

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ УПРАВЛЕНИЯ» (ГУУ)

На правах рукописи



Кутков Владимир Дмитриевич

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЛОГИСТИКИ АПК**

Специальность: 2.9.9 «Логистические транспортные системы»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Терентьев Алексей Вячеславович

Москва – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ АПК В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ	13
1.1. Анализ особенностей функционирования и ограничений существующих моделей управления транспортно-логистическими системами агропромышленного комплекса	13
1.2. Эволюция организационно-управленческих структур от 3PL к 5PL и экосистемным моделям в условиях стохастичности среды	21
1.3. Анализ применимости методов искусственного интеллекта в транспортной логистике: возможности и фундаментальные ограничения	30
1.4. Концепция интеллектуальной системы поддержки принятия решений на основе каскадной архитектуры	35
2. ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АПК	44
2.1. Разработка онтологической модели предметной области	44
2.2. Формирование системы показателей эффективности и событийных триггеров в контуре оперативного управления	56
2.3. Архитектура и алгоритмы работы каскада интеллектуальных агентов с использованием технологии Ontology-Grounded RAG	68
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ	77
3.1. Формализация задачи многокритериального выбора сценария транспортировки на основе онтологических ограничений	77
3.2. Разработка алгоритма оценки и выбора оптимального управленческого решения в условиях неопределенности	86
3.3. Математическая модель адаптивного управления и коррекции поведения агентов (Модуль «Учитель»)	93
4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ	98
4.1. Архитектура и практическая реализация интеллектуальной системы поддержки принятия решений	98

4.2. Экспериментальное исследование процессов интеграции и семантической трансформации данных	107
4.2.1. Описание экспериментального стенда и исходных данных	107
4.2.2 Трансформация потоков данных.....	112
4.2.3 Математическое ядро интеллектуальной системы	119
4.2.4. Экспериментальное исследование обучаемости и робастности адаптивного контура управления	124
4.2.5. Параметрический анализ пропускной способности пункта приёма	132
4.2.6. Оценка эффективности системы в технико-эксплуатационных показателях	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	151
ПРИЛОЖЕНИЕ А Детализированные результаты вычислительного эксперимента	165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В условиях реализации национальных целей развития Российской Федерации, определенных Указом Президента РФ от 21.07.2020 № 474, и Транспортной стратегии РФ до 2035 года, безальтернативным вектором модернизации отрасли становится переход к моделям платформенной экономики и внедрению концепции виртуального логистического оператора. Макроэкономический тренд, развиваемый в рамках ведомственного проекта «Цифровое сельское хозяйство», коренным образом трансформирует требования к управлению транспортно-логистическими процессами в агропромышленном комплексе (АПК). Повышение маржинальности агропроизводства и обеспечение национальной продовольственной безопасности сегодня напрямую коррелируют с эффективностью функционирования логистики АПК, гарантирующих бесперебойность производственных циклов и связность цепей поставок от мест сбора урожая до узлов хранения и мест реализации.

В условиях геополитической трансформации и переориентации международных грузопотоков агропромышленный комплекс приобретает статус стратегически значимого элемента экономики, а устойчивость его товаропроводящей сети становится фактором, определяющим экспортный потенциал отрасли. Специфика логистики АПК заключается в высокой стохастичности внешней среды, жестких требованиях к температурным режимам и необходимости реализации концепции «Точно-в-срок» для сохранения биологической ценности скоропортящейся продукции, что, собственно, и позволяет выделять транспортно-логистические системы АПК из общего класса грузовых логистических систем и предопределяет неприменимость к ним ряда типовых решений. Существующие методы управления опираются на детерминированные алгоритмы, которые теряют устойчивость при возникновении нештатных ситуаций, и требуют ручного вмешательства человека. При этом возникающая когнитивная нагрузка на оператора в условиях экспоненциального роста объемов телематических данных приводит к недопустимым временным задержкам и, как следствие – снижения качества предоставляемых транспортных

услуг. Переход к интегрированным сетевым моделям управления требует создания принципиально новых интеллектуальных систем поддержки принятия решений, поскольку применение исключительно генеративных нейросетевых моделей в логистике ограничено теоретически и эмпирически обоснованным пределом точности (вероятностью галлюцинаций модели), что порождает риск выработки неверных управленческих решений и советов оператору. Решение описанной возможно за счет совокупного использования генеративных моделей ИИ, надежности онтологического моделирования и строгости детерминированного математического аппарата. Разработка подобной архитектуры, способной осуществлять многокритериальную оптимизацию грузопотоков в условиях неполной информации, представляет собой актуальную научную задачу, имеющую существенное значение для развития транспортной логистики.

Степень разработанности проблемы. Вопросы формирования и оптимизации транспортно-логистических систем, а также управления цепями поставок в агропромышленном комплексе исследовались многими отечественными учеными. Фундаментальные основы организации грузопотоков, перехода к экосистемным моделям 4PL и 5PL, а также специфика логистики АПК заложены в трудах Глаголева С.Н., Карелиной М.Ю., Блудяна Н.О., Линника В.Ю., Линника Ю.Н., Новикова И.А., Полуниной Н.Ю., Степанова А.А., Тод Н.А., Трошина А.С. и др.

Проблематика применения кибернетического подхода, ситуационного управления и математического моделирования транспортных процессов в условиях стохастической среды нашла отражение в работах Грязнова М.В., Дорофеева А.Н., Курганова В.М., Мехдиевой И.И., Рассохи В.И., Халтурина Р.А. и др. Перечисленные авторы развили методологию управления по отклонению и возмущению, предложили инструменты оценки потерь провозной способности и оптимизации маршрутов.

Развитию систем поддержки принятия решений (СППР), мультиагентных технологий и интеграции методов искусственного интеллекта в управление логистикой посвящены исследования Терентьева А.В., Аксенова К.А., Рыбина

М.В., Савиной М.В., Спициной И.А., Чечнева В.Б., а также ряда зарубежных специалистов (Weller O., Sharma и др.).

Специфические аспекты эксплуатации высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС), использования телематики, интернета вещей (IoT) и динамической маршрутизации в условиях высокой неопределенности глубоко проработаны в трудах Аккермана Д.А., Кирюшина И.И., Козина М.Н., Коновалова В.Б., Курбанова А.Х., Печатновой Е.В., Ризаевой Ю.Н., Федотова А.В., Филиппова Е.О.

Практически все исследователи сходятся во мнении о необходимости автоматизации диспетчерского управления и перехода к предиктивной аналитике. При этом существующие ERP и TMS системы базируются преимущественно на детерминированных алгоритмах, которые теряют устойчивость при возникновении нештатных ситуаций (погодные аномалии, поломки техники, изменение рыночной конъюнктуры). Использование генеративных языковых моделей (LLM) в чистом виде ограничено их склонностью к семантическим ошибкам и неспособностью гарантировать соблюдение жестких технологических ограничений. В связи с этим возникает объективная потребность в разработке гибридных (нейросимволических) систем поддержки принятия решений, способных объединить когнитивную гибкость мультиагентных LLM-архитектур со строгим математическим и онтологическим аппаратом для управления транспортно-логистическими процессами.

