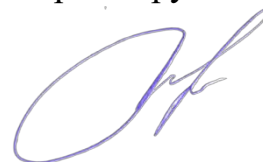


На правах рукописи



Мишкуров Павел Николаевич

**МЕТОДОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ  
ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

2.9.9. Логистические транспортные системы  
(технические науки)

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени

доктора технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный консультант: доктор технических наук, доцент  
**Рахмангулов Александр Нельевич.**

Официальные оппоненты: **Новичихин Алексей Викторович**,  
доктор технических наук, доцент,  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I»,  
кафедра «Логистика и коммерческая работа»,  
заведующий кафедрой;  
**Зубков Виктор Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Ростовский государственный университет  
путей сообщения», кафедра «Управление  
эксплуатационной работой», профессор;  
**Колокольников Виталий Сергеевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский государственный университет путей  
сообщения», кафедра «Управление  
эксплуатационной работой», профессор.  
Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский государственный  
университет путей сообщения».**

Защита состоится «18» июня 2026 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.06 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, аудитория 1112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ):  
[www.mii.ru](http://www.mii.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Кузьмин Дмитрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Промышленные предприятия являются элементами логистических транспортных систем, в которых начинаются и закачиваются порядка 80% грузопотоков, перевозимых автомобильным и железнодорожным транспортом. Основной тенденцией рынка перевозок является стремление грузоотправителей и грузополучателей к сокращению своих транспортно-складских затрат в результате уменьшения размера транспортной партии, что является причиной усложнения структуры входящих и исходящих грузопотоков на промышленных предприятиях. Структура таких грузопотоков на 75–85% состоит из струй малой мощности. Грузопотоки сложной структуры распределяются по сложной системе транспортного обслуживания промышленного предприятия, которая характеризуется множеством клиентов промышленного транспорта.

Для обеспечения качества транспортного обслуживания промышленного предприятия структура управления грузопотоками разделена на локальные элементы в соответствии с функциями воздействия на грузопотоки. Например, на путях необщего пользования крупных промышленных предприятий структура систем управления грузопотоками разделена на уровни – железнодорожные станции, районы и узел. Сложность систем управления грузопотоками усиливается в результате частых изменений эксплуатационной обстановки на промышленном транспорте, связанной с изменениями объемов сырья, отходов производства, материалов, полуфабрикатов и готовой продукции, а также структуры грузопотоков. Кроме того, каждый участник процесса управления грузопотоками по-разному оценивает интенсивность и силу воздействия факторов внешней и внутренней среды на принимаемые ими решения. Результатом несогласованных действий оперативных руководителей производством и промышленным транспортом наряду с необходимостью соблюдения интересов собственников подвижного состава, руководства транспорта общего пользования и владельцев инфраструктуры являются потенциальные логистические потери.

Отмеченные условия являются объективной причиной повышения требований к уровню согласованности принимаемых решений по управлению

грузопотоками, с одной стороны, и требований к качеству транспортного обслуживания промышленных предприятий – с другой.

Для повышения качества транспортного обслуживания промышленных предприятий становятся актуальными задачи управления непрерывными грузопотоками с момента их поступления до момента вывода из системы, что обуславливает необходимость рассмотрения таких систем как транспортно-логистических. Однако существующие подходы к развитию транспортно-логистических систем промышленных предприятий не учитывают как многокритериальный аспект управления непрерывными грузопотоками, так и возможность принятия согласованных решений на различных уровнях управления такими грузопотоками. Кроме того, увеличивается сложность задач оптимального управления непрерывными грузопотоками по мере увеличения самих транспортно-логистических систем промышленных предприятий. Сложность задач оптимального управления непрерывными грузопотоками обусловлена наличием сложных пространственно-временных зависимостей транспортно-логистических процессов, которые сопровождаются множеством вариантов использования транспортной инфраструктуры (пространство) и моментов времени начала и окончания технологических операций (время).

В связи с этим совершенствование методологии развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий на основе пространственно-временной оптимизации является актуальной научно-практической проблемой.

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в решение основных проблем развития транспортно-логистических систем внесли труды А. Е. Авербуха, В. М. Акулиничева, В. И. Апатцева, В. В. Багиновой, И. П. Владимирской, Т. П. Воскресенской, Е. П. Дудкина, Ю. И. Ефименко, В. А. Кудрявцева, П. А. Козлова, Б. А. Лёвина, А. В. Новичихина, В. Н. Образцова, С. М. Резера, В. М. Сая, С. В. Трофимова, А. К. Угрюмова, Н. С. Ускова, D. R. Fulkerson, R. L. Ford, G. W. Wilson и многих других учёных.

Научный вклад в область транспортной логистики внесли работы Г. В. Бубновой, А. М. Гаджинского, В. Д. Герами, В. В. Дыбской, П. В. Куренкова, О. Н. Ларина, Л. Б. Миротина, Н. А. Осинцева, С. Da Silva, G. Guillen-Gosalbez, K. Govindan, S. Validi и многих других учёных.

Научной основой решения проблем в области моделирования транспортно-логистических систем и процессов являются исследования А. Э. Александрова, А. Ф. Бородина, П. А. Козлова, В. С. Колокольников, С. Н. Корнилова, Э. А. Мамаева, О. Б. Маликова, О. В. Москвичёва, О. В. Осокина, А. Т. Осьминина, В. А. Персианова, М. Б. Петрова, О. Д. Покровской, А. Н. Рахмангулова, Н. Ф. Сириной, А. В. Сладковского, Е. А. Сотникова, И. Б. Сотникова, Н. А. Тушина, Е. Н. Тимухиной, О. Н. Числова, М. И. Шмулевича, A. D'Ariano, M. Carey, B. C. Deen, M. J. Dorfman, S. E. Dreyfus, J. W. Eising, L. Gély, M. Montigel, W. D. V'olz и многих других учёных.

Анализ трудов отечественных и зарубежных учёных показал, что в совокупности эти работы представляют собой научную базу современных методов анализа, прогнозирования и оптимизации транспортно-логистических систем, а также подходов к их развитию на основе цифровизации и интеллектуализации транспортно-логистических процессов. Возрастает актуальность рассмотрения систем транспортного обслуживания промышленных предприятий как транспортно-логистических систем и использования методов пространственно-временной оптимизации для повышения оперативности и согласованности решений по управлению непрерывными грузопотоками с момента их поступления до момента вывода с промышленных предприятий. Однако недостаточно сформированы научно-технические решения по управлению развитием транспортно-логистических систем промышленных предприятий для обеспечения согласованного оптимального управления потоковыми процессами в условиях противоречивости целей участников процесса управления грузопотоками и усложнения их структуры в этих системах.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационного исследования является разработка методологии развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий на основе использования методов пространственно-временной оптимизации, обеспечивающих согласованное управление потоковыми процессами.

Задачи диссертационного исследования:

1. Выполнить анализ научного, методологического и практического опыта

развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий.

2. Разработать концепцию развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий на основе пространственно-временной оптимизации.

3. Выделить стейкхолдеров и определить критерии эффективности транспортно-логистических процессов промышленных предприятий.

4. Разработать модель организационного обеспечения этапного развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий на основе интеллектуализации и цифровизации транспортно-логистических процессов.

5. Выполнить систематизацию методов пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических систем.

6. Разработать комбинированный метод пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий.

7. Разработать способ синхронизации состояния транспортно-логистических процессов промышленных предприятий и результатов пространственно-временной оптимизации этих процессов.

8. Разработать синхронную имитационную модель управления элементами транспортно-логистической системы промышленного предприятия.

9. Разработать методику развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий на основе этапной реализации комбинированного метода пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов.

10. Выполнить оценку эффективности разработанных методов и методик для условий функционирования металлургических и горнодобывающих предприятий.

**Научная новизна исследования** состоит в разработанной методологии развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий на основе комбинирования методов пространственно-временной оптимизации, а именно:

1. Разработана концепция этапного развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий и совершенствования их управленческих

структур в условиях многокритериальности и многовариантности управления потоковыми процессами на основе комбинирования методов пространственно-временной оптимизации.

2. Создана модель организационного обеспечения этапного развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий путём интеллектуализации и цифровизации транспортно-логистических процессов.

3. Разработан комбинированный метод пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов, заключающийся в объединении многокритериальной динамической оптимизации временного графа, описывающего технологию организации потоковых процессов, с оптимизацией маршрутов грузопотоков на пространственном графе нового типа – двухвершинном графе с отдельными биективными вершинами и рёбрами.

4. Предложен способ синхронизации фактического состояния транспортно-логистических процессов промышленных предприятий и результатов пространственно-временной оптимизации этих процессов, базирующийся на комбинации графовых нейронных сетей, имитационного моделирования и систем идентификации подвижного состава.

5. Разработана синхронная имитационная модель управления элементами транспортно-логистической системы промышленного предприятия.

6. Разработана методика этапного развития управленческой структуры транспортно-логистических систем промышленных предприятий путём циклической реализации согласованных решений по уровням управления непрерывными грузопотоками и формирования единого диспетчерского центра.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость заключается в разработке методологии развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий в условиях противоречивости целей участников процесса управления непрерывными грузопотоками, которая включает в себя концепцию и модель организационного обеспечения этапного развития, комбинированный метод пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов, а также методику их реализации, обеспечивающих повышение качества транспортного обслуживания промышленных предприятий.

Практическая значимость диссертации состоит в:

- повышении качества оперативных решений по управлению потоковыми процессами на основе использования синхронных имитационных моделей управления элементами транспортно-логистических систем промышленных предприятий;
- формировании эффективной стратегии развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий в области интеллектуализации и цифровизации транспортно-логистических процессов;
- расширении функций информационных систем управления элементами транспортно-логистических систем промышленных предприятий на основе реализации согласованного управления непрерывными грузопотоками в режиме реального времени в единых диспетчерских центрах.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач в исследовании использовались: структурно-функциональный и системный анализ; методы математической статистики, теории графов, адаптивного и интеллектуального управления, математического и имитационного моделирования, динамического программирования; многокритериальный анализ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Теоретико-методологические основы развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий на основе пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов.
2. Модель организационного обеспечения этапного развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий как элемент повышения согласованности уровней управления непрерывными грузопотоками путём многокритериальной оценки пространственно-временного графа управленческих решений по интеллектуализации и цифровизации транспортно-логистических процессов.
3. Комбинированный метод пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов для согласованного управления потоковыми процессами в режиме реального времени.
4. Комбинирование графовых нейронных сетей, имитационного моделирования и систем идентификации подвижного состава для



синхронизации фактического состояния транспортно-логистических процессов промышленных предприятий и результатов пространственно-временной оптимизации этих процессов.

5. Синхронная имитационная модель управления элементами транспортно-логистической системы промышленного предприятия.

6. Методические основы развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий для обеспечения процесса принятия оптимальных решений по согласованному управлению непрерывными грузопотоками в единых диспетчерских центрах путём последовательной реализации комбинированного метода пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов.

**Степень достоверности и апробация результатов исследования.** Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются представительным объёмом статистической информации, экспериментальных и расчётных данных; согласованностью данных, полученных различными методами исследования; результатами обсуждения материалов исследования на научно-технических и практических конференциях; положительными результатами применения основных научно-методических положений диссертации.

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении научно-исследовательских работ по заказу ПАО «Ураласбест», АО «Выксунский металлургический завод», АО «Уральская Сталь», АО «Магнитогорский Гипромез», ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Исследования, выполненные автором, поддержаны грантами Российского научного фонда. Результаты диссертации в части разработки комбинированного метода и алгоритма пространственно-временной оптимизации, имитационного метода обучения графовых нейронных сетей, формирования пространственно-временного графа транспортно-логистических процессов, графовых нейронных сетей и синхронных имитационных моделей управления элементами транспортно-логистических систем промышленных предприятий использованы при выполнении гранта Российского научного фонда (Проект №23-11-00164).

Комбинирование методов многокритериального анализа, методов динамической оптимизации и имитационного моделирования использовалось при выполнении гранта Российского научного фонда (Проект №23-21-10038).

Теоретические и практические результаты диссертации внедрены в образовательный процесс кафедры «Логистика и управление транспортными системами» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» и используются при подготовке бакалавров по направлению 38.03.02 «Менеджмент (Логистика)», инженеров путей сообщения по специальности 23.05.42 «Эксплуатация железных дорог (Промышленный транспорт)», при чтении дисциплин «Организация, планирование и управление в логистике», «Имитационное моделирование транспортных систем», «Информационные системы в логистике», «Цифровые технологии на транспорте», «Информационные технологии на транспорте», «Системный анализ в логистике», «Методы принятия управленческих решений», «Математическое моделирование транспортных систем и процессов».

Основные положения и научные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, 2019-2025 гг.); международная научно-техническая конференция «Промышленное производство и металлургия» (УрФУ, Нижний Тагил, 2021 г.), международная научная конференция «Transport And Logistics» (Нишский университет, г. Ниш, Сербия, 2021 г.), международная научно-практическая конференция «Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки» (РУТ (МИИТ), г. Москва, 2021 г., 2023 г., 2024 г.), III международная научно-практическая конференция «Цифровые технологии транспорта и логистики» (РУТ (МИИТ), г. Москва, 2023 г.), V международная научно-практическая конференция «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах» (ПГУПС, г. Санкт-Петербург, 2023 г.), всероссийская научно-практическая конференция «Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление» (УрГУПС, г. Екатеринбург, 2023 г.), международная научно-практическая конференция «Железнодорожный транспорт и

технологии» (УрГУПС, г. Екатеринбург, 2023 г.), международная научно-практическая конференция «Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта» (УрГУПС, г. Екатеринбург, 2024 г.), Третья международная научно-техническая конференция «Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы» (Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Узбекистан, 2024 г.), международная научно-практическая конференция «Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте» (ЛГТУ, г. Липецк, 2024 г.); всероссийская научно-практическая конференция «Железнодорожный транспорт и технологии» (УрГУПС, г. Екатеринбург, 2024 г., 2025 г.), II международная научно-практическая конференция «Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2024)» (ПГУПС, г. Санкт-Петербург, 2024 г.), XIII всероссийская научно-техническая конференция «Политранспортные системы» (СГУПС, г. Новосибирск, 2024 г.).

