia. *SHS Web of Conferences* 71, 02005. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20197102005>
- Kawther, M., Zhang, Z., Abdelkhalek, M., Ahmed, O., Anbar, D., Hemdan, W., 2025. Risk Management and Strategies to Alleviate Risks of Public-Private Partnership (PPP) in Conflict-torn Palestine. *Journal of the Knowledge Economy* 16 (2), 7112–7139. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13132-024-02103-8>
- March, C., Schieferdecker, I., 2021. Technological Sovereignty as Ability, Not Autarky. CESifo Working Papers 9139. Center for Economic Studies and Ifo Institute (CESifo), Munic. https://www.econstor.eu/bitstream/10419/236681/1/cesifo1_wp9139.pdf
- Polovyan, A., Lepa, R., Grinevskaia, S., 2024. Industrial Sovereignty and Development of New Regions in Russia. *Studies on Russian Economic Development* 35 (2), 199–207. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1075700724020138>
- Skhvediani, A., Sosnovskikh, S., Kudryavtseva, T., Nalwanga, S., 2024. Modelling of a regional industry specialisation: the impact of agglomeration economies on labour productivity. *International Journal of Trade and Global Markets* 19 (3/4), 215–242. <https://doi.org/10.1504/IJTG.2024.138992>
- Smorodinskaya, N., Katukov, D., 2024. Moving towards technological sovereignty: a new global trend and the Russian specifics, *Baltic Region* 16 (3), 108–135. <https://doi.org/10.5922/2079-8555-2024-3-6>
- Son, P., Duong, L., 2024. Analyzing Trends and Emerging Issues in Public-Private Partnership (PPP) Projects in Construction: A Bibliometric Study. *Operations Research Forum* 5 (67). <https://doi.org/10.1007/s43069-024-00349-1>
- Гареев Т.Р. Технологический суверенитет: от концептуальных противоречий к практической реализации // *Terra Economicus*. 2023. Т. 21. № 4. С. 38–54. <https://doi.org/10.18522/2073-6606-2023-21-4-38-54>
- Дробот Е.В., Макаров И.Н., Колесников В.В., Назаренко В.С., Некрасова Е.А., Широкова О.В. Государственно-частное партнерство и квазипартнерские формы в инновационном развитии национальной промышленности: институциональный анализ // *Вопросы инновационной экономики*. 2021. Т. 11. № 3. С. 1135–1150. <https://doi.org/10.18334/vinec.11.3.113479>
- Капогузов Е.А., Шерешева М.Ю. От импортозамещения к технологическому суверенитету: содержание дискурса и возможности нарративного анализа // *Terra Economicus* 2024. Т. 22. № 3. С. 128–142. <https://doi.org/10.18522/2073-6606-2024-22-3-128-142>
- Коровин Г.Б. Результативность государственной поддержки обрабатывающей промышленности в индустриальных регионах РФ // *Экономика региона*. 2021. Т. 17. № 4. С. 1256–1269. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-15>
- Трубчанин В.В., Шемякина Н.В., Пономаренко А.А. Перспективы государственно-частного партнерства в обеспечении промышленного развития Донецкой Народной Республики // *Управленческий учет*. 2023. № 5. С. 72–86. <https://doi.org/10.25806/uu5202372-86>
- Шемякина Н.В., Пономаренко А.А., Особенности регионального инновационного развития промышленности ДНР в контексте технологического суверенитета РФ // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. № 12 (150). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.37>
- Шкодинский С.В., Продченко И.А., Матюхин В.Н. Контуры современной промышленной политики России в обеспечении технологического суверенитета страны // *Вестник евразийской науки*. 2024. Т. 16. № 1. Ст. № 07ECVN124.
- Шмырёв В.И., Осадчий М.С. Задача оптимизации лизинговых платежей // *Сибирский журнал индустриальной математики*. 2001. Т. 4. № 2. С. 205–211.

Шмырёв В.И., Сафронова, И.А. Новый метод для задачи оптимизации лизинговых платежей // Сибирский журнал индустриальной математики. 2004. Т. 7. № 4. С. 148–162.

The article was submitted 10.07.2025, approved after reviewing 20.07.2025, accepted for publication 27.07.2025.

Статья поступила в редакцию 10.07.2025, одобрена после рецензирования 20.07.2025, принята к публикации 04.07.2025.

About the authors:

1. Alla Ponomarenko, senior researcher, Economic Research Institute, Donetsk, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-0960-6925>, ponomarenkoalla@mail.ru
2. Natalia Shemiakina, Deputy Director for Science, Economic Research Institute, Donetsk, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-4132-3896>, nshemiakina@mail.ru

Информация об авторах:

1. Алла Пономаренко, канд. экон. наук, без звания, старший научный сотрудник, ГБУ "Институт экономических исследований", Донецк, Россия. <https://orcid.org/0000-0003-0960-6925>, ponomarenkoalla@mail.ru
2. Наталья Шемякина, канд. экон. наук, доц., заместитель директора по научной работе, ГБУ "Институт экономических исследований", Донецк, Россия. <https://orcid.org/0000-0003-4132-3896>, nshemiakina@mail.ru