Цель диссертационной работы: разработка гибридной интеллектуальной системы поддержки принятия решений для управления транспортно-логистическими процессами агропромышленного комплекса, обеспечивающей повышение эффективности и надежности цепей поставок в условиях стохастичности внешней среды за счет интеграции методов семантического анализа и математической оптимизации

Задачи исследования:

1. Провести анализ особенностей функционирования транспортно-логистических систем АПК и ограничений существующих моделей управления, обосновав необходимость перехода к гибридным интеллектуальным архитектурам.
2. Разработать онтологическую модель предметной области и архитектуру каскада интеллектуальных агентов, обеспечивающих семантическую интероперабельность гетерогенных данных и автоматизацию процессов диспетчеризации на основе технологии Ontology-Grounded RAG.
3. Сформировать систему показателей эффективности и событийных триггеров, учитывающую специфику логистики АПК (концепция JIT, сохранность качества груза), для формализации целевых функций управления в динамической среде.
4. Разработать математическую модель многокритериального выбора сценариев транспортировки и алгоритмы адаптивного управления на основе методов районирования и теории массового обслуживания для верификации решений в условиях неопределенности.
5. Реализовать программный комплекс интеллектуальной системы поддержки принятия решений и разработать механизмы его интеграции с корпоративными информационными системами и источниками телематических данных.

Объект исследования: выступает транспортно-логистическая система агропромышленного комплекса, функционирующая в условиях высокой динамики материальных потоков и стохастичности внешней среды.

Предмет исследования: модели и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений по оперативному управлению транспортными потоками и ресурсами в цепях поставок агропромышленного комплекса.

Рабочая гипотеза: Повышение эффективности и надежности функционирования транспортно-логистических систем АПК в условиях цифровой трансформации возможно за счет перехода от детерминированных алгоритмов управления к гибридным нейросимволическим архитектурам. Предполагается, что

интеграция методов семантического анализа неструктурированных данных и строгого математического аппарата оптимизации позволит преодолеть ограничения существующих систем диспетчеризации, не способных оперативно реагировать на стохастические возмущения внешней среды.

Реализация концепций ВЛО и 5PL требует создания интеллектуальной системы, в которой генеративные способности искусственного интеллекта ограничены и верифицируются онтологической моделью предметной области и методами исследования операций. Внедрение разработанной системы позволит обеспечить сокращение времени выработки управленческих решений и их точность, что приведет к достижению принципов доставки «Точно-в-срок»

Методологической основой для диссертационного исследования послужили:

1) Актуальные разработки отечественных и зарубежных ученых по теории транспортной логистики, системный анализ процессов управления материальными потоками в агропромышленном комплексе.

2) Методы технической кибернетики и теории автоматического управления, включая принципы ситуационного управления и организации обратных связей в сложных динамических системах необходимых при разработке новых логистических интеллектуальных информационных систем.

3) Методология онтологического инжиниринга и семантического моделирования для формализации знаний о предметной области и обеспечения интероперабельности информационных потоков.

4) Математический аппарат исследования операций, включая методы векторной оптимизации, теорию принятия решений в условиях неопределенности и методы районирования.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.9.9. «Логистические транспортные системы»:

1) Пункту 6. «Информационные системы управления элементами, подсистемами и транспортно-логистической системой в целом, включая цифровые и интеллектуальные технологии, телематику»;

2) Пункту 9. «Организационно-технологические решения в области интеллектуализации и цифровизации транспортно-логистических процессов, идентификации и мониторинга объектов и процессов»;

3) Пункту 12. «Надежность, безопасность реализации цепей в логистических транспортных системах и управление рисками».

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1) Концепция гибридной интеллектуальной системы управления транспортно-логистическими процессами, которая, в отличие от существующих детерминированных систем, базируется на нейросимволической архитектуре, что позволяет объединить преимущества языковых моделей в области анализа и обработки неструктурированных данных с точностью математической оптимизации, обеспечивая автоматизацию функций диспетчеризации в условиях высокой неопределенности.

2) Метод семантического моделирования транспортных систем АПК на основе технологии Ontology-Grounded RAG, отличающийся использованием формализованной онтологии в качестве жесткого каркаса для генеративных моделей, который обеспечивает интероперабельность разнородных источников данных и исключает генерацию технологически некорректных сценариев транспортировки.

3) Математическая модель многокритериального выбора сценариев, которая, учитывает физико-логистические свойства грузов (показатели качества) и стохастический характер внешних возмущений.

4) Алгоритм адаптивного управления транспортной системой на основе кибернетического контура обратной связи, предназначенный для реализации специализированным интеллектуальным агентом в составе системы. Алгоритм обеспечивает автоматическую корректировку параметров принятия решений и

весовых коэффициентов критериев эффективности по результатам анализа расхождений между плановыми и фактическими показателями логистического процесса.

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании гибридного нейросимволического подхода к управлению транспортно-логистическими системами АПК. Разработанная концепция интегрирует возможности мультиагентных систем на базе больших языковых моделей со строгим математическим аппаратом методов районирования и онтологическим моделированием, что позволяет преодолеть разрыв между семантической гибкостью обработки неструктурированных данных и необходимостью соблюдения жестких технологических ограничений в условиях высокой стохастичности внешней среды.

Практическая значимость работы. Разработанный программно-алгоритмический комплекс позволяет транспортно-логистическим предприятиям автоматизировать функции диспетчеризации, снизить задержку в принятии решения в нештатных ситуациях, повысить коэффициент использования пробега и сократить логистические издержки, связанные с потерей качества скоропортящейся продукции.

Положения, выносимые на защиту.

1) Архитектура гибридной ИСППР, базирующаяся на нейросимволическом подходе и каскадном взаимодействии пяти специализированных интеллектуальных агентов, обеспечивающая декомпозицию процесса принятия решений.

2) Доменная онтология «Логистика АПК», разработанная на основе стандартов ВФО и ГОСТ Р 59798-2021, выполняющая роль основы для интеграции производственного, транспортного и складского доменов и автоматической верификации физической реализуемости сценариев.

3) Математическая модель многокритериального выбора, использующая метод районирования, обеспечивающая принятие робастных (устойчивых) решений в условиях неопределенности вероятностей внешней среды при

одновременной оптимизации векторов времени, стоимости и сохранности качества груза.

4) Алгоритм реализации технологии Ontology-Grounded RAG (OG-RAG), выполняющий трансформацию неструктурированных данных в формализованные RDF-триплеты и генерацию гипотез посредством навигации по графу знаний, что ограничивает пространство порождаемых решений верифицированными фактами предметной области и препятствует формированию технологически некорректных сценариев транспортировки.

5) Методика адаптивного управления на основе кибернетического контура обратной связи, опирающаяся на уравнения Колмогорова для оценки пропускной способности узлов инфраструктуры и метод градиентного спуска для калибровки весовых коэффициентов системы по результатам анализа расхождений между плановыми и фактическими показателями.