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 6 разделов, заключения, списка использованной литературы из 521 источника, 7 приложений; изложена на 369 страницах машинописного текста, содержит 131 рисунок, 16 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определены проблемы, цели, задачи исследования.

**В первом разделе** «Теория и практика функционирования транспортно-логистических систем промышленных предприятий» выполнен анализ современного состояния систем транспортного обслуживания промышленных предприятий и определены тенденции повышения эффективности их функционирования, выполнен обзор исследований и выявлены проблемы развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий.

Системы транспортного обслуживания промышленных предприятий характеризуются множеством объектов управления и клиентов промышленного транспорта. Например, на крупных промышленных предприятиях общая протяженность железнодорожных путей может достигать 800 км, парк локомотивов

составляет более 100 ед., свыше 800 грузовых фронтов производства и контрагентов, суточный вагонооборот более 5000 вагонов. Структура поступающих грузопотоков на промышленные предприятия на 75–85% состоит из струй малой мощности, которые распределяются по сложной системе транспортного обслуживания промышленного предприятия. Необходимым условием обеспечения качества транспортного обслуживания промышленного предприятия является разделение функций управления грузопотоками на локальные элементы и уровни. Например, на железнодорожном транспорте необщего пользования крупного металлургического комбината структура системы управления грузопотоками разделена на 40 железнодорожных станций и 10 районов, объединённых в железнодорожный транспортный узел.

Сложность систем управления грузопотоками на промышленном транспорте усиливается по причине частых изменений состояния объектов управления. Наблюдается неравномерность внешних и внутренних грузопотоков (рисунок 1) наряду с высокой динамикой использования локомотивов (от 2 до 48%), интенсивностью использования транспортной инфраструктуры, увеличением количества технологических операций с вагонами до 50% по причине изменений требований к структуре грузопотоков со стороны производства, собственников подвижного состава, владельцев инфраструктуры и транспорта общего пользования.

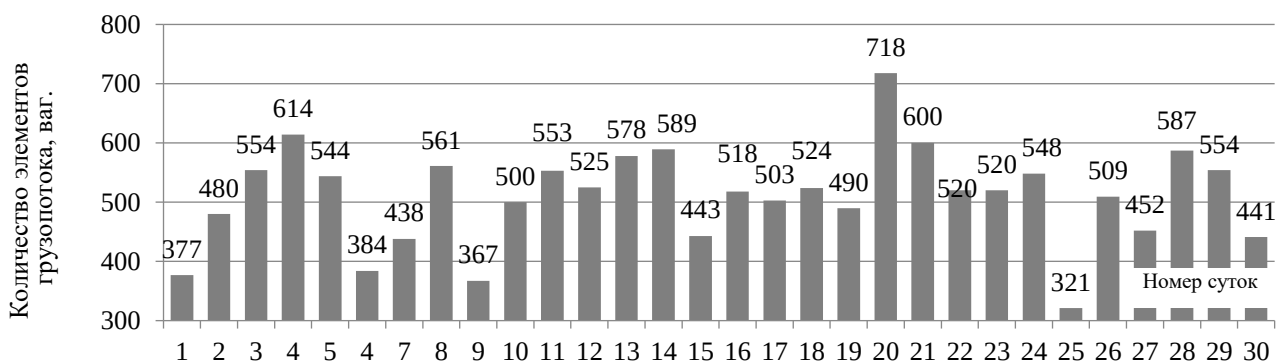


Рисунок 1 – Динамика количества элементов входящего грузопотока на промышленное предприятие (на примере горнодобывающего комбината)

В отмеченных условиях каждый участник процесса управления

грузопотоками по-разному оценивает интенсивность и силу воздействия на грузопотоки факторов внешней и внутренней среды, кроме того, оперативным руководителям промышленного транспорта становится труднее принимать эффективные управленческие решения с учётом соблюдения интересов собственников подвижного состава, руководства транспорта общего пользования и владельцев инфраструктуры. Принятие неоптимальных решений по оперативному управлению грузопотоками приводит к логистическим потерям промышленных предприятий в результате возникновения простоев технологических агрегатов, увеличения суммарных транспортно-складских затрат и сверхнормативного времени оборота подвижного состава. Поэтому система транспортного обслуживания промышленного предприятия сталкивается с ограничениями в повышении своей эффективности, связанными с недостаточной согласованностью уровней системы управления грузопотоками.

Согласно транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года одним из направлений повышения эффективности транспортных систем является цифровая трансформация и совершенствование информационно-аналитических систем транспорта на основе внедрения новых интеллектуальных и цифровых технологий. Развитие цифровых и интеллектуальных технологий в настоящее время ориентировано на максимальную автоматизацию процессов принятия управленческих решений и снижение влияния человеческого фактора с переходом оператора к роли наблюдателя. Однако отсутствие единых подходов и стандартов к реализации цифровых и интеллектуальных технологий на промышленном транспорте создаёт сложности для их практической реализации.

Таким образом, системы транспортного обслуживания промышленных предприятий функционируют в сложных условиях, связанных с необходимостью соблюдения противоречивых требований со стороны участников процесса управления грузопотоками – производства, собственников подвижного состава, руководства транспорта общего пользования, а также владельцев инфраструктуры наряду со множеством объектов управления и

частыми изменениями их состояния, с одной стороны, и ограничений использования цифровых и интеллектуальных технологий – с другой. В таких условиях промышленный транспорт оказывается барьером, ограничивающим эффективность взаимодействия производства и транспорта.

Возрастает актуальность системного рассмотрения проблемы повышения качества транспортного обслуживания промышленных предприятий в условиях дезорганизующего воздействия факторов внешней и внутренней среды. Разрабатываются новые подходы к комбинированию методов анализа, прогнозирования и оптимизации транспортных систем и их использования при выработке оптимальных решений по управлению грузопотоками и оперативной оценке множества стохастических факторов. Результаты анализа научных исследований позволили сделать следующие основные выводы:

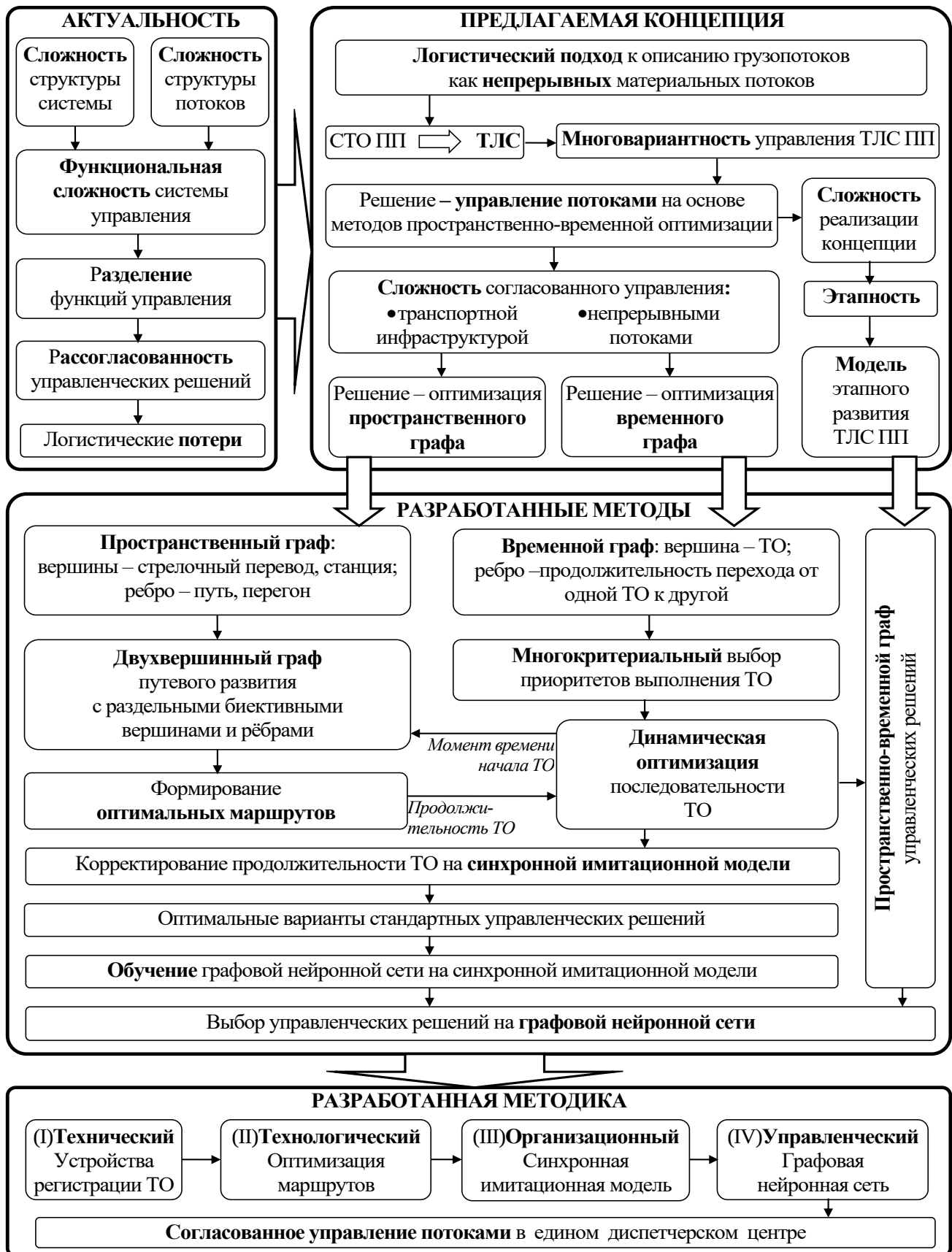
- развиваются подходы к повышению адаптивности использования методов прогнозирования и оптимизации параметров грузопотоков в режиме реального времени;
- разрабатываются подходы к формированию систем интеллектуального сопровождения транспортных процессов и автоматизации процесса выработки решений по согласованной работе транспорта и производства;
- совершенствуются способы цифровизации технологии переработки грузопотоков на основе использования высокодетализированных имитационных моделей и цифрового описания логистической инфраструктуры;
- разрабатываются новые модели принятия решений по повышению эффективности функционирования транспортных систем на основе комбинирования методов оптимизации и имитационного моделирования;
- совершенствуются методы формирования и использования графов для решения крупномасштабных задач оптимизации транспортных систем.

Использование указанных подходов на промышленном транспорте для повышения согласованности, оперативности и оптимальности управленческих решений по использованию инфраструктуры и изменению параметров грузопотоков сопровождается рядом проблем:

- наличие отклонений от плановых значений параметров грузопотоков при реализации систем идентификации подвижного состава и мониторинга транспортной инфраструктуры;
- недостаточная эффективность регулирования параметров грузопотоков в нестандартных ситуациях при использовании плановых значений продолжительности технологических операций и пропускной способности транспортной инфраструктуры;
- наличие множества параллельных грузопотоков при низкой точности обнаружения и оценки их взаимовлияния на всех уровнях управления грузопотоками;
- наличие несогласованных действий участников процесса оперативного управления грузопотоками.

Одним из современных направлений развития системного анализа является логистический подход, основанный на выделении общих свойств логистических потоков. Актуальность реализации логистического подхода усиливается при управлении грузопотоками с момента их поступления до момента вывода с промышленного предприятия. В диссертационной работе для повышения согласованности процессов управления грузопотоками системы транспортного обслуживания промышленных предприятий рассматриваются как транспортно-логистические системы.

Организация потоковых процессов на промышленном транспорте сопровождается сложными пространственно-временными зависимостями при оценке взаимовлияния транспортно-логистических процессов. По мере увеличения сложности транспортно-логистической системы промышленного предприятия увеличивается количество вариантов использования транспортной инфраструктуры (пространство) и моментов времени начала и окончания технологических операций (время). В связи с этим вопросы разработки методологии развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий на основе пространственно-временной оптимизации стали предметом исследования диссертации (рисунок 2).



СТО – система транспортного обслуживания; ТЛС – транспортно-логистическая система; ПП – промышленное предприятие; ТЛП – транспортно-логистический процесс; ТО – технологическая операция ТЛП; (I), (II), (III), (IV) – этапы развития ТЛС ПП

Рисунок 2 – Схема диссертационного исследования



Во втором разделе «Концепция развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий на основе пространственно-временной оптимизации» определены структура и функции транспортно-логистических систем промышленных предприятий, разработана модель организационного обеспечения их этапного развития, выделены стейкхолдеры и критерии эффективности транспортно-логистических процессов, обосновано использование методов пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов.

Транспортно-логистическая система (ТЛС) промышленного предприятия представляет собой линейно-упорядоченную совокупность логистических элементов (входного, перерабатывающего, накопительного, транспортного, выходного и управляющего) вдоль материального и сопутствующих ему других логистических потоков (финансового, информационного и потока услуг) (рисунок 3). Входным и одновременно выходным элементом являются центры фирменного транспортного обслуживания, которые взаимодействуют с грузоотправителями и грузополучателями; накопительным элементом – перегрузочные комплексы, терминалы, грузовые станции; транспортирующим элементом – инфраструктура промышленного транспорта; перерабатывающим элементом – производство как совокупность основных технологических цехов, вспомогательных и обслуживающих структурных подразделений.