Апробация результатов. Основные положения и результаты исследования докладывались

На конференциях:

— ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ Москва, 24 апреля 2025 года

— IEEE: 2025 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING MANAGEMENT OF COMMUNICATION AND TECHNOLOGY (EMCTECH) New York, 2025. С. 11220586

— X Международная научно-практическая конференция, приуроченная к 95-летию основания ФГБОУ ВО «СиБАДИ» АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ И ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКСЫ: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ, Омск, 04 декабря 2025 год

— I МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРАНЫ НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ И

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПЛАТФОРМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ РЕШЕНИЙ В АПК»
ФГБОУ ВО ГУУ 8 октября 2025 г.

Научном семинаре:

«СИНЕРГИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АПК. ОТ ДАННЫХ К РЕШЕНИЯМ»,
ГГНТУ им. Миллионщикова, г. Грозный. 11.09.2025 г.

На заседаниях кафедры:

Кафедра управления транспортными комплексами Института отраслевого менеджмента ФГБОУ ВО ГУУ.

Реализация результатов работы. Значимость результатов диссертационного исследования определяется следующим:

Теоретические результаты диссертационного исследования были использованы при реализации НИР «Обеспечение продовольственной безопасности страны на основе создания программно-аппаратных комплексов и интеллектуальных платформенных цифровых решений в сфере развития агропромышленных технологий полного жизненного цикла» (Грант «Крупный научный проект» Минобрнауки, соглашение от 25 апреля 2024 г. № 075-15-2024-542) на базе ГУУ, с 2024 г. по н.в.»

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, включая 4 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 6 публикаций в изданиях, индексируемых в международных базах данных, Белом списке, в изданиях РИНЦ и сборниках трудов научных конференций, в том числе получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Основной текст изложен на 176 страницах, содержит 24 рисунка и 21 таблицу. Список источников включает 94 наименования.

1. СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ АПК В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

1.1. Анализ особенностей функционирования и ограничений существующих моделей управления транспортно-логистическими системами агропромышленного комплекса

Современная парадигма развития транспортного комплекса Российской Федерации, закреплённая в Концепции научно-технологического развития транспортного комплекса Российской Федерации на период до 2035 года [1], постулирует безальтернативность перехода к моделям платформенной экономики и внедрению интеллектуальных систем управления, обеспечивающих технологический суверенитет страны. Как отмечают Трошин А.С., Новиков И.А., Блудян Н.О. и Линник В.Ю. [2], существующая архитектура управления грузопотоками в АПК характеризуется фрагментарностью и отсутствием единого контура принятия решений, способного организовывать разнородные процессы - от прогнозирования урожайности до мультимодальной транспортировки скоропортящейся продукции. Государственные информационные системы (ГИС ЭПД, «Национальная цифровая транспортно-логистическая платформа»), подробно проанализированные Глаголевым С.Н., Новиковым И.А., Блудяном Н.О. и Линником В.Ю. [3], успешно решают задачи мониторинга и фискального учета, формируя массивы данных, однако функционал оперативного диспетчирования и сценарного моделирования в данных системах отсутствует, что оставляет функцию принятия решений за человеком-оператором. Специфика функционирования транспортно-логистических систем в АПК характеризуется отличиями от аналогичных процессов в промышленном производстве или торговле, что подробно обосновывается в исследованиях Полуниной Н.Ю. [4]. Логистика АПК находится в прямой зависимости от неконтролируемых климатических факторов, фенофаз созревания культур, эпизоотической обстановки, а также прочих эндогенных и экзогенных факторов неопределенности. Данное обстоятельство переводит задачу

управления из плоскости классической оптимизации по критерию стоимости в плоскость управления рисками, где временной фактор приобретает критическое значение. Любая задержка в подаче транспортного средства, например, специализированного рефрижератора или зерновоза в период уборочной кампании, приводит не просто к простоем техники, а к необратимой потере потребительских свойств груза вследствие естественных биологических процессов порчи. В работах Карелиной М.Ю. и соавторов [5] предлагается концепция «агро-узла» как элемента периферийных вычислений, призванного собирать и агрегировать первичные телематические данные непосредственно в местах производства. Однако наличие массива «сырых» данных, генерируемых IoT-датчиками и системами мониторинга, само по себе не гарантирует эффективности управленческого процесса. Существует разрыв между уровнем сбора данных и уровнем принятия решений: традиционные ERP и TMS системы, базирующиеся на жестких алгоритмах линейного программирования, способны эффективно распределять ресурсы лишь в статических, заранее определенных условиях [6]. При возникновении нештатных ситуаций, требующих нелинейной логики и учета множества слабоформализуемых факторов таким, как: резкое изменение погодных условий, блокирующее подъездные пути к полям/узлам инфраструктуры, классические системы теряют устойчивость, требуя вмешательства человека для ручного перепланирования, что неизбежно влечет за собой временные потери и снижение общей эффективности цепочки поставок.

Эволюционные процессы трансформации организационно-технологических структур в логистике, проанализированные Блудяном Н.О., Линником Ю. Н., Степановым А.А., и Линником В.Ю [7], демонстрируют устойчивый вектор развития от провайдеров уровня 3PL, обеспечивающих комплексное физическое выполнение операций, к интеграторам цепей поставок (4PL) и далее - к виртуальным логистическим операторам уровня 5PL.

Концепция 5PL предполагает переход к полной автоматизации управления на основе единого информационного пространства, где оператор не владеет

физическими активами, но осуществляет алгоритмическую оркестрацию всех материальных потоков в интересах клиента.

В отличие от предшествующих моделей, где интеграция обеспечивалась исключительно организационными усилиями провайдера, пятый уровень логистического сервиса подразумевает выделение интеллектуальных систем и верхнеуровневых цифровых платформ в качестве самостоятельного, равноправного субъекта управления. Подобные макросистемы зачастую носят кросс-отраслевой характер, решая комплексные задачи управления производством, сбытом и распределением ресурсов, внутри которых маршрутизация и диспетчеризация подвижного состава выступают встроенными обеспечивающими подсистемами.

Делегирование управленческих функций алгоритмическому ядру меняет саму природу взаимодействия контрагентов. Цифровая среда в модели 5PL перестает быть пассивным инструментом мониторинга или агрегатором заявок, трансформируясь в активного участника цепи поставок, способного автономно генерировать управляющие воздействия. Интеграция транспортных процессов с неспецифичными для классической логистики параметрами - динамикой созревания культур, статусом работы элеваторного оборудования или изменениями климатического фона - формирует единый контур управления. В такой архитектуре подача транспортного средства синхронизируется с производственным циклом автоматически, исключая человека-оператора из рутинных процессов согласования и перемаршрутизации.

Для агропромышленного комплекса, характеризующегося множественностью контрагентов и сложностью маршрутов, модель 5PL представляется наиболее целевой, поскольку позволяет динамически перестраивать логистические цепочки в режиме реального времени, однако практическая реализация данного подхода сталкивается с отсутствием необходимого технологического ядра - интеллектуальной системы, способной заменить человека в задачах обработки неструктурированной информации и принятия решений в условиях высокой неопределенности.

Ситуация в контуре управления транспортными потоками дополнительно усложняется активным внедрением высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) и беспилотных авиационных систем (БАС), правовые и технические аспекты эксплуатации которых детально рассмотрены в работах Ризаевой Ю.Н. [8]. Интеграция робототехнических комплексов в единые логистические цепочки с пилотируемым транспортом приводит к кратному увеличению плотности информационного потока и требует реакции управляющей системы в режиме, близком к реальному времени. Беспилотный транспорт, являясь исполнительным механизмом, функционирует строго в рамках заложенных алгоритмов и требует внешнего целеполагания, а также динамической маршрутизации, учитывающей текущую дорожную обстановку, метеоусловия и состояние груза. В условиях смешанных транспортных парков человеческий ресурс в контуре диспетчеризации становится критическим «узким местом»: когнитивные способности оператора не позволяют обрабатывать массивы телематических данных с той скоростью, которая необходима для эффективного управления роем беспилотных средств. Задержка в принятии решения диспетчером нивелирует экономическую эффективность внедрения робототехники, так как простой дорогостоящего автономного оборудования в ожидании команды снижает рентабельность перевозок. Следовательно, переход к массовому использованию ВАТС и БАС в агрологистике невозможен без внедрения интеллектуальных автоматизированных систем, способных взять на себя функции оперативного управления и координации смешанных потоков.

С позиций кибернетики, управление транспортной системой АПК может быть описано как процесс регулирования по отклонению и возмущению, что подробно исследовано в работах Курганова В.М., Грязнова М.В., Рассоха В.И., и Дорофеева А.Н. [9-10]. Классический контур управления предполагает наличие обратной связи, на основе которой корректируются управляющие воздействия. Однако в текущей практике замыкание контура обратной связи (анализ причин отклонения план/факт и корректировка стратегии) осуществляется постфактум, зачастую с задержкой, превышающей время жизни управленческой ситуации, что

обуславливает переход к предиктивному ситуационному управлению [10], где система не просто реагирует на инцидент, а прогнозирует его возникновение на основе анализа слабых сигналов и паттернов, формируемых в информационном поле.

Анализ применимости современных методов искусственного интеллекта для решения обозначенных проблем выявляет фундаментальное противоречие. С одной стороны, генеративные нейросетевые модели (LLM) демонстрируют высокую гибкость в обработке естественного языка и неструктурированных данных. С другой стороны, векторные представления (*в англ. Литературе - embeddings*), лежащие в основе современных поисковых систем (RAG), математически ограничены в способности корректно обрабатывать сложные логические запросы и многофакторные зависимости, демонстрируя точность ниже 20% на задачах со сложной композиционной структурой [11-15]. Применение «чистых» нейросетевых подходов в задачах управления материальными потоками АПК недопустимо из-за риска возникновения «галлюцинаций» и отсутствия гарантий соблюдения жестких технологических ограничений.

Для формализации выявленных структурных и технологических ограничений, препятствующих переходу к адаптивным моделям управления в агропромышленном комплексе, целесообразно систематизировать результаты анализа предметной области и существующих методологических подходов. Обобщенные данные, характеризующие текущее состояние проблемы, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Систематизация выявленных ограничений в управлении транспортно-логистическими системами АПК

Группа источников	Ключевые положения и текущий статус	Выявленные ограничения и методологические разрывы	Импликация для диссертационного исследования
Нормативно-стратегический базис (Концепция развития до 2035 г. [1], Глаголев С.Н. [2])	Императив перехода к платформенной экономике и технологическому суверенитету. Внедрение ГИС для мониторинга и учета.	ГИС функционируют как системы регистрации фактов, не обладая функционалом оперативного принятия управленческих решений и сценарного моделирования.	Необходимость создания интеллектуальной надстройки (СППР) над существующими ГИС для трансформации данных в управленческие решения.
Фундаментальные ограничения ИИ (Weller et al. [14], Терентьев А.В. [15])	Доказанная математическая ограниченность векторных представлений (embeddings) в задачах сложной логики. Классификация ИС по уровням зрелости.	Невозможность использования «чистых» нейросетевых моделей для управления критическими процессами из-за риска галлюцинаций и низкой точности ранжирования.	Обоснование гибридной архитектуры: каскад агентов для семантического анализа и детерминированный математический аппарат для верификации.
Специфика предметной области (АПК) (Полунина Н.Ю. [4], Карелина М.Ю. [3], Ризаева Ю.Н. [13])	Высокая стохастичность среды (погода, биологические циклы). Внедрение IoT («агро-узлы») и беспилотных систем (ВАТС/БАС).	Разрыв между объемом собираемых телематических данных и скоростью их обработки человеком-диспетчером. Отсутствие инструментов управления смешанными парками.	Потребность в полной автоматизации диспетчеризации через интеллектуальных агентов, способных работать в режиме реального времени.
Методы управления и Кибернетика (Курганов В.М. [8], Блудян Н.О. [10], Халтурин Р.А. [6])	Кибернетические модели с обратной связью. Концепция 5PL-операторов. Математические методы оценки эффективности.	Классические методы управления эффективны в статике, но теряют устойчивость в динамике без постоянного пересчета. Обратная связь замыкается через человека, что вносит задержки.	Реализация кибернетического контура через агента-«Учителя» и использование жесткой математики для динамической оптимизации сценариев.

Проведенная систематизация позволяет сформулировать следующие выводы, определяющие вектор дальнейшего исследования:

1. Существуют противоречие между требованиями к оперативности принятия решений в условиях логистики АПК и возможностями традиционных детерминированных алгоритмов и информационных систем, не обладающих достаточной гибкостью для обработки неструктурированных данных и нештатных ситуаций. Одновременно с этим, применение генеративных моделей в «чистом» виде ограничено их математической неспособностью гарантировать точность и соблюдение жестких технологических ограничений, что критично для материальных потоков.

2. Переход к моделям нового уровня невозможен без создания гибридных интеллектуальных систем, объединяющих способности ИИ-агентов (для семантического анализа и работы с контекстом) и строгий математический аппарат (для верификации решений и оптимизации), главным образом из-за отсутствия подобных решений на текущем этапе развития отрасли.

Сформированное проблемное поле, характеризующееся экспоненциальным ростом объема входящих данных и ограниченными когнитивными возможностями диспетчерского персонала в условиях отсутствия адекватных средств автоматизации принятия решений, визуализировано на рисунке 1.1.