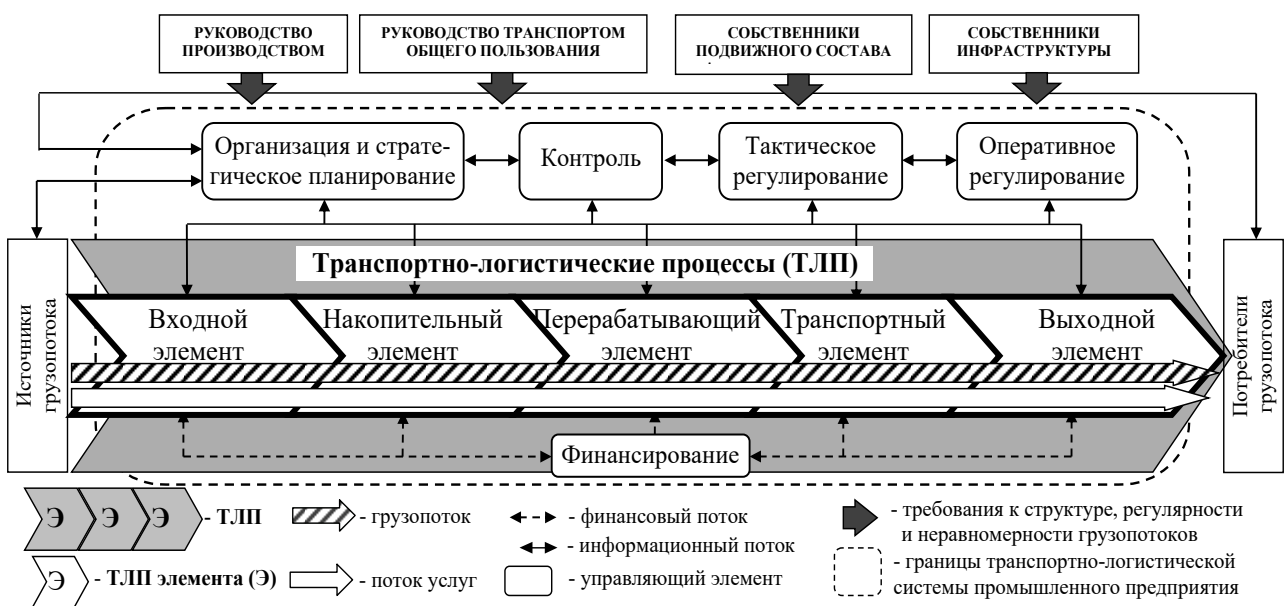


Рисунок 3 – Схема транспортно-логистической системы промышленного предприятия

В соответствии с принципом структурно-функционального анализа, элементы ТЛС, в зависимости от уровня решаемых ими задач, выполняют три типа логистических функций с целью достижения целей в плановом периоде: ключевые – функции управления ТЛС и её элементами; базисные – функции воздействия на грузопотоки – ввод и вывод грузопотоков из системы (снабжение и сбыт), качественные изменения потоков (производство), продвижение (транспортирование), накопление и замедление потоков (складирование); поддерживающие – специфические функции элементов по изменению параметров грузопотоков, в результате выполнения которых реализуются базисные функции. Организованная во времени последовательность выполнения логистических функций, позволяющая достигнуть заданные на плановый период цели ТЛС промышленного предприятия и её элементов, называется транспортно-логистическим процессом (ТЛП).

Современный этап развития ТЛС промышленных предприятий характеризуется ориентацией на оперативное управление их элементами и подсистемами для повышения согласованности участников ТЛП. Под развитием ТЛС промышленных предприятий в диссертационной работе понимается процесс согласования потоков решений на всех уровнях управления непрерывными грузопотоками. Управляющий элемент ТЛС обеспечивает согласование ТЛП на основе реализации ключевых функций управления. Управленческие решения являются способом воздействия на ТЛП, реализация которых сопровождается соблюдением противоречивых требований со стороны участников процесса управления грузопотоками. Таким образом, у ТЛС промышленного предприятия в результате её развития появляется новая функция, заключающаяся в многокритериальной оценке последствий для всей системы от принятых оперативных решений по управлению непрерывными грузопотоками.

Для определения условий достижения эффективности ТЛС промышленных предприятий проведено исследование влияния сложности и регулярности грузопотоков на ТЛП. По результатам выполненного исследования установлена пространственно-временная зависимость между сложностью, регулярностью грузопотоков, использованием транспортной инфраструктуры,

продолжительностью и порядком технологических операций ТЛП. Качество и оперативность переработки грузопотоков определяют эффективность элементов ТЛС и ТЛП. Недостаточная согласованность принимаемых решений по управлению элементами ТЛС усиливает структурную и технологическую сложность ТЛП и является причиной увеличения неравномерности (до 203 %) и нерегулярности грузопотоков (от 76 до 143 %), что отрицательно сказывается на эффективности использования транспортной инфраструктуры, а также на своевременном транспортном обслуживании производства, вводе и выводе грузопотоков из промышленного предприятия, дополнительных технологических операциях ТЛП по корректировке структуры грузопотоков. Кроме того, значительное влияние руководства производством, транспорта общего пользования, владельцев подвижного состава и инфраструктуры является причинами разделения грузопотоков на грузопотоки малой мощности. Поэтому данные участники процесса управления грузопотоками в диссертационной работе выделены как основные стейкхолдеры ТЛП, а также определены критерии эффективности ТЛП, которые отражают потенциальные логистические потери при изменении структуры грузопотоков и времени их продвижения в ТЛС промышленного предприятия.

В диссертационной работе оценку последствий для всей ТЛС промышленного предприятия от принятых оперативных решений по управлению непрерывными грузопотоками с учетом противоречивости целей стейкхолдеров предлагается осуществлять на основе решения задачи согласованного управления потоковыми процессами. Сложность задачи обусловлена увеличением её размера при увеличении сложности самой ТЛС промышленного предприятия (рисунок 4).

Вариант отдельного ТЛП зависит как от требований стейкхолдеров, так и вариантов технологии переработки грузопотоков в элементах ТЛС, маршрута, количества элементов и их местоположения в структуре грузопотока. В зависимости от выбора варианта ТЛП наблюдаются различные изменения использования транспортной инфраструктуры, времени начала и окончания выполнения технологических операций, количества элементов грузопотоков во всех элементах ТЛС промышленного предприятия.

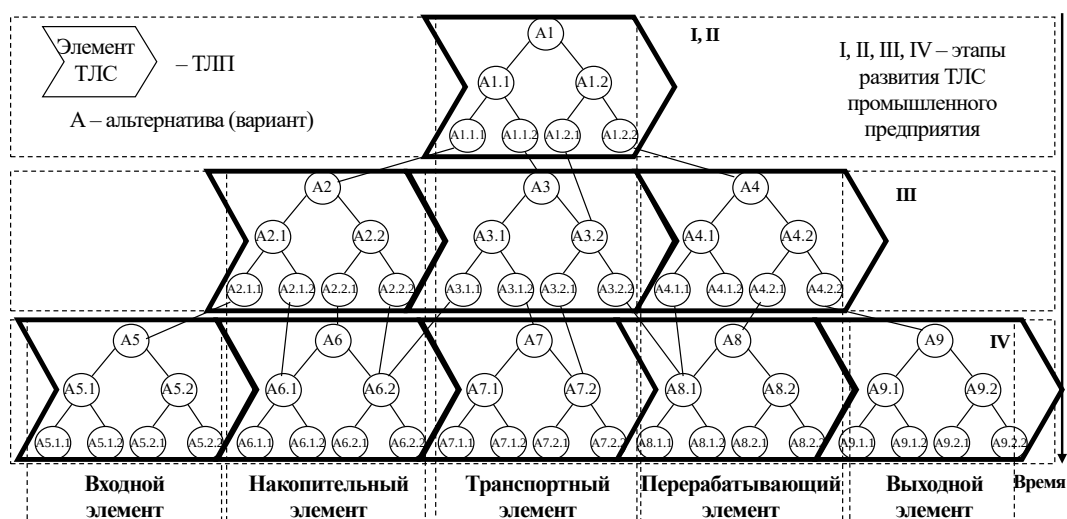


Рисунок 4 – Схема вариантов в задаче согласованного управления потоковыми процессами

Многокритериальность и многовариантность согласованного управления непрерывными грузопотоками и транспортной инфраструктурой усиливает актуальность использования более эффективных методов решения крупномасштабных задач при формировании ТЛП. Перспективным направлением решения крупномасштабных задач является использование методов пространственно-временной оптимизации. Результаты проведенного анализа исследований в области пространственно-временной оптимизации показывают использование данных методов для решения задач как управления транспортными системами в реальном времени, так и задач планирования на основе разделения оптимизируемого пространства на временные и пространственные графы. Указанный вывод определил целесообразность систематизации методов пространственно-временной оптимизации с позиции их использования при оперативном управлении ТЛС промышленных предприятий.

Применительно к сложным условиям функционирования ТЛС промышленных предприятий в диссертационном исследовании предлагается формализовать процесс управления непрерывными грузопотоками в виде временного графа, управления транспортной инфраструктурой – пространственным графом.

Использование подхода к адаптации ТЛС позволило определить проблемы и способы их решения при реализации новой функции исследуемой системы, а также выделить этапы и разработать модель организационного обеспечения этапного развития ТЛС промышленных предприятий путём поочередного решения задач интеллектуализации и цифровизации ТЛП (таблица 1).

**Таблица 1 – Структура модели организационного обеспечения этапного развития ТЛС промышленных предприятий на основе интеллектуализации и цифровизации ТЛП**

| Объект<br>повышения<br>эффективности                           | Этапы развития ТЛС и их краткие характеристики                                        |                                                            |                                                                                                                                  |                                                                             |                                                                                              |                                                                                                        |                                                                          |                                                              |              |  |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------|--|
|                                                                | (I) ТЕХНИЧЕСКИЙ                                                                       |                                                            | (II) ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ                                                                                                             |                                                                             | (III) ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ                                                                        |                                                                                                        | (IV) УПРАВЛЕНЧЕСКИЙ                                                      |                                                              |              |  |
|                                                                | Регистрация оперативных данных и их использование при корректировании параметров ТЛП  |                                                            | Обеспечение надёжного распознавания эксплуатационной обстановки и оптимизация маршрутов грузопотоков для отдельных элементов ТЛС |                                                                             | Многокритериальный анализ эксплуатационной обстановки и реализация оптимальных вариантов ТЛП |                                                                                                        | Автоматизация оперативного корректирования ТЛП во всех элементах системы |                                                              |              |  |
|                                                                | Проблема                                                                              | Решение                                                    | Проблема                                                                                                                         | Решение                                                                     | Проблема                                                                                     | Решение                                                                                                | Проблема                                                                 | Решение                                                      |              |  |
| Транспортно-логистическая система<br>промышленного предприятия | Наличие отклонений от плановых значений параметров ТЛП                                | Корректирование графиков движения грузопотоков             | Недостаточная эффективность регулирования параметров ТЛП в нестандартных ситуациях                                               | Выработка оптимальных решений в нестандартных ситуациях                     | Оценка взаимодействия ТЛП                                                                    | Формирование оптимального варианта ТЛП на основе многокритериальной оценки эксплуатационной обстановки | Наличие несогласованных действий стейкхолдеров ТЛП                       | Согласованное прогнозирование ТЛП в режиме реального времени |              |  |
|                                                                |                                                                                       | Корректирование загрузки транспортной инфраструктуры       |                                                                                                                                  |                                                                             |                                                                                              |                                                                                                        |                                                                          |                                                              |              |  |
|                                                                |                                                                                       | Корректирование структуры грузопотоков                     | Противоречивость целей участников процесса оперативного управления грузопотоками                                                 | Многокритериальный анализ критериев эффективности ТЛП                       |                                                                                              |                                                                                                        |                                                                          |                                                              |              |  |
|                                                                |                                                                                       | Корректирование графиков транспортного обслуживания        |                                                                                                                                  |                                                                             |                                                                                              |                                                                                                        |                                                                          |                                                              |              |  |
|                                                                | Наличие «чёрных ящиков» в данных о параметрах грузопотоков и занятости инфраструктуры | Регистрация данных о циклах транспортного обслуживания     | Отсутствие данных о временных зависимостях технологических операций от параметров ТЛП                                            | Анализ оперативных данных о времени выполнения технологических операций ТЛП | Низкая точность обнаружения взаимодействия ТЛП                                               | Использование пространственно-временных данных для индикаторов эксплуатационной обстановки             |                                                                          |                                                              |              |  |
|                                                                |                                                                                       | Регистрация данных о времени появления грузопотока         |                                                                                                                                  |                                                                             |                                                                                              |                                                                                                        |                                                                          |                                                              |              |  |
|                                                                |                                                                                       | Регистрация данных о местоположении элементов грузопотоков | Отсутствие данных о пространственных зависимостях пропускной способности от параметров ТЛП                                       | Анализ оперативных данных о наличной пропускной способности                 |                                                                                              |                                                                                                        |                                                                          |                                                              |              |  |
|                                                                |                                                                                       | Регистрация данных о занятости элементов инфраструктуры    |                                                                                                                                  |                                                                             |                                                                                              |                                                                                                        |                                                                          |                                                              |              |  |
|                                                                | Корректирование параметров ТЛП                                                        |                                                            | Транспортный элемент                                                                                                             |                                                                             | Транспортный, накопительный и перерабатывающий элементы                                      |                                                                                                        |                                                                          |                                                              | Все элементы |  |
|                                                                | Уровень управления непрерывными грузопотоками                                         |                                                            |                                                                                                                                  |                                                                             |                                                                                              |                                                                                                        |                                                                          |                                                              |              |  |

Алгоритм разработанной модели организационного обеспечения этапного развития основан на циклической реализации согласованных решений по уровням управления непрерывными грузопотоками путём интеллектуализации и цифровизации ТЛП в элементах ТЛС промышленных предприятий (рисунок 5).

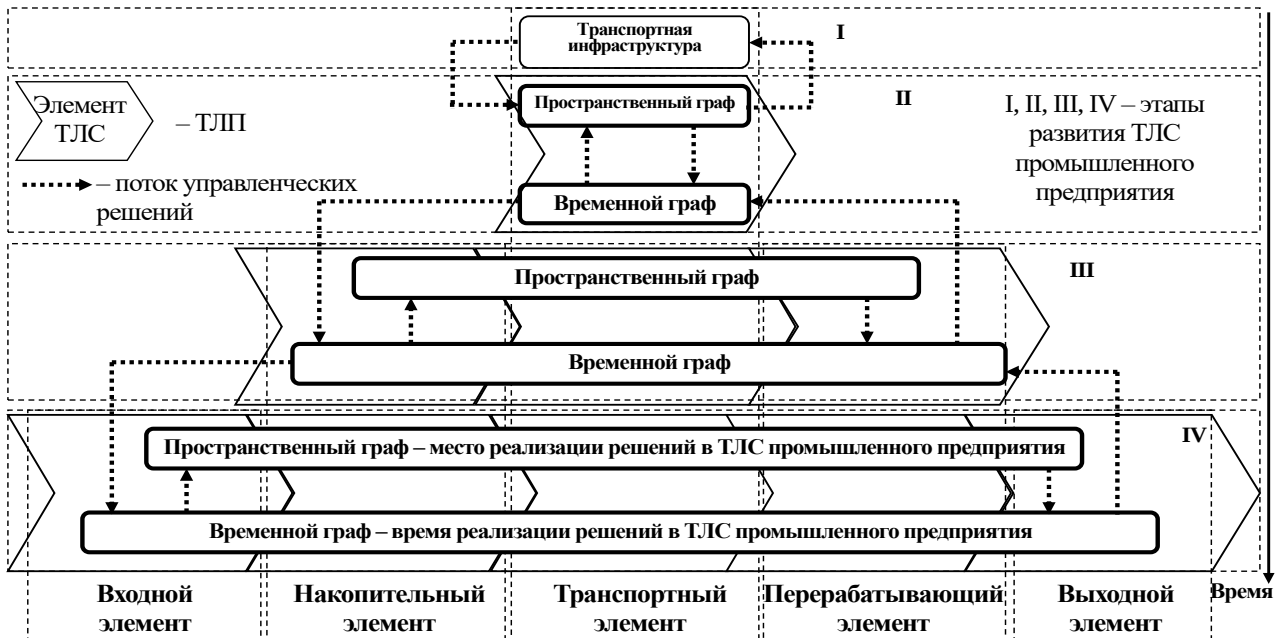


Рисунок 5 – Схема алгоритма циклической реализации согласованных решений по уровням управления непрерывными грузопотоками

Варианты последовательности реализации возможных решений, указанных в таблице 1, представляются в виде пространственно-временного графа. Порядок и место реализации цифровых и интеллектуальных технологий для обеспечения пространственно-временной оптимизации ТЛП определяется по результатам многокритериальной оценки пространственно-временного графа управленческих решений и в соответствии с разработанными этапами развития ТЛС промышленных предприятий. На техническом этапе развития ТЛС промышленного предприятия определяются места реализации возможных решений по корректированию параметров ТЛП. Выбор места реализации осуществляется на пространственном графе, время и порядок реализации решений определяются на временном графе. Оценки рёбер графов задаются по результатам многокритериального анализа потоков решений. Переход с технического этапа на технологический осуществляется после определения мест и времени реализации решений по корректированию ТЛП. Место и время реализации решений технологического этапа являются необходимым условием

для перехода на организационный этап развития ТЛС промышленного предприятия. Таким же образом, после реализаций решений организационного этапа осуществляется переход на управленческий этап. Данный цикл повторяется начиная с транспортного элемента и заканчивается комплексной реализации решений во всей ТЛС промышленного предприятия. Результатом выполнения предложенного алгоритма циклической реализации согласованных решений по уровням управления непрерывными грузопотоками является вариант развития ТЛС промышленного предприятия с учётом многокритериальности и многовариантности ТЛП.

**В третьем разделе «Систематизация методов пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических систем промышленных предприятий»** выбраны и систематизированы методы пространственно-временной оптимизации ТЛП, исследованы методы построения и оптимизации пространственно-временных графов ТЛП, произведен анализ практики имитационного моделирования технологии переработки грузопотоков и методов формирования специализированных графов маршрутизации грузопотоков.

Для решения задач пространственно-временной оптимизации транспортных систем и процессов используются различные комбинации методов, которые систематизированы по следующим группам: теория графов, имитационное моделирование, математическое программирование, формирование и обучение искусственных нейронных сетей. Методы формирования и использования графов для решения задач пространственно-временной оптимизации транспортных систем и процессов на основе формализации пространственных и временных данных в виде графов обладают потенциалом для создания более точных и вычислительно эффективных методов описания и прогнозирования сложных ТЛС. Использование методов пространственно-временной оптимизации позволяет формировать сети взаимодействия объектов управления, сложные топологии пространства и множества возможных решений, тем самым учитывая сложные пространственно-временные зависимости между ТЛП.

Перспективным направлением является использование пространственно-временных графов, графовых нейронных сетей и методов их обучения.

Отличительной особенностью графовых нейронных сетей является возможность использования графов без дополнительных преобразований. Кроме того, возрастает актуальность комплексного использования имитационного моделирования и методов оптимизации для обучения искусственных нейронных сетей. Использование такого подхода позволит в ускоренном режиме проводить имитацию ТЛП, выполнять оценку принимаемых решений и выбирать наилучшую их последовательность. Повысить точность оценки пространственно-временных зависимостей ТЛП позволяют имитационные модели, поскольку точность преобразования данных в пространственно-временные оценки графа обладает прямой зависимостью от точности описания технологии переработки грузопотоков в элементах ТЛС.

Практика имитационного моделирования ТЛП показывает широкое использование процессного подхода при описании технологии переработки грузопотоков в форме так называемых потоковых диаграмм. Каждая операция в потоковой диаграмме имитирует занятость конкретных элементов транспортной инфраструктуры в течение определённого времени. Основным недостатком процессного подхода является необходимость составления множества последовательностей элементов имитационной модели для всех возможных вариантов технологии переработки элементов грузопотоков. Кроме того, для выполнения имитационных экспериментов по выявлению «узких мест» технологии работы элемента ТЛС промышленного предприятия необходимо вносить корректировки в последовательности элементов имитационной модели. Результаты экспериментов с процессными имитационными моделями железнодорожных станций показали их эффективность только в случае ограниченного числа вариантов маневровых операций. Поэтому актуальной задачей является разработка универсальных способов описания и изменения управленческих решений в высокодетализированных имитационных моделях.

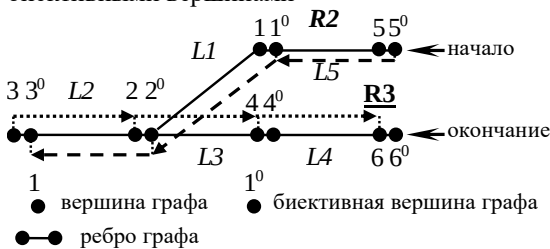
Проведённые исследования в области имитационного моделирования технологии переработки грузопотоков в элементах ТЛС на примере работы железнодорожного транспорта необщего пользования крупных горнодобывающих и металлургических предприятий показали необходимость предварительного решения задач оптимизации и планирования маршрутов движения поездов и



маневровых составов. Использование методов маршрутизации на графах позволяет реализовать более сложные методы и алгоритмы прогнозирования эксплуатационной обстановки и оптимизации технологии работы железнодорожного транспорта необщего пользования. Например, для условий железнодорожного транспорта вершинами графа описываются стрелочные переводы, их группы, станции, рёбрами графа – пути или межстанционные перегоны.

Выполненное исследование существующих способов описания схем путевого развития железнодорожных станций в составе как имитационных, так и математических моделей позволило выявить три способа представления на графе железнодорожных стрелочных переводов – одной вершиной, двумя вершинами (двухвершинный граф) или ребрами графа (рёберный граф) (рисунки 6, 7).

Двухвершинный граф с соединёнными биективными вершинами



$R1 = \{5^0; 1^0; 2^0; 3^0; 3; 2; 4; 6\}$  - реальный маршрут  
 $L_{5^0,6^0} = L5 + L1 + 2 \cdot L2 + L3 + L4$

**оптимальный маршрут №1 (первая итерация)**

$R2 = \{5^0; 1^0; 2^0; 3^0\}$ ,  $L_{5^0,3^0} = L5 + L1 + L2$

**оптимальный маршрут №2 (вторая итерация)**

$R3 = \{3; 2; 4; 6\}$ ,  $L_{3,6} = L2 + L3 + L4$

**оптимальный маршрут №3 (вторая итерация)**

$R4 = \{3; 2; 1; 5\}$ ,  $L_{3,5} = L2 + L1 + L5$

Данные оптимальных маршрутов  
 первая итерация (нач. верш.  $5^0$ )

| $P_i$ | $P_{i,i}$ | $L_{i,i}$    |
|-------|-----------|--------------|
| 1     | 1         | нет маршрута |
| $1^0$ | $5^0$     | L5           |
| 2     | 2         | нет маршрута |
| $2^0$ | $1^0$     | L5+L1        |
| 3     | 3         | нет маршрута |
| $3^0$ | $2^0$     | L5+L1+L2     |
| 4     | 4         | нет маршрута |
| $4^0$ | $4^0$     | нет маршрута |
| 5     | 5         | нет маршрута |
| $5^0$ | 0         | 0            |
| 6     | 6         | нет маршрута |
| $6^0$ | $6^0$     | нет маршрута |

Данные оптимальных маршрутов  
 вторая итерация (нач. верш. 3)

| $P_i$    | $P_{i,i}$ | $L_{i,i}$       |
|----------|-----------|-----------------|
| 1        | 2         | L2+L1           |
| $1^0$    | $1^0$     | нет маршрута    |
| 2        | 3         | L2              |
| $2^0$    | $2^0$     | нет маршрута    |
| <b>3</b> | <b>0</b>  | <b>0</b>        |
| $3^0$    | $3^0$     | нет маршрута    |
| 4        | 2         | L2+L3           |
| $4^0$    | $4^0$     | нет маршрута    |
| 5        | 1         | L2+L1+L5        |
| $5^0$    | $5^0$     | нет маршрута    |
| <b>6</b> | <b>4</b>  | <b>L2+L3+L4</b> |
| $6^0$    | $6^0$     | нет маршрута    |

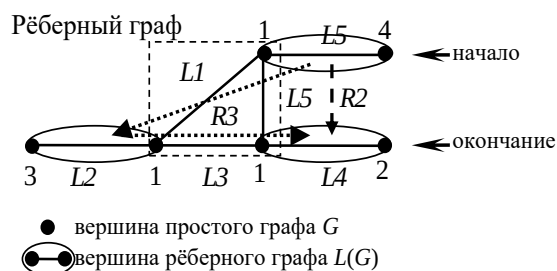
Данные двухвершинного графа

| $P_i$    | 1  | $5^0$ | 2  | $1^0$ | 3  | $2^0$ | 2  | $4^0$ | 4  | $6^0$ |
|----------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|
| $P_j$    | 5  | $1^0$ | 1  | $2^0$ | 2  | $3^0$ | 4  | $2^0$ | 6  | $4^0$ |
| $L_{ij}$ | L5 | L5    | L1 | L1    | L2 | L2    | L3 | L3    | L4 | L4    |

Рисунок 6 – Результаты моделирования на специализированном двухвершинном графе железнодорожной станции с соединёнными биективными вершинами

Результаты моделирования на основе использования представленных графов показали наличие разворота маневрового состава на стрелочном переводе, что противоречит технологии работы железнодорожной станции.

Эксперименты по использованию специализированных графов (двухвершинного и рёберного графов) для описания схем путевого развития железнодорожных станций в составе имитационных моделей показали алгоритмическую и вычислительную сложность их использования при решении задач маршрутизации поездов и маневровых составов.



$R1 = \{(4,1); (1,3); (2,1)\}$  - реальный маршрут  $L_{(4,1),(2,1)} = L1 + L3$

$R2 = \{(4,1); (2,1)\}$  – оптимальный маршрут при условии  $L5 < L1 + L3$ ,  $L_{(4,1),(2,1)} = L5$

$R3 = R1 = \{(4,1); (1,3); (2,1)\}$  – оптимальный маршрут при условии  $L5 > L1 + L3$ ,  $L_{(4,1),(2,1)} = L1 + L3$

Данные рёберного графа

| $P_i$ | $P_j$ | $L_{ij}$ |
|-------|-------|----------|
| (4,1) | (1,3) | L1       |
| (1,3) | (4,1) | L1       |
| (1,3) | (2,1) | L3       |
| (2,1) | (1,3) | L3       |
| (4,1) | (2,1) | L5       |
| (2,1) | (4,1) | L5       |

Данные оптимальных маршрутов при условии  $L5 < L1 + L3$

| $P_i$ | $P_{li}$ | $L_{li,i}$ |
|-------|----------|------------|
| (4,1) | 0        | 0          |
| (1,3) | (4,1)    | L1         |
| (2,1) | (4,1)    | L5         |

Данные оптимальных маршрутов при условии  $L5 > L1 + L3$

| $P_i$ | $P_{li}$ | $L_{li,i}$ |
|-------|----------|------------|
| (4,1) | 0        | 0          |
| (1,3) | (4,1)    | L1         |
| (2,1) | (1,3)    | L1+L3      |

Рисунок 7 – Результаты моделирования на специализированном рёберном графе железнодорожной станции

Актуальной задачей является разработка универсального способа цифрового описания транспортной инфраструктуры высокой детализации на основе совершенствования методов формирования специализированных графов маршрутизации грузопотоков. Решение данной задачи позволит расширить адаптивность использования методов пространственно-временной оптимизации для условий функционирования ТЛС промышленных предприятий.