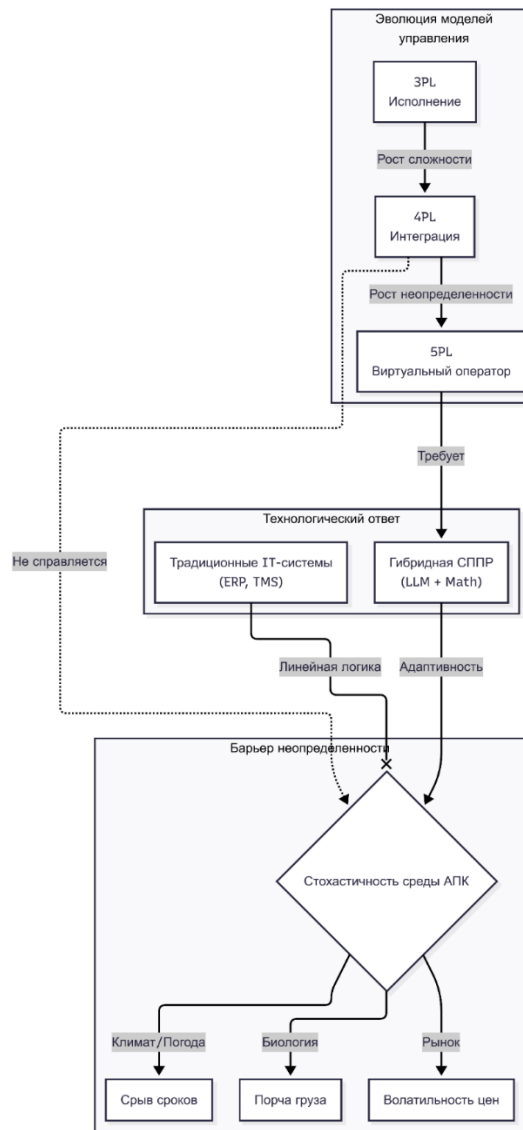


Рисунок 1.1 – Проблемное поле управления транспортно-логистическими системами АПК в условиях неопределенности

Научная проблема заключается в противоречии между необходимостью перехода к высокоадаптивным моделям управления уровня 5PL в условиях высокой неопределенности среды АПК и отсутствием инструментария, объединяющего когнитивную гибкость генеративного ИИ с надежностью и точностью детерминированных математических методов. Решение данной проблемы видится в разработке гибридной интеллектуальной системы, основанной на каскадной архитектуре агентов и онтологическом моделировании предметной области [12].

1.2. Эволюция организационно-управленческих структур от 3PL к 5PL и экосистемным моделям в условиях стохастичности среды

Потенциала экстенсивного роста, основанного исключительно на минимизации издержек, вынуждает агропромышленный комплекс отказываться от линейных дискретных операций. Фокус управления цепями поставок смещается в сторону интегрированных сетевых моделей, способных адаптироваться к внешним возмущениям. Классическая маршрутизация материального потока через жестко детерминированные узлы (производитель – элеватор – переработчик – ритейлер) предполагает локальную оптимизацию каждого этапа, что может формировать уязвимость логистической сети на фоне высокой неопределенности среды. Возникает необходимость в переходе к сетевой архитектуре, где генерация и выбор альтернативных сценариев транспортировки осуществляются динамически, опираясь на текущее состояние системы.

Модели исследованные в трудах Блудяна Н.О. и Линника В.Ю. [7], формирует методологический базис для классификации уровней зрелости управленческих структур. Делегирование операционного функционала специализированному подрядчику определяет базовую интеграционную модель 3PL (Third Party Logistics). Провайдер данного уровня оперирует собственными физическими активами – транспортным парком и складскими мощностями, концентрируясь на физическом исполнении логистических задач.

В контексте АПК модель 3PL обеспечивает надежное выполнение физических операций (транспортировка зерна, хранение овощей), однако она функционально ограничена рамками конкретного контракта. Провайдер 3PL оптимизирует собственные процессы (загрузку транспорта, оборачиваемость склада), но не несет ответственности за эффективность всей цепочки создания стоимости. В условиях фрагментации рынка АПК это приводит к субоптимизации: локальная эффективность перевозчика может достигаться в ущерб сохранности груза или срокам доставки, критичным для заказчика. Взаимодействие строится на

жестких контрактах, не предполагающих оперативной реакции на изменения внешней среды (Рисунок 1.2).

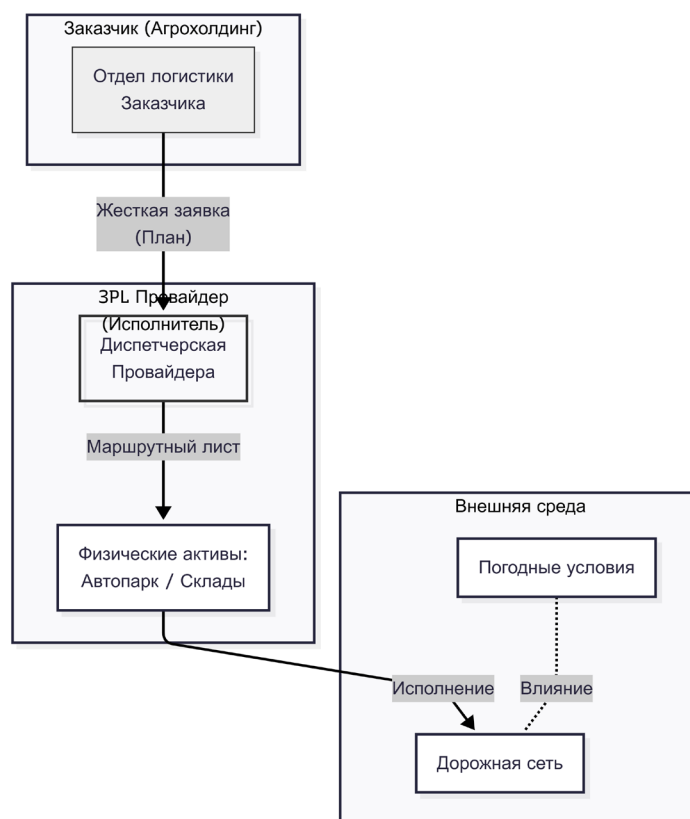


Рисунок 1.2 - Схема взаимодействия участников цепи поставок в рамках логистической модели 3PL

Переход к уровню **4PL** (англ - *Fourth Party Logistics*), выступающему в роли системного интегратора, призван решить проблему фрагментации. 4PL-провайдер консолидирует ресурсы, возможности и технологии собственной организации с ресурсами и технологиями других поставщиков услуг (3PL) для проектирования и управления комплексными решениями для всей цепи поставок. Теоретически, 4PL-модель должна обеспечивать «единое окно» управления и прозрачность процессов. Однако, как показывает анализ операционной деятельности, в условиях высокой неопределенности, присущей агрологистике, модели 3PL и 4PL демонстрируют ограниченную эффективность ввиду того, что управление в данных структурах базируется на детерминированных контрактах, жестких регламентах и заранее утвержденным маршрутным картам.

Нештатные ситуации в агропромышленном комплексе - климатические аномалии, эпизоотические карантинные или резкие скачки цен - носят системный характер. Постоянное воздействие этих факторов делает классические детерминированные подходы неэффективными. При возникновении инцидента жесткая контрактная связка между 4PL-интегратором и 3PL-перевозчиком дает сбой, поскольку изначально не содержит алгоритмов мгновенной адаптации маршрутов.

Разрешение логистических коллизий вынужденно переходит в ручной режим. Реактивность такой модели управления зависит от пропускной способности человека-оператора, что о Итоговая задержка управляющего воздействия аккумулирует время на физическое обнаружение проблемы, когнитивный анализ ситуации диспетчером и последующую коммуникацию с подрядчиками для пересогласования условий. В реалиях логистики АПК подобные временные разрывы приводят к прямым финансовым потерям и порче продукции.

В условиях логистики АПК, такая задержка реакции (отклик системы) часто приводит к порче продукции. Человек становится «узким местом», не способным обрабатывать растущий поток данных от IoT-устройств в реальном времени (Рисунок 1.3).

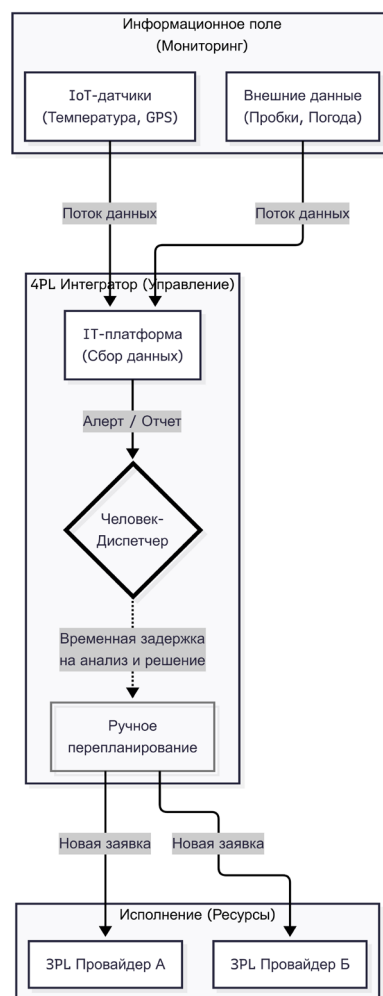


Рисунок 1.3 - Ограничения оперативности диспетчеризации материальных потоков в модели 4PL

Целевой моделью развития отрасли, согласно современным исследованиям, является переход к уровню 5PL (*англ – Fifth Party Logistics*) – виртуальному логистическому оператору, осуществляющему оркестрацию материальных потоков на основе единого информационного пространства без обязательного владения физическими активами. Концепция 5PL предполагает, что управляющая система способна как агрегировать данные от участников цепи, так и генерировать оптимальные сценарии реагирования в режиме реального времени. Однако практическая имплементация модели 5PL в агропромышленном секторе сталкивается с проблемой интерпретации гетерогенных данных. Как отмечают Трошин А.С. и Новиков И.А. [2], региональные логистические системы представляют собой сложные экосистемы, включающие производителей,

переработчиков, элеваторы и транспортные компании, каждый из которых оперирует в собственной информационной среде. В условиях отсутствия семантической интероперабельности между участниками, «виртуальный оператор» сталкивается с потоком неструктурированной информации, которую традиционные алгоритмические методы не способны обработать без участия человека, что блокирует переход к полноценному 5PL-управлению.

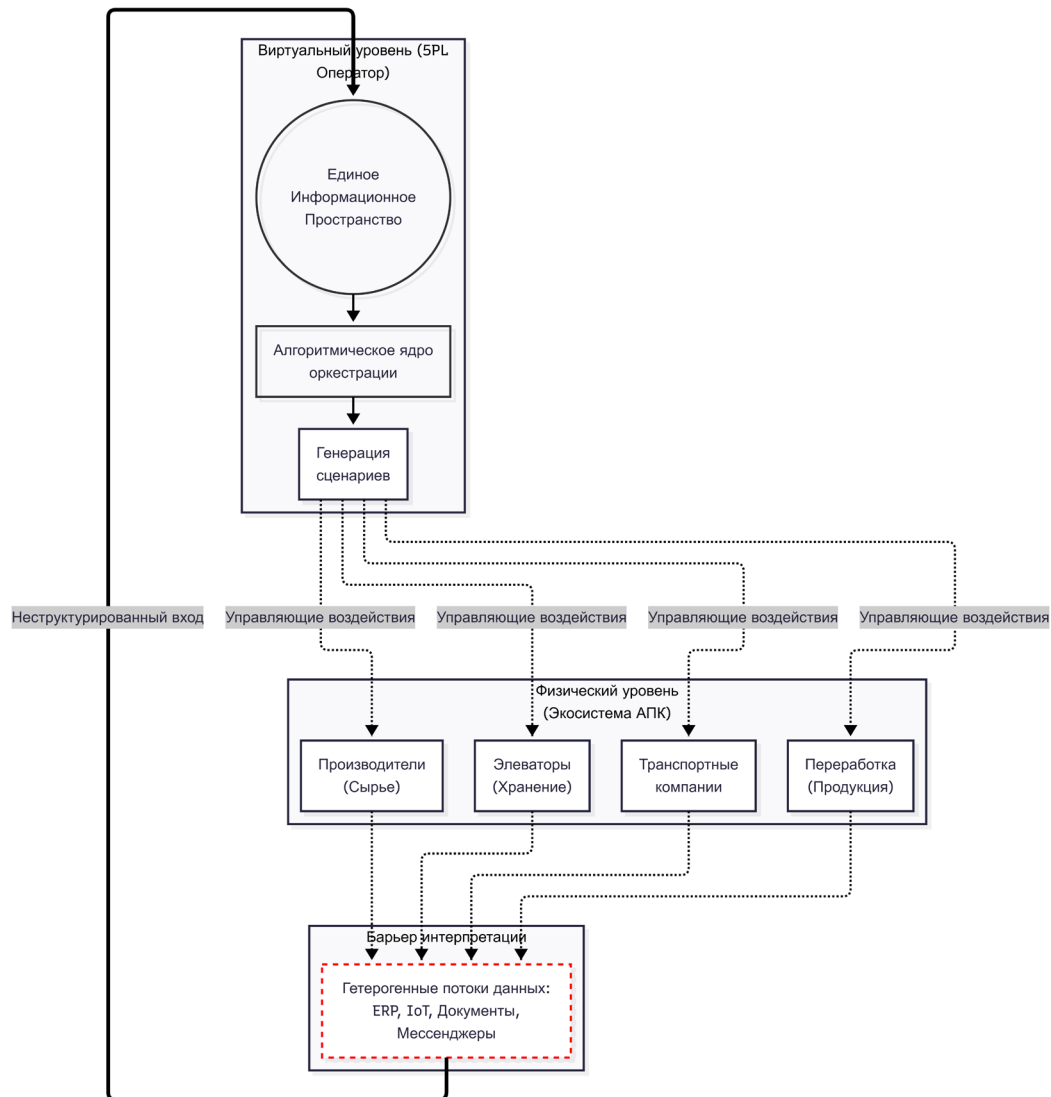


Рисунок 1.4 - Целевая архитектура управления информационными и материальными потоками виртуальным оператором (модель 5PL)