**В четвертом разделе** разработан комбинированный метод пространственно-временной оптимизации ТЛП промышленных предприятий и обосновано использование пространственно-временных графов как основы описания процесса управления грузопотоками.

Сложность процесса управления грузопотоками обусловлена множеством параллельных ТЛП, которые сопровождаются сложными пространственными и временными зависимостями. Поэтому формализация процесса управления грузопотоками основана на идее формирования пространственно-временного графа ТЛП с последующей его оптимизацией. Формирование оценок такого графа в режиме реального времени основано на проведении анализа эксплуатационной обстановки и оптимизации данного графа на всех уровнях управления грузопотоками с учетом потенциальных логистических потерь при ограничениях транспортной инфраструктуры, структуры грузопотоков и технологии работы элементов ТЛС промышленного предприятия. Сокращение размера данной задачи достигается её разделением на подзадачи, решение которых основано на комплексном использовании методов пространственно-временной оптимизации ТЛП:

- многокритериальный анализ критериев эффективности ТЛП для выбора приоритетов выполнения технологических операций;
- динамическая оптимизация временного графа для определения оптимальной последовательности технологических операций ТЛП;
- поиск оптимальных маршрутов грузопотоков на пространственных специализированных графах с учётом технологии работы элементов ТЛС;
- метод имитационного моделирования для формирования управленческих решений с последующим обучением графовых нейронных сетей прогнозирования ТЛП;
- выбор управленческих решений на основе использования графовой нейронной сети прогнозирования ТЛП.

Структура пространственно-временного графа ТЛП описывает разделение оптимизируемого пространства на временной граф технологических операций и пространственный граф транспортной инфраструктуры (рисунок 8). Вершинами временного графа являются технологические операции ТЛП, рёбрами – продолжительность перехода от одной технологической операции к другой. Применительно к железнодорожному транспорту, вершинами пространственного графа являются стрелочные переводы или станции, рёбрами – железнодорожные пути, перегоны.

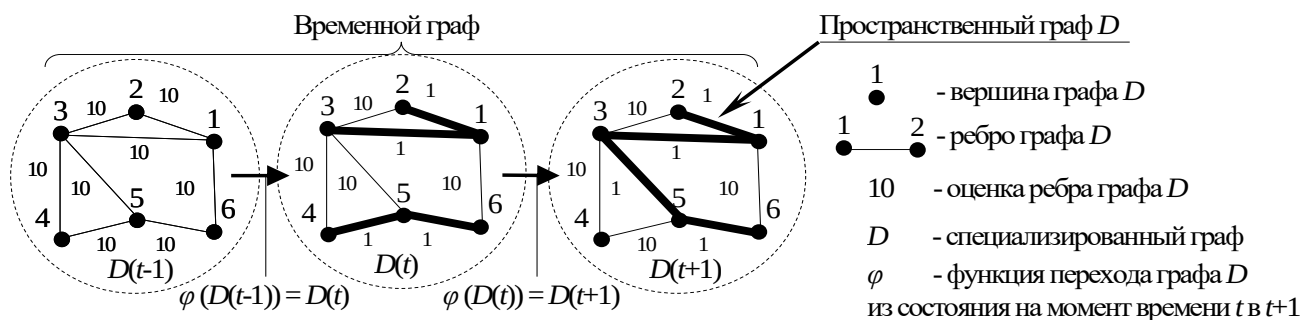
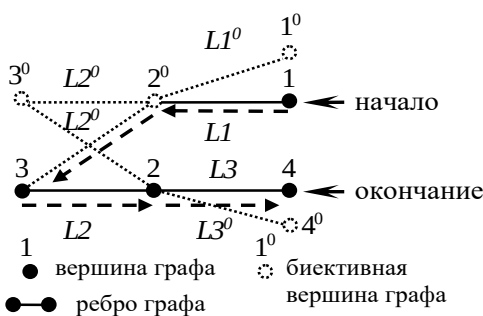


Рисунок 8 – Схема структуры пространственно-временного графа

Разработанный пространственно-временной граф  $STG = \{D_{nm}(t), \Phi\}$  представляет собой последовательность неориентированных, не имеющих петель специализированных графов  $D$ , где  $D_{nm}(t)$  – множество структур графа  $D$  в различные моменты времени  $t$ ,  $n$  – вариант структуры графа  $D$  на момент времени  $t$  при общем их количестве  $N$ ,  $m$  – количество уровней состояния графа  $D$  в периоде планирования  $[0, T]$  при общем их количестве  $M$ .  $\Phi = \{\varphi^n_m\}$  –

множество переходов между состояниями графа  $D$ . Сокращение размера задачи достигается исключением заведомо не эффективных вариантов на временном графе по результатам многокритериальной динамической оптимизации ТЛП.

Инфраструктура в  $STG$  учитывается на более низком уровне абстракции и представлена в виде специализированного графа  $D$ . Специализированный граф  $D = \{G(P, L), P^0, L^0\}$  представляет собой граф маршрутизации грузопотоков. Поскольку отдельная технологическая операция ТЛП сопровождается занятостью рёбер  $l$  специализированного графа  $D$  в момент времени  $t$  грузопотоком  $f_{ij}$ , для формирования оптимальных маршрутов грузопотоков с учетом технологии работы элементов ТЛС промышленных предприятий разработан новый математический объект – двухвершинный граф с отдельными биективными вершинами и рёбрами (рисунок 9).



| Данные графа $D$ |                |          | Данные оптимальных маршрутов |                |            |
|------------------|----------------|----------|------------------------------|----------------|------------|
| $P_i$            | $P_j$          | $L_{ij}$ | $P_i$                        | $P_{li}$       | $L_{li,i}$ |
| 1                | 2 <sup>0</sup> | L1       | 2                            | 3 <sup>0</sup> | L2         |
| 2 <sup>0</sup>   | 1              | L1       | 3                            | 2              | L2         |
| 1 <sup>0</sup>   | 2 <sup>0</sup> | L1       | 2                            | 3              | L2         |
| 2 <sup>0</sup>   | 1 <sup>0</sup> | L1       | 2                            | 4 <sup>0</sup> | L3         |
| 3 <sup>0</sup>   | 2 <sup>0</sup> | L2       | 4 <sup>0</sup>               | 2              | L3         |
| 2 <sup>0</sup>   | 3 <sup>0</sup> | L2       | 2                            | 4              | L3         |
| 2 <sup>0</sup>   | 3              | L2       | 4                            | 2              | L3         |
| 3                | 2 <sup>0</sup> | L2       |                              |                |            |
| 3 <sup>0</sup>   | 2              | L2       |                              |                |            |

$R1 = \{1; 2^0; 3; 2; 4\}$  - оптимальный маршрут,  $L_{1,4} = L1 + 2 * L2 + L3$

Рисунок 9 – Результаты моделирования на разработанном графе  $D$

Предлагаемое представление транспортной инфраструктуры позволяет отказаться от использования дополнительных правил и исключений для отслеживания направления движения элементов грузопотоков с учетом специфики выполнения технологической операции ТЛП, например маневровой операции, в состав которой входит сложный маневровый маршрут с несколькими полурейсами.

Сокращение размера задачи достигается на основе использования известных алгоритмов поиска оптимальных маршрутов на графах, например эвристического «алгоритма метлы» (англ. «sweep algorithm»), который позволяет находить множество всех оптимальных путей на разработанном специализированном графе  $D$ . Идея алгоритма основана на последовательной проверке для всех рёбер, исходящих из всех  $i$ -х вершин графа, следующего условия:

$$L_{i=0,i} < L_{i=0,\lambda_i}, \quad (1)$$

где  $L_{i=0,i}$ ,  $L_{i=0,\lambda_i}$  – длины рёбер графа, соответственно, от начальной вершины ребра  $i=0$  до последующей  $i$ -й и предшествующей  $\lambda_i$ . Вершина  $i$  включается в состав оптимального пути при выполнении условия (1).

Последовательность изменения состояния специализированного графа  $D$  в различные моменты времени называется траекторией пространственно-временного графа  $STG$  и задана отображением  $S = \{\varphi(D(t)), \varphi(D(t+1))\}$ . Функция перехода между состояниями графа  $\varphi$  определяет занятость элементов транспортной инфраструктуры отдельными технологическими операциями ТЛП в различные моменты времени  $t$ . Последовательность технологических операций ТЛП при оптимальной структуре грузопотоков с учётом интересов стейкхолдеров определяется на основе использования разработанного метода многокритериальной динамической оптимизации ТЛП. Целевая функция данной задачи имеет вид

$$S = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \varphi_{nm} \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$\varphi_{nm} = k_{\Pi} \cdot J_{\Pi} + k_C \cdot J_C + k_{\text{ТОП}} \cdot J_{\text{ТОП}} + k_{\text{ТНП}} \cdot J_{\text{ТНП}}, \quad (3)$$

где  $k_{\Pi}$ ,  $k_C$ ,  $k_{\text{ТОП}}$ ,  $k_{\text{ТНП}}$  – коэффициенты значимости групп критериев эффективности ТЛП, интегральные критерии: производства ( $J_{\Pi}$ ), собственников подвижного состава ( $J_C$ ), транспорта общего пользования ( $J_{\text{ТОП}}$ ), собственников инфраструктуры ( $J_{\text{ТНП}}$ ). Для определения коэффициентов значимости целесообразно проводить групповую оценку критериев эффективности ТЛП на основе использования метода многокритериального анализа DEMATEL (рисунок 10).

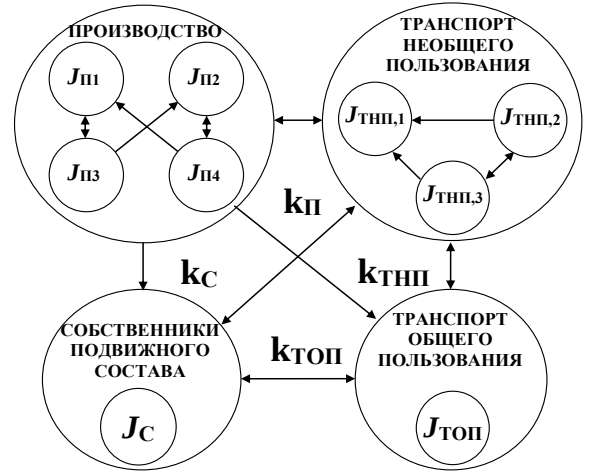


Рисунок 10 – Схема групповой оценки критериев эффективности

Пусть  $c_j^{\Pi}(t+\Delta t)$  – интегральный коэффициент экономической эффективности производства при поздней постановке элементов грузопотока на величину  $\Delta t$ ,  $c_j^{\Pi}(t-\Delta t)$  – интегральный коэффициент экономической эффективности производства при ранней постановке элементов грузопотока на грузовой фронт  $j$ ,  $c_i^{\Pi}(t+\Delta t)$  –

интегральный коэффициент экономической эффективности производства при позднем выводе элементов грузопотока на грузовой фронт  $j$ ,  $c_{ij}^{\Pi}(t-\Delta t)$  – интегральный коэффициент экономической эффективности производства при раннем выводе элементов грузопотока с грузового фронта  $i$ , тогда интегральный критерий эффективности производства рассчитывается по формуле:

$$J_{\Pi} = \sum_{t=0}^T \sum_{p_j}^h c_{ij}^{\Pi}(t \pm \Delta t) \cdot f_{ij}(t) + \sum_{t=0}^T \sum_{p_j}^h c_{ij}^{\Pi}(t \pm \Delta t) \cdot f_{ij}(t), \quad (4)$$

Пусть  $X$  – общее количество собственников  $x$  подвижного состава,  $Y$  – общее количество  $y$  направлений элементов грузопотока,  $c_{ix}^C(t \pm \Delta t)$  – интегральный коэффициент экономической эффективности собственника  $x$  подвижного состава в результате корректировки структуры грузопотока по причине несвоевременного вывода подвижного состава с предприятия,  $c_{iy}^{ТОП}(t \pm \Delta t)$  – интегральный коэффициент экономической эффективности транспорта общего пользования при корректировке структуры грузопотока по направлениям  $y$ , тогда экономическая эффективность собственников подвижного состава определяется как:

$$J_C = \sum_{t=0}^T \sum_{x=1}^X c_{ix}^C(t \pm \Delta t) \cdot f_{ij}(t), \quad (5)$$

а экономическая эффективность транспорта общего пользования составит:

$$J_{ТОП} = \sum_{t=0}^T \sum_{y=1}^Y c_{iy}^{ТОП}(t \pm \Delta t) \cdot f_{ij}(t). \quad (6)$$

Для определения экономической эффективности транспорта необщего пользования вводятся следующие понятия. Пусть  $c_{ij}(t)$  – интегральный коэффициент экономической эффективности при плановых значениях параметров грузопотока  $f_{ij}(t)$ ,  $c_{1,(i)}$  – интегральный коэффициент экономической эффективности в случае задержки элемента грузопотока в ожидании следующей технологической операции ТЛП,  $c_{2,(ij)}$  – интегральный коэффициент экономической эффективности при корректировке структуры грузопотока, тогда интегральный критерий эффективности транспорта необщего пользования при плановых значениях параметров грузопотока рассчитывается по формуле:

$$J_{ТНП} = \sum_{t=0}^T \sum_{p_i}^{P_j} c_{ij}(t) \cdot f_{ij}(t) + \sum_{t=0}^T \sum_{p_i}^{P_j} c_{1,(i)} \cdot f_{ij}(t) + \sum_{t_0}^T \sum_{p_i}^{P_j} c_{2,(ij)}(t) \cdot f_{ij}(t). \quad (7)$$

Для определения продолжительности технологических операций ТЛП с учетом потенциальных конфликтов занятости транспортной инфраструктуры в задачу многокритериальной динамической оптимизации ТЛП введены следующие отображения:  $d_{ij}(t)$  и  $d_i(t)$  называются резервом пропускной способности каждого ребра  $l_{ij}$  и перерабатывающей способности каждой вершины  $p_i$  на момент времени  $t$ ,  $d_{ij}(t), d_i(t) \in R^+$ , т.е. определены на множестве действительных неотрицательных чисел. На целевую функцию (2) накладываются следующие ограничения: уравнение динамики изменения массы грузопотока  $f_{ij}(t+1) = f_{ij}(t) + y_i(t+1) - y_i(t)$ ; начальное и конечное условия задачи:  $f_{ij}(0) = 0$ ;  $y_i(0) = 0$ ; условия неотрицательности переменных:  $f_{ij}(t) \geq 0$ ;  $i \neq j$ ;  $y_i(t) \geq 0$ ; ограничения на наличие резервов пропускной способности:  $0 \leq f_{ij}(t) \leq d_{ij}(t)$ ,  $0 \leq f_i(t) \leq d_i(t)$ .