Независимо от концепции, нужно отметить, что фактор неопределенности в логистике АПК носит системный характер и требует дифференцированного подхода к анализу. Целесообразно выделить экзогенные и эндогенные источники

стохастичности (таблица 1.2). Экзогенные факторы, такие как климатические условия или регуляторные изменения, формируют внешние ограничения, требующие мгновенной перемаршрутизации потоков. Эндогенные факторы, включая операционные сбои техники или информационную асимметрию, возникают внутри системы. Существующие системы управления способны эффективно работать лишь со структурированной неопределенностью (рисками, имеющими статистическое распределение), в то время как реальная эксплуатация характеризуется наличием неструктурированной неопределенности (событиями, не имеющими исторических прецедентов или описанными на естественном языке). Именно неспособность классических управленческих структур 4PL обрабатывать неструктурированную неопределенность диктует необходимость внедрения когнитивных агентов.

Таблица 1.2 - Классификация источников неопределенности в транспортно-логистических системах АПК и ограничения традиционных моделей управления

Тип неопределенности	Источник возмущения	Характеристика данных	Ограничение моделей 3PL/4PL
Экзогенная (Внешняя)	Климатические факторы (осадки, температура)	Слабоструктурированные (метеопрогнозы, сводки)	Невозможность динамического перепланирования без участия диспетчера
	Рыночная конъюнктура (волатильность цен, спрос)	Структурированные / Неструктурированные	Задержка в реакции на изменение маржинальности маршрутов
	Регуляторная среда (санкции, квоты, тарифы)	Неструктурированные (тексты НПА, новости)	Отсутствие механизмов автоматического учета новых ограничений
Эндогенная (Внутренняя)	Операционные сбои (поломки, простои)	Телематические данные (IoT), текстовые отчеты	Реактивное управление (постфактум), отсутствие предиктивности
	Информационная асимметрия	Разрозненные форматы данных участников	Потеря времени на ручную верификацию и согласование данных

Развитие экосистемного подхода [2], предполагает интеграцию транспортной логистики с производственными и сбытовыми процессами в единый контур. В такой конфигурации транспортная система перестает быть обеспечивающей функцией и становится драйвером создания добавленной стоимости. Однако масштабирование экосистемы неизбежно ведет к экспоненциальному росту количества связей и транзакций. В условиях, когда каждый участник экосистемы (от фермерского хозяйства до портового терминала) генерирует поток событийной информации, централизованное управление через диспетчерские центры становится невозможным из-за когнитивных ограничений персонала. Возникает управленческий разрыв: организационная структура стремится к сетевой модели 5PL, требующей высокой скорости реакции, в то время как технологический базис остается на уровне автоматизации учетных функций, не обеспечивая интеллектуальной поддержки принятия решений.

Особую остроту проблема оперативного управления приобретает в контексте конвергенции глобальных трендов на экологизацию транспортных процессов и повсеместного внедрения принципов «Точно-в-срок» (англ. - Just-In-Time, JIT). В работах Полуниной Н.Ю. [4] данные направления определены как доминирующие векторы развития отрасли, однако в специфических условиях агропромышленного комплекса концепция JIT трансформируется из методики минимизации складских запасов в императив сохранения биологической ценности продукции. Внедрение ESG-принципов совместно с жесткими требованиями ритейла к временным окнам доставки трансформирует классическую однокритериальную задачу минимизации расходов в сложную задачу многокритериальной векторной оптимизации. Целевая функция управления $F(x)$ перестает быть скалярной и принимает вид вектора, компоненты которого могут варьироваться в зависимости от контекста:

$$F(x) \rightarrow \text{opt}\{C(x), T_{\Delta}(x), E(x), Q(x), R(x), \dots\} \quad (1.1)$$

где: $C(x)$ - прямые транспортно-логистические издержки (фрахт, топливо, платные дороги);

$T_{\Delta}(x)$ - отклонение фактического времени прибытия от планового временного окна (критерий JIT), минимизация которого критична для исключения

штрафов и простоев на пандусе; $E(x)$ - углеродный след и экологическая нагрузка (ESG-фактор);

$Q(x)$ - функция потери качества груза, зависящая от времени и условий транспортировки (температурный интеграл);

$R(x)$ - ситуативный критерий оценки рисков (вероятность срыва рейса из-за погодных или дорожных условий).

Приведённый перечень критериев не является исчерпывающим и носит опциональный характер. Для Весовые коэффициенты при каждом из параметров изменяются динамически в зависимости от управленческой ситуации (например, в период пикового спроса приоритет $T_{\Delta}(x)$ и $Q(x)$ доминирует над $C(x)$ и $E(x)$). В условиях логистики АПК данные критерии часто находятся в состоянии антагонизма: обеспечение жесткого соблюдения ЛТ-графика для сохранения качества продукции неизбежно влечет за собой необходимость использования скоростных режимов или неполной загрузки транспортных средств, что приводит к росту топливопотребления и, как следствие, увеличению выбросов CO_2 .

Для человека-диспетчера решение задачи поиска парето-оптимального варианта в многомерном пространстве критериев в режиме реального времени является когнитивно невыполнимой задачей. Ситуация усугубляется дискретностью и высокой частотой поступления вводных данных. Существующие алгоритмы маршрутизации, такие как вариации задачи коммивояжера (VRP - Vehicle Routing Problem), применяемые в системах класса 4PL, базируются на статическом графе дорожной сети и детерминированных расписаниях. Они способны найти глобальный оптимум на этапе предварительного планирования (за сутки или смену), однако в момент исполнения рейса система сталкивается с динамическими возмущениями, которые не могут быть аппроксимированы статистическими моделями. Телематические датчики (IoT) фиксируют выход температуры в рефрижераторе за допустимые пределы, что немедленно изменяет весовой коэффициент критерия сохранности груза $Q(x)$. Дорожные сервисы сообщают о заторе, что требует переоценки критерия времени доставки $T_{\Delta}(x)$. Заказчик меняет временное окно приемки, что делает текущий маршрут

невалидным с точки зрения ЛТ. В текущей архитектуре 4PL пересчет маршрута («перепланирование») требует остановки процесса, выгрузки новых данных и запуска алгоритма заново, что занимает время, критичное для биологически активных грузов. Возникает эффект «замороженного решения», когда транспортное средство продолжает движение по субоптимальному маршруту, так как система управления обладает слишком высокой инерционностью.

Для систематизации различий между традиционным и требуемым подходами к оптимизации составлена сравнительная таблица 1.3.