Решение задачи многокритериальной динамической оптимизации ТЛП заключается в сокращении оптимизируемого пространства путём представления его в виде графовой нейронной сети. В разработанной графовой нейронной сети математический нейрон представляет собой траекторию  $S$  пространственно-временного графа  $STG$  (рисунок 11): нейрон =  $S(\varphi)$ . (8)

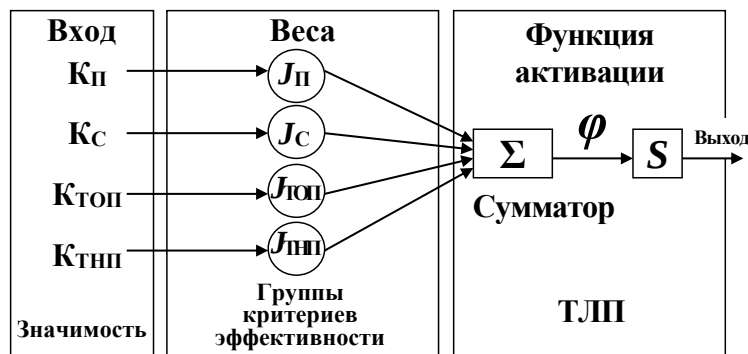


Рисунок 11 – Схема искусственного нейрона графовой нейронной сети

Коэффициенты значимости групп критериев эффективности ТЛП  $k_p, k_s, k_{топ}, k_{тнп}$  задают входные сигналы нейрона. Веса нейрона определяются критериями эффективности  $J_p, J_s, J_{топ}, J_{тнп}$ . Переход между слоями графовой нейронной сети осуществляется на основе использования функции  $\varphi$ , которая определяется по формуле (2) и описывает переход между состояниями пространственного графа в различные моменты времени (рисунок 12).

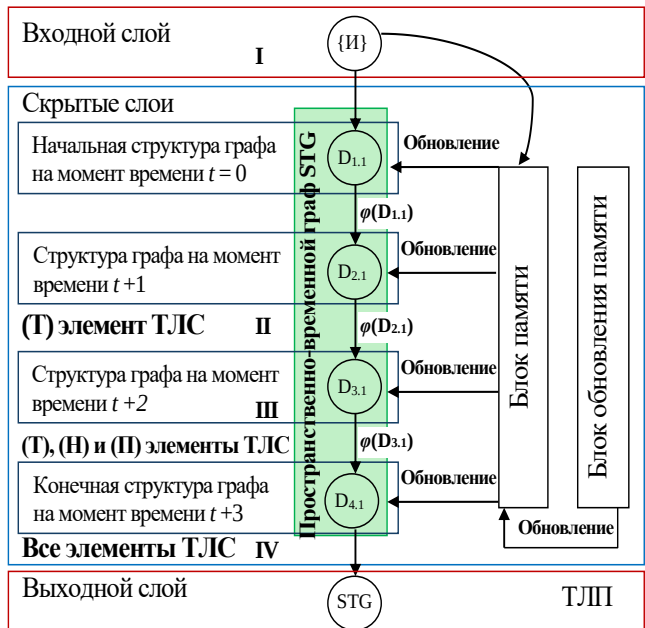
Разработанная графовая нейронная сеть (*GNN*) прогнозирует ТЛП в зависимости от сложившейся эксплуатационной обстановки на основе оценки последовательности технологических операций. Каждая технологическая операция имеет время своего начала и завершения, что позволяет отслеживать их последовательность в ТЛП.

Блок памяти хранит информацию о вариантах траектории *STG* в зависимости от значений индикаторов эксплуатационной обстановки, а также отслеживает последовательности технологических операций и задает

переходы между состояниями транспортных сетей *D*. Блок обновления памяти отвечает за обучение *GNN*, хранит данные о новых значениях индикаторов эксплуатационной обстановки и генерирует варианты изменения траекторий *STG*.

Для повышения оперативности и точности *GNN* разработан имитационный метод её обучения (рисунок 13). Предлагаемый метод основан на изучении процесса решения задачи экспертом. Графовая нейронная сеть обучается в процессе наблюдения за реализацией результатов многокритериальной динамической оптимизации ТЛП в имитационной модели и формирует

базу знаний в виде траекторий пространственно-временного графа ТЛП. Основным элементом разработанного метода является синхронная имитационная модель управления элементами ТЛС. Результатами



И – индикаторы эксплуатационной обстановки.  
Элементы ТЛС промышленного предприятия: Т – транспортный; Н – накопительный; П – перерабатывающий.  
I, II, III, IV – этапы развития ТЛС промышленного предприятия.  
 $\varphi(D(t))$  – функция перехода структуры графа с  $D(t)$  в  $D(t+1)$ .

Рисунок 12 – Схема разработанной графовой нейронной сети прогнозирования ТЛП

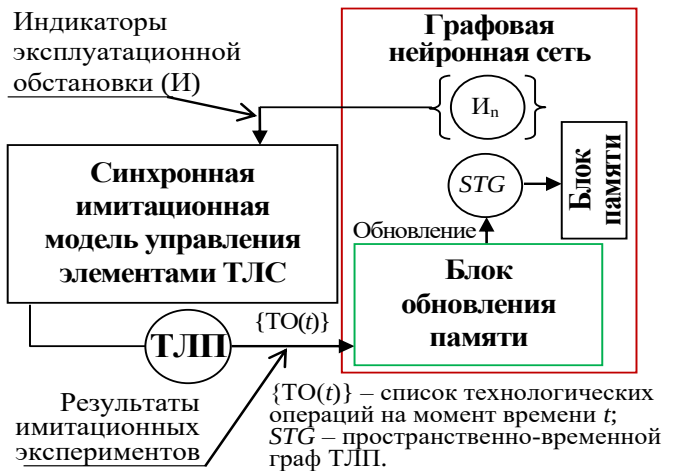


Рисунок 13 – Схема разработанного имитационного метода обучения *GNN*



имитационных экспериментов являются ТЛП, в состав которых входят списки технологических операций  $\{TO(t)\}$ , структура графа  $D$  на момент времени  $t$ , значения  $\varphi$ .

В пятом разделе «Формирование синхронной имитационной модели управления элементами транспортно-логистической системы промышленного предприятия» разработан способ синхронизации состояния ТЛП и результатов пространственно-временной оптимизации этих процессов, а также предложен способ формирования синхронных имитационных моделей управления элементами ТЛС промышленных предприятий (СИМ).

Способ синхронизации ТЛП и результатов пространственно-временной оптимизации этих процессов основан на использовании СИМ (рисунок 14).

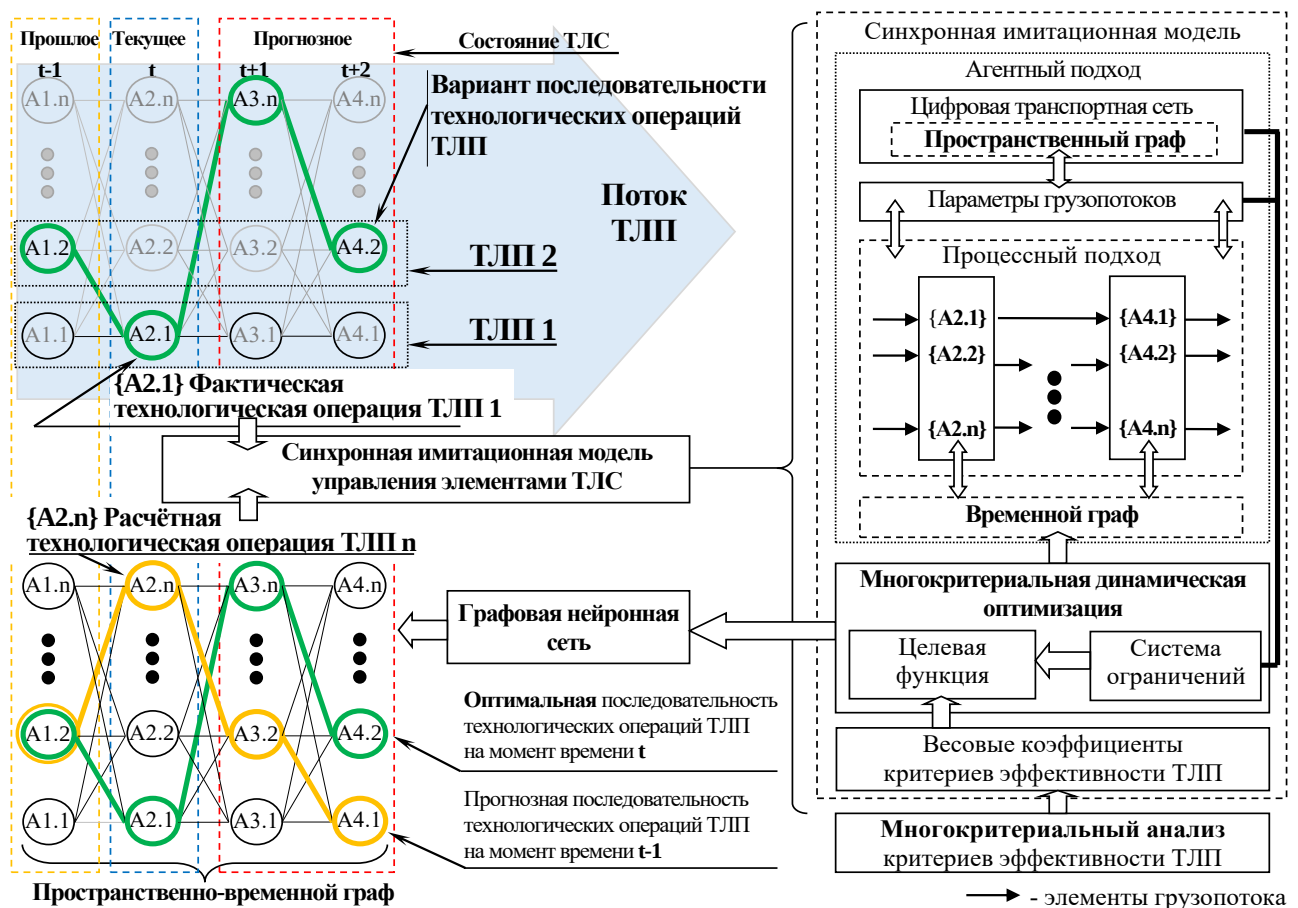


Рисунок 14 – Схема синхронизации фактических ТЛП и результатов их пространственно-временной оптимизации

Реализация многокритериальной динамической оптимизации ТЛП в имитационных моделях с последующим использованием результатов имитационных экспериментов в нейронных сетях требует надёжной

синхронизации модели с фактическими данными информационных систем о дислокации элементов, параметрах и технологии переработки грузопотоков. Синхронизация достигается использованием трёх функциональных блоков: сравнение модельных и фактических данных о местоположении элементов грузопотоков на основе использования цифровой транспортной сети, сравнение модельных и фактических технологических операций ТЛП, регистрация изменений сценариев развития эксплуатационной обстановки на основе корректирования динамических списков технологических операций.

Структура СИМ в терминах агентного подхода представляет собой иерархию агентов, описывающих инфраструктуру, технологию и систему управления элементами ТЛС.

Первый уровень предлагаемой структуры СИМ базируется на разработанном способе формирования цифровой транспортной сети в виде двухвершинного графа с отдельными биективными вершинами и рёбрами.

На втором уровне терминами агентного и процессного подходов описывается технология переработки грузопотоков. Для достижения универсального описания технологии переработки грузопотоков в имитационных моделях разработана универсальная конструкция, состоящая из статической последовательности процессных элементов модели, включающих технологические операции ТЛП (рисунок 15).

Моделирование изменений ТЛП является следующим уровнем СИМ и основано на разработанном способе описания взаимодействия объектов модели в форме динамических списков технологических операций. Проведенное исследование реализации предлагаемых решений в составе имитационных моделей показало возможность эффективной корректировки последовательности технологических операций ТЛП без корректировки структуры модели. Результатом имитационного прогона является сценарий развития эксплуатационной

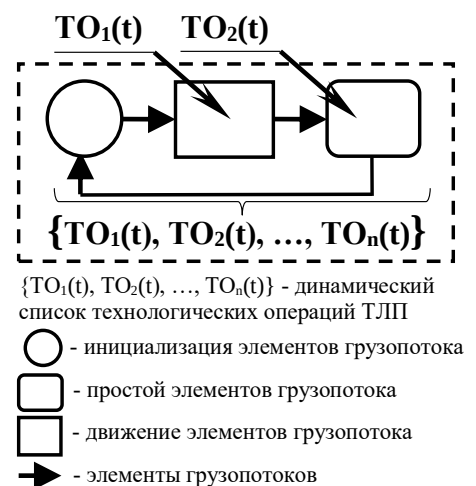


Рисунок 15 – Схема последовательности процессных элементов в СИМ

обстановки, формализованный в виде динамического списка технологических операций ТЛП с оптимальными параметрами грузопотоков.

Интерфейс СИМ согласно принципам теории технической организации интерфейсов разделен на специализированные блоки по планированию, контролю и корректированию ТЛП. Блок контроля визуализирует ТЛП как в форме различных графиков и показателей (например, суточный план-график работы железнодорожной станции), так и в форме динамической двумерной или трёхмерной презентации работы элементов ТЛС. Блок корректировки ТЛП визуализирует очередь технологических операций, а также позволяет изменять состав, параметры и очерёдность данных операций. Блок оперативного планирования основан на сравнении прогонов СИМ.

Использование синхронных имитационных моделей управления элементами ТЛС промышленных предприятий позволит повысить точность и универсальность цифрового описания технологии переработки грузопотоков, регистрировать изменения ТЛП и проводить имитационные эксперименты по выработке оптимальных решений по оперативному управлению грузопотоками.

**В шестом разделе** «Развитие методических основ пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических систем промышленных предприятий» разработана методика этапного развития управленческой структуры ТЛС промышленных предприятий, представлены результаты оценки эффективности разработанных методов обеспечения пространственно-временной оптимизации ТЛП в режиме реального времени на примере железнодорожного транспорта металлургических и горнодобывающих предприятий.

Методика развития управленческой структуры ТЛС промышленных предприятий основана на последовательном согласовании уровней управления непрерывными грузопотоками для достижения цели системы – повышение качества транспортного обслуживания клиентов промышленного транспорта путем сокращения потенциальных логистических потерь (таблица 2). Согласование грузопотоков обеспечивается поочередной реализацией комбинированного метода пространственно-временной оптимизации ТЛП промышленных предприятий в соответствии с этапами их развития.

Практическая реализация разработанных в диссертационной работе

решений по развитию управленческой структуры ТЛС промышленных предприятий основана на идее создания единого диспетчерского центра, обеспечивающего согласованное управление грузопотоками в режиме реального времени.

Таблица 2 – Этапы разработанной методики развития управленческой структуры ТЛС промышленных предприятий

| Этап методики                                                                | Метод пространственно-временной оптимизации              | Этап развития   |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. Внедрение систем идентификации и мониторинга технологических операций ТЛП | Формирование пространственно-временного графа            | Технический     |
| 2. Оптимизация маршрутов грузопотоков                                        | Многокритериальная динамическая оптимизация ТЛП          | Технологический |
| 3. Синхронизация фактических данных и результатов оптимизации ТЛП            | Синхронное имитационное Моделирование ТЛС                | Организационный |
| 4. Интеллектуализация процесса управления грузопотоками                      | Графовая нейронная сеть и имитационный метод её обучения | Управленческий  |

Реализация согласованного управления грузопотоками в единых диспетчерских центрах ТЛС промышленных предприятий на основе этапного решения задач пространственно-временной оптимизации предусматривает: формирование цифровой транспортной сети; комбинирование многокритериального анализа и СИМ; моделирование оперативного управления грузопотоками в СИМ.

Формирование цифровой транспортной сети для условий функционирования ТЛС промышленных предприятий основано на преобразовании транспортной инфраструктуры в двухвершинный граф с отдельными вершинами и рёбрами и его использования для автоматизации маршрутов грузопотоков. Результаты экспериментов, проведённых на построенных имитационных моделях работы промышленных железнодорожных станций крупных металлургических и горнодобывающих предприятий, показали гибкость и универсальность использования разработанной цифровой транспортной сети при решении задачи маршрутизации для всех возможных схем путевого развития и вариантов маневровых маршрутов, а также расчетную экономическую эффективность за счёт сокращения времени оборота вагонов на 12%.

Оценка эффективности комбинирования многокритериального анализа и имитационных моделей элементов ТЛС промышленных предприятий проводилась по методике, состоящей из трёх основных этапов. На первом этапе методом многокритериального анализа DEMATEL оценивается взаимовлияние критериев

эффективности ТЛП. На втором этапе проводятся имитационные эксперименты по оценке оперативных решений по управлению грузопотоками с учетом значимости критериев эффективности ТЛП. Результатами имитационных экспериментов являются приоритеты управленческих решений. Выбор управленческих решений на основе сравнения их приоритетов выполняется на третьем этапе разработанной методики. По результатам имитационных экспериментов установлено, что наибольший эффект достигается при комплексной реализации управленческих решений в ТЛС промышленного предприятия в целом. Использование данной методики позволит учитывать многокритериальный аспект при построении СИМ, а также сократить количество вариантов имитационных экспериментов по оценке решений по управлению грузопотоками с учетом значимости критериев эффективности ТЛП.

Оценка способов моделирования оперативного управления грузопотоками проводилась на примере абстрактной железнодорожной станции и на построенной СИМ промышленного железнодорожного узла (рисунок 16).

а) Продолжительность имитационного эксперимента в зависимости от количества параллельных транспортно-логистических процессов



б) Количество элементов имитационной модели в зависимости от количества технологических операций

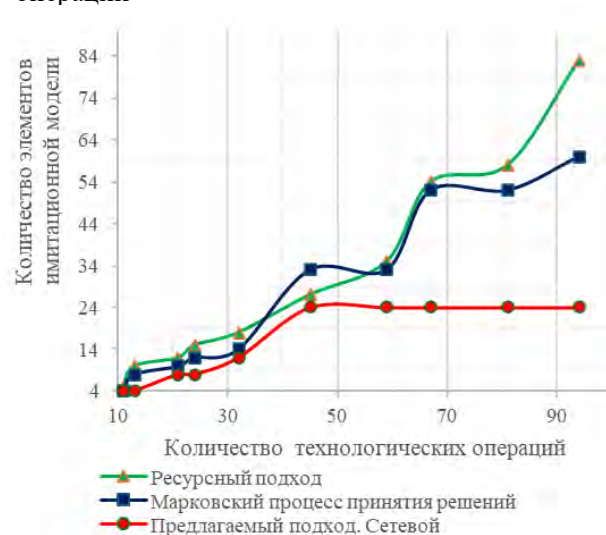


Рисунок 16 – Результаты сравнительного анализа подходов к моделированию оперативного управления в СИМ промышленного железнодорожного узла

Результаты выполненной оценки подходов к моделированию процесса управления грузопотоками показывают расхождение продолжительности имитационных экспериментов. Такое расхождение наблюдается при увеличении количества вариантов технологических операций с вагонами на железнодорожной

станции. При использовании предлагаемого подхода длительность имитационных экспериментов значительно больше, чем при использовании ресурсного подхода или Марковского процесса принятия решений. Это связано, во-первых, с увеличением вариативности формирования последовательностей полурейсов в сложных маневровых маршрутах; во-вторых, с использованием алгоритмов обработки конфликтов при занятии одних и тех же элементов путевого развития (цифровой транспортной сети), которые необходимы для соблюдения практических правил выполнения технологических операций. При увеличении количества вариантов технологических операций использование предлагаемого подхода показывает лучшие результаты адаптивности к частым изменениям эксплуатационной обстановки. Использование полученных результатов при построении СИМ промышленного железнодорожного узла позволило формализовать процесс управления непрерывными грузопотоками в виде динамических списков технологических операций и реализовать алгоритмы их согласованного корректирования во всех железнодорожных станциях узла.

Интеграция разработанной СИМ в систему управления железнодорожным транспортом горнообогатительного комбината позволила повысить его общую экономическую эффективность в результате сокращения потерь обогатительной фабрики на основе повышения ритмичности её транспортного обслуживания и обеспечения сырьем требуемого сортамента и качества при сокращении транспортно-складских затрат.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По результатам диссертационного исследования получены следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Выполнен анализ научного, методологического и практического опыта развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий. Выявлено, что данные системы функционируют в сложных условиях, связанных с необходимостью соблюдения противоречивых требований со стороны участников процесса управления грузопотоками – производства, собственников подвижного состава, руководства транспорта общего пользования и владельцев инфраструктуры, наряду со множеством объектов управления и частыми изменениями их состояния, а также ограничениями использования цифровых и

интеллектуальных технологий на промышленном транспорте. Установлена необходимость совершенствования подходов к управлению потоковыми процессами для условий функционирования исследуемых систем.

2. Разработана концепция этапного развития ТЛС промышленных предприятий и совершенствования их управленческих структур в условиях многокритериальности и многовариантности управления потоковыми процессами на основе пространственно-временной оптимизации. Установлено, что сложность согласованного управления непрерывными грузопотоками усиливается по мере увеличения размера ТЛС промышленного предприятия. Выявлено, что перспективным направлением решения крупномасштабных задач является использование методов пространственно-временной оптимизации. Предложено формализовать технологию организации потоковых процессов в виде временного графа, управления транспортной инфраструктурой – пространственным графом.

3. Выделены основные стейкхолдеры ТЛП – производство, собственники подвижного состава, руководство транспорта общего пользования и владельцы инфраструктуры, значительное влияние которых на ТЛП приводит к разделению грузопотоков на струи малой мощности. Определены критерии эффективности ТЛП, которые отражают потенциальные логистические потери при изменении структуры грузопотоков и времени их продвижения в ТЛС промышленного предприятия. Установлена пространственно-временная зависимость между сложностью и регулярностью грузопотоков, использованием транспортной инфраструктуры, а также продолжительностью и порядком технологических операций ТЛП.

4. Разработана модель организационного обеспечения этапного развития ТЛС промышленных предприятий на основе интеллектуализации и цифровизации ТЛП. Выделены и обоснованы четыре этапа развития ТЛС промышленных предприятий: технический, технологический, организационный и управленческий. Переход от одного этапа развития ТЛС промышленных предприятий к другому зависит от эффективности использования цифровых и интеллектуальных технологий, а также адаптивности методов пространственно-временной оптимизации ТЛП к частым изменениям структуры и технологии переработки грузопотоков. Последовательность интеллектуализации и цифровизации ТЛП

определяются по результатам многокритериальной оценки пространственно-временного графа управленческих решений.

5. Выполнена систематизация методов пространственно-временной оптимизации ТЛС по следующим группам: теория графов, имитационное моделирование, математическое программирование, формирование и обучение искусственных нейронных сетей. Показано, что использование методов пространственно-временной оптимизации является перспективным направлением решения сложных задач согласованного управления непрерывными потоками и транспортной инфраструктурой в режиме реального времени на основе формализации больших пространственных и временных данных о ТЛС в виде графов.

6. Разработан комбинированный метод пространственно-временной оптимизации ТЛП промышленных предприятий. Основой данного метода является комплекс разработанных методов: описание пространственно-временных зависимостей ТЛП на основе использования временного графа технологических операций ТЛП и пространственного графа транспортной инфраструктуры; многокритериальная динамическая оптимизация ТЛП на временном графе; оптимизация маршрутов грузопотоков на новом пространственном двухвершинном графе с отдельными биективными вершинами и рёбрами; формирование графовой нейронной сети прогнозирования ТЛП и имитационный метод её обучения.

7. Предложен способ синхронизации состояния ТЛП промышленных предприятий и результатов пространственно-временной оптимизации этих процессов. Синхронизация достигается использованием трёх функциональных блоков: сравнение модельных и фактических данных о местоположении элементов грузопотоков на основе использования цифровой транспортной сети; сравнение модельных и фактических технологических операций ТЛП; регистрация изменений сценариев развития эксплуатационной обстановки на основе корректирования динамических списков технологических операций.

8. Разработана синхронная имитационная модель управления элементами ТЛС промышленных предприятий. Структура модели в терминах агентного подхода представляет собой иерархию агентов, описывающих систему управления и технологию переработки грузопотоков динамическими списками технологических операций ТЛП, а также транспортную инфраструктуру цифровой



транспортной сетью.

9. Разработана методика этапного развития управленческой структуры ТЛС промышленных предприятий, включающая следующие этапы: внедрение систем идентификации и мониторинга технологических операций ТЛП; оптимизация маршрутов грузопотоков на разработанном двухвершинном графе и многокритериальная динамическая оптимизация технологических операций ТЛП на временном графе; синхронизация результатов пространственно-временной оптимизации с фактическими ТЛП; интеллектуализация на основе формирования и обучения графовой нейронной сети для обеспечения процесса принятия оптимальных решений по согласованному управлению непрерывными грузопотоками в режиме реального времени.

10. Выполнена оценка эффективности разработанных методов и методик для условий функционирования металлургических и горнодобывающих предприятий. Предложенные методы пространственно-временной оптимизации ТЛП, концепция и методика развития ТЛС промышленных предприятий использованы при разработке программ усиления пропускной и перерабатывающей способности железнодорожных станций и перегонов путей необщего пользования АО «Выксунский металлургический завод», АО «Уральская Сталь», ПАО «Ураласбест», ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Интеграция разработанной синхронной имитационной модели управления элементами ТЛС в систему управления железнодорожным транспортом ПАО «Ураласбест» позволила повысить общую экономическую эффективность промышленного предприятия.

11. Рекомендуются по результатам диссертационного исследования использовать её основные положения: при разработке стратегических программ развития ТЛС промышленных предприятий; для оценки эффективности решений по интеллектуализации и цифровизации ТЛП; при реализации согласованного управления непрерывными грузопотоками в режиме реального времени в единых диспетчерских центрах.

12. Перспективой дальнейшей разработки темы является формирование систем согласованного управления непрерывными грузопотоками на основе комбинирования графовых нейронных сетей с многокритериальными методами.