Таблица 1.3 - Сравнительный анализ парадигм оптимизации транспортных процессов в системах 4PL и перспективных системах 5PL

Характеристика процесса управления	Традиционная модель (4PL / TMS)	Целевая модель (5PL / Интеллектуальная СППР)
Тип оптимизации	Статическая / Периодическая (Batch processing)	Динамическая / Событийная (Real-time event driven)
Целевая функция	Однокритериальная (обычно Cost-min) или с фиксированными весами	Многокритериальная адаптивная (динамические веса в зависимости от контекста)
Реакция на инцидент	Алерт (уведомление) диспетчеру -> Ручное решение	Автоматическая генерация и верификация альтернативного сценария
Учет контекста	Ограничен структурированными полями БД	Полный семантический анализ (включая неструктурированные данные)
Латентность (Задержка)	Высокая (минуты/часы)	Сверхнизкая (секунды/доли секунд)
Роль человека	Генератор решения и валидатор	Валидатор (в критических случаях) или Наблюдатель

Эволюция организационно-управленческих структур в логистике АПК достигла точки бифуркации, где экстенсивные методы повышения эффективности (централизация закупок, укрупнение партий, давление на тарифы перевозчиков) полностью исчерпали свой ресурс. Дальнейшее снижение издержек и повышение уровня сервиса возможно лишь за счет интенсивной технологической трансформации - перехода к модели 5PL (*англ - Fifth Party Logistics*). В отличие от 4PL, где интегратор управляет цепью поставок с помощью разрозненных IT-инструментов и штата сотрудников, 5PL подразумевает создание виртуального

логистического оператора, функционирующего в едином информационном пространстве на базе алгоритмического ядра. Однако, как показал анализ, «чистая» математика не справляется с семантической сложностью среды, а «чистые» нейросети - с точностью.

Переход к экосистемному взаимодействию, где транспортная логистика интегрирована с производственными системами и торговыми площадками, требует качественного скачка: перехода от автоматизации процессов (учет, документооборот) к автоматизации принятия решений. Это обосновывает необходимость разработки и внедрения гибридной интеллектуальной системы, архитектура которой базируется на каскаде автономных агентов. В данной парадигме функции оперативного реагирования на неструктурированную неопределенность (интерпретация причин задержки, анализ текстовых условий приемки, оценка рисков погоды) делегируются агентам на базе больших языковых моделей (LLM), способным извлекать смысл из контекста. Полученные сценарии верифицируются жестким математическим аппаратом. Подобный подход обеспечивает реализацию принципов ситуационного управления на качественно новом технологическом уровне: система не просто классифицирует ситуацию по заранее заданному шаблону, а генерирует уникальное управляющее воздействие, адаптированное к текущему моменту времени, обеспечивая тем самым гомеостаз транспортно-логистической системы в условиях турбулентной внешней среды.

1.3. Анализ применимости методов искусственного интеллекта в транспортной логистике: возможности и фундаментальные ограничения

Внедрение методов искусственного интеллекта (ИИ) в контур управления транспортно-логистическими системами традиционно развивалось в парадигме «слабого ИИ», ориентированного на решение узкоспециализированных задач прогнозирования и классификации. Как отмечается в обзоре Мехдиевой И.И. и Степанова А.А. [13], технологии машинного обучения и компьютерного зрения успешно применяются для предиктивной аналитики спроса, оптимизации

складских запасов и мониторинга состояния водителей. Однако переход к моделям управления уровня 5PL, требующим автоматической генерации сложных управленческих решений в условиях неструктурированной неопределенности, актуализирует применение генеративных нейросетевых моделей (*англ. Large Language Models - LLM*). Способность LLM к семантическому анализу естественного языка и обобщению разнородной информации создает предпосылки для автоматизации функций диспетчера-логиста. Тем не менее, некритичное внедрение генеративных моделей в важные процессы управления материальными потоками несет в себе системные риски, обусловленные архитектурными особенностями нейросетей.

Прямая интеграция современных нейросетевых архитектур (в частности, трансформеров) в контур управления критическими процессами невозможна из-за их устройства, поскольку вероятностный механизм предсказания токенов фундаментально противоречит требованиям транспортной логистики и любой другой отрасли в вопросе надежности и воспроизводимости того или иного решения в одинаковых условиях. Иными словами, языковая модель может генерировать правдоподобные, но зачастую физически нереализуемые сценарии (эффект «галлюцинаций»), что недопустимо для агропромышленного комплекса ввиду жесткого нормативного регулирования перевозок [14]. Обученная на общих массивах данных нейросеть способна проложить маршрут без учета сезонного закрытия дорог, осевых нагрузок или правил товарного соседства (например, допустив совместную перевозку продуктов питания и бытовой химии). На уровне 5PL-оператора такие ошибки трансформируются из математических погрешностей в реальные юридические коллизии, штрафы и порчу груза. Дополнительную проблему создает теоретический предел точности векторных представлений, используемых в системах Retrieval-Augmented Generation (RAG) [11]. Компрессия семантики до числового массива фиксированной размерности ведет к потере информации о строгих логических связях и иерархии объектов. «Чистые» векторные модели не способны корректно обрабатывать профессиональные

логистические запросы с множественными отрицаниями, жесткими численными диапазонами или сложными условными зависимостями.

Показательным примером служит высокая косинусная близость понятий «рефрижератор» и «изотермический фургон». В многомерном пространстве эти термины семантически родственны, однако технологически они абсолютно не взаимозаменяемы при транспортировке замороженной продукции на дальние расстояния. Опираясь исключительно на векторное сходство, поисковый алгоритм выдаст нерелевантный тип подвижного состава, спровоцировав нарушение температурной цепи. Эмпирические замеры подтверждают катастрофическое падение точности поиска на базе стандартных эмбедингов при любом усложнении структуры запроса, требующем одновременного учета атрибутивных и реляционных ограничений.

Рассмотрим типовой запрос диспетчера АПК: «Найти зерновоз с боковой разгрузкой, объемом кузова не менее 40 куб. м, имеющий пропуск на МКАД, готовый к погрузке в радиусе 50 км от элеватора, исключая перевозчиков с рейтингом надежности ниже 4.5». Для векторной модели такая композиция требований представляет собой неразрешимую задачу, так как требует одновременного учета топологических, технических и репутационных параметров. Точность (параметр Recall) в подобных сценариях падает ниже 20% [11]. В условиях промышленной эксплуатации, где цена ошибки - простой уборочного комбайна или срыв экспортного контракта, такая надежность системы неприемлема.

Ситуация усугубляется влиянием субъективного фактора на этапе ввода данных. В условиях высокой психоэмоциональной нагрузки диспетчерский персонал склонен к совершению когнитивных ошибок: опечаткам в наименованиях географических объектов (топонимах), некорректному указанию весогабаритных характеристик или использованию профессионального сленга, не зафиксированного в обучающей выборке модели. Генеративная модель, ориентированная на максимизацию вероятности следующего токена и лишенная механизма фактчекинга, в ответ на ошибочный запрос (например, указание

несуществующего населенного пункта или противоречивых требований к температурному режиму) не инициирует процедуру уточнения, а генерирует правдоподобный, но технологически абсурдный сценарий. Это приводит к каскадным сбоям: маршрутизации транспортного средства в пункт назначения с аналогичным названием в другом регионе, подаче