Это позволит оценивать эффективность решений по развитию ТЛС промышленных предприятий, прогнозировать в режиме реального времени изменение параметров ТЛП, а также формировать потоки согласованных решений на всех уровнях управления непрерывными грузопотоками.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **а) в рецензируемых научных изданиях:**

1. Багинова, В. В. Методика оценки организационной структуры оперативного управления вагонопотоками на путях необщего пользования / В. В. Багинова, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкурлов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2012. – № 2. – С. 19-22.
2. Интеллектуализация транспортного обслуживания металлургических предприятий / А. Н. Рахмангулов, Н. А. Осинцев, П. Н. Мишкурлов, О. А. Копылова // Сталь. – 2014. – № 4. – С. 115-118.
3. Мишкурлов, П. Н. Повышение точности динамической оптимизации вагонопотоков на основе использования расчётных периодов переменной длительности / П. Н. Мишкурлов // Управление большими системами: сборник трудов. – 2015. – № 53. – С. 58-75.
4. Мишкурлов, П. Н. Методика формирования транспортной сети железнодорожной станции / П. Н. Мишкурлов, А. Н. Рахмангулов, О. В. Фридрихсон // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3(51). – С. 50-64.
5. Копылова, О. А. Оценка целесообразности размещения парковочного пространства легковых автомобилей на основе имитационного моделирования / О. А. Копылова, П. Н. Мишкурлов, А. А. Четвергова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3(51). – С. 65-73.
6. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкурлов, Д. В. Александрин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3(55). – С. 43-59.
7. Концепция гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкурлов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1(93). – С. 90-104.
8. Мишкурлов, П. Н. Пространственно-временная оптимизация транспортно-логистических процессов промышленных предприятий / П. Н. Мишкурлов // Транспорт Урала. – 2025. – № 3(86). – С. 66-73.
9. Мишкурлов, П. Н. Цифровой двойник железнодорожных транспортно-логистических процессов промышленного предприятия / П. Н. Мишкурлов // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 3-1(90). – С. 124-133.
10. Мишкурлов, П. Н. Концепция пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий / П. Н.

Мишкурое // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2(98). – С. 219-230.

**б) в отечественных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования:**

11. Обоснование параметров циклично-поточной технологии методом имитационного моделирования в среде Anylogic / С. И. Головей, О. В. Фридрихсон, Е. Е. Швабенланд, П. Н. Мишкурое // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле /PROCEEDINGS OF THE TULA STATES UNIVERSITY SCIENCES OF EARTH. – 2021. – № 4. – С. 331-340.

**в) в изданиях, входящих в международные системы цитирования Scopus и Web of Science:**

12. Rakhmangulov, A. Optimal Placement Method of RFID Readers in Industrial Rail Transport for Uneven Rail Traffic Volume Management / A. Rakhmangulov, D. Muravev, P. Mishkurov // Open Engineering. – 2016. – Т. 6. – № 1. – С. 532-541.

13. Dynamic optimization of railcar traffic volumes at railway nodes / A. Rakhmangulov, A. Śladkowski, N. Osintsev, P. Mishkurov, D. Muravev // Railway Transport – A Systems Approach: Studies in Systems, Decision and Control. – 2017. – № 87. – С. 405-456.

14. Methodology for Justification of the Location of Railcar Repair Complex Enterprises / О. Fridrikhson, P. Mishkurov, О. Bodnar [и др.] // Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 25–29 мая 2020 года. – Novosibirsk, 2021. – С. 419-428.

15. Simulated Transport and Logistics Model of a Mining Enterprise / P. Mishkurov, О. Fridrikhson, V. Lukyanov [и др.] // Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 25–29 мая 2020 года. – Novosibirsk, 2021. – С. 411-418.

16. Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: Case study on the Ningbo-Zhoushan Port / D. Muravev, H. Hu, A. Rakhmangulov, P. Mishkurov // International Journal of Information Management. – 2021. – Т. 57. – С. 102133.

17. Rail yard digital twin implementation into an industrial information system / P. N. Mishkurov, A. N. Rakhmangulov, S. N. Kornilov, D. V. Aleksandrin // AIP Conference Proceedings: 16, Nizhny Tagil, 17–19 июня 2021 года. – Nizhny Tagil, 2022. – С. 030026.

18. Rakhmangulov, A. Spatio-Temporal Graphs in Transportation: Challenges, Optimization, and Prospects / A. Rakhmangulov, N. Osintsev, P. Mishkurov // Systems. – 2025 – Т. 13. – № 4. – С. 263.

**г) свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:**

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025687317 Российская Федерация. Пространственно-временная графовая нейронная сеть прогнозирования занятости элементов путевого развития в имитационной модели железнодорожной станции: № 2025685749: заявл. 22.09.2025: опубл. 08.10.2025 / П. Н. Мишкурое, А. Н. Рахмангулов; заявитель Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683789 Российская Федерация. Оптимизация маневровых маршрутов в имитационной модели железнодорожной станции: № 2023681986: заявл. 25.10.2023: опубл. 10.11.2023 / П. Н. Мишкур, А. Н. Рахмангулов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612706 Российская Федерация. Программа расчета суммарного и удельного расхода топлива автосамосвалов с учетом руководящего уклона карьерных автодорог: № 2023611124: заявл. 26.01.2023: опубл. 07.02.2023 / А. К. Артюшин, И. А. Пыталев, В. В. Якшина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022685755 Российская Федерация. Программа оптимизации расположения перегрузочного пункта при циклично-поточной технологии транспортирования горной массы на карьерах: № 2022685085: заявл. 19.12.2022: опубл. 27.12.2022 / А. К. Артюшин, И. А. Пыталев, В. В. Якшина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

#### **д) в монографиях:**

23. Мишкур, П. Н. Динамическая оптимизация вагонопотоков / П. Н. Мишкур, А. Н. Рахмангулов. – М.: Русайнс, 2017. – 110 с.

#### **е) в других изданиях и материалах конференций:**

24. Rakhmangulov, A. N. Method of optimal RFID readers location at railway nodes for complex railcar traffic volume controlling / A. N. Rakhmangulov, D. S. Muravev, P. N. Mishkurov // Transport problems - 2016: Proceeding VIII International Scientific Conference, Katowice, 29 июня 2016 года. – Katowice: Silesian University of Technology, 2016. – С. 496-506.

25. Лукьянов, В. А. Логистическая модель транспортно-технологической системы промышленного предприятия / В. А. Лукьянов, П. Н. Мишкур, О. А. Копылова // Бюллетень транспортной информации. – 2019. – № 11(293). – С. 19-30.

26. Мишкур, П. Н. Имитационное моделирование обработки поездов на железнодорожной станции / П. Н. Мишкур, А. С. Захарченко // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докл. 77-й междунар. науч.-практ. конф., Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2019. – С. 21.

27. Мишкур, П. Н. Имитационное моделирование поездной работы в железнодорожном транспортном узле / П. Н. Мишкур, В. С. Зайцев // Актуальные

проблемы современной науки, техники и образования: тез. докл. 77-й междунар. науч.-практ. конф., Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2019. – С. 24.

28. Имитационное моделирование и оперативное управление работой железнодорожной станции / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкуров, Д. В. Александрин // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. нац. науч. шк.-конф., Магнитогорск, 19–20 ноября 2020 года. Том Выпуск 5. – Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2020. – С. 177-181.

29. Интеграция имитационных моделей и интеллектуальных транспортных систем / Д. В. Александрин, О. Г. Мишанихин, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкуров // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 79-й междунар. науч.-практ. конф., Магнитогорск, 19–23 апреля 2021 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г.И. Носова, 2021. – С. 23.

30. Рахмангулов, А. Н. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных станций / А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкуров, Д. В. Александрин // Академик Владимир Николаевич Образцов - основоположник транспортной науки: тр. междунар. науч.-практ. конф., посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года. – М.: Российский ун-т транспорта, 2021. – С. 574-582.

31. Мишкуров, П. Н. Особенности построения агентной имитационной модели железнодорожной станции / П. Н. Мишкуров, А. Н. Рахмангулов // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 29-40.

32. Rakhmangulov, A. N. Digital twins of railway junctions based on a simulation model / A. N. Rakhmangulov, P. N. Mishkurov, S. N. Kornilov // Transport and Logistics 2021: PROCEEDINGS, Niš, Serbia, 03 декабря 2021 года. – Niš, Serbia: University of Niš, 2021. – С. 5-12.

33. Разработка математической модели транспортно-технологической системы рудника / О. В. Фридрихсон, П. Н. Мишкуров, С. Н. Корнилов, О. А. Копылова // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 4(94). – С. 75-82.

34. Синхронная имитационная модель оперативного управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте / А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкуров, Д. В. Александрин, О. Г. Мишанихин // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. нац. науч. шк.-конф., Магнитогорск, 25–26 ноября 2022 года. Том Выпуск 7. – Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2022. – С. 180-185.

35. Проблемы создания цифровых двойников промышленных железнодорожных станций / А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкуров, О. Г. Мишанихин, Д. В. Александрин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. 80-й междунар. науч.-практ. конф., Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2022. – С. 27.

36. Мишкур, П. Н. Имитационные модели грузовых фронтов промышленных предприятий / П. Н. Мишкур, И. И. Валеев, Д. Д. Слободнюк // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. 80-й междунар. науч.-практ. конф., Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2022. – С. 28.

37. Рахмангулов, А. Н. Оптимизация маневровых маршрутов в интеллектуальных транспортных системах / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкур // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. нац. науч. шк.-конф., Магнитогорск, 23–24 ноября 2023 года. Том Выпуск 8. – Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2023. – С. 191-195.

38. Мишкур, П. Н. Виртуальная транспортная сеть железнодорожной станции / П. Н. Мишкур, А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 27 сентября 2023 года. – М.: Российский ун-т транспорта, 2023. – С. 31-36.

39. Мишкур, П. Н. Управление логистическими транспортными системами на основе пространственно-временной оптимизации / П. Н. Мишкур, А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов // Академик Владимир Николаевич Образцов - основоположник транспортной науки: тр. междунар. науч.-практ. конф., М., 17 ноября 2023 года. – М.: ЗАО «Университетская книга», 2023. – С. 356-360.

40. Осинцев, Н. А. Концепция комбинирования многокритериальных и имитационных моделей устойчивых цепей поставок / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкур // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., М., 27 сентября 2023 года. – М.: Российский ун-т транспорта, 2023. – С. 43-48.

41. Зарипов, В. А. Путевое развитие железнодорожной станции в синхронных имитационных моделях / В. А. Зарипов, П. Н. Мишкур // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 10-12.

42. Рахмангулов, А. Н. Моделирование устойчивых способов использования пространственно-временных графов при построении универсальной имитационно-управляющей модели железнодорожной станции / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкур // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. нац. науч. шк.-конф., Магнитогорск, 25–26 ноября 2024 года. – Магнитогорск: Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г.И. Носова, 2024. – С. 139-145.

43. Мишкур, П. Н. Пространственно-временная оптимизация параметров железнодорожных транспортных систем / П. Н. Мишкур, А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов // Политранспортные системы: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием., Новосибирск, 24–25 октября 2024 года. – Новосибирск: Сибирский гос. ун-т путей сообщения, 2024. – С. 122-127.

44. Мишкур, П. Н. Динамическая маршрутизация маневровых передвижений в имитационных моделях железнодорожных станций / П. Н. Мишкур, А. Н. Рахмангулов // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-

2024): электрон. сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф., СПб., 15–16 октября 2024 года. – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I, 2024. – С. 190-193.

45. Мишкуров, П. Н. Комплекс имитационных моделей элементов "зелёной" цепи поставок / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкуров // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 22–23 мая 2024 года. – Екатеринбург: Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2024. – С. 194-196.

46. Мишкуров, П. Н. Метод представления управленческих решений в имитационных моделях железнодорожных станций / П. Н. Мишкуров, А. Н. Рахмангулов // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 22–23 мая 2024 года. – Екатеринбург: Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2024. – С. 197-201.

47. Мишкуров, П. Н. Организация управления логистическими транспортными системами на основе пространственно-временной оптимизации / П. Н. Мишкуров, А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов // Железнодорожный транспорт и технологии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 29–30 ноября 2023 года. – Екатеринбург: Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2024. – С. 263-265.

48. Осинцев, Н. А. Имитационная модель элемента "зелёной" цепи поставок / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкуров // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Липецк, 18–19 апреля 2024 года. – Липецк: Липецк. гос. техн. ун-т, 2024. – С. 372-376.

49. Мишкуров, П. Н. Автоматическая маршрутизация маневровых передвижений в имитационных моделях железнодорожных станций / П. Н. Мишкуров, А. Н. Рахмангулов // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте: Сб. статей междунар. науч.-практ. конф., Липецк, 18–19 апреля 2024 года. – Липецк: Липецк. гос. техн. ун-т, 2024. – С. 380-384.

50. Мишкуров, П. Н. Разработка гибридного многокритериального алгоритма устойчивых цепей поставок / П. Н. Мишкуров // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докл. 82-й междунар. науч.-практ. конф., Магнитогорск, 22–26 апреля 2024 года. – Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2024. – С. 87.

51. Зарипов, В. А. Результаты исследования пространственно-временных зависимостей параметров технологических процессов железнодорожных транспортных систем / В. А. Зарипов, П. Н. Мишкуров // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докл. 82-й междунар. науч.-практ. конф., Магнитогорск, 22–26 апреля 2024 года. – Магнитогорск: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2024. – С. 88.

52. Мишкуров, П. Н. Разработка синхронной имитационной модели железнодорожной станции / П. Н. Мишкуров, А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов // Железнодорожный транспорт и технологии: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с

междунар. участием, Екатеринбург, 27–28 ноября 2024 года. – Екатеринбург: Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2025. – С. 314-317.

53. Мишкур, П. Н. Способ цифровизации железнодорожных перевозок на путях необщего пользования горнодобывающих предприятий / П. Н. Мишкур, А. Н. Рахмангулов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – Т. 23. – №2. – С. 5-17.

Мишкур Павел Николаевич

Методология развития транспортно-логистических систем промышленных предприятий на основе пространственно-временной оптимизации

2.9.9. Логистические транспортные системы  
(технические науки)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Подписано в печать  
Усл. печ. л. 2,0.

Формат 60x84/16.  
Тираж 100 экз.

Бумага тип. №1.  
Заказ

Участок оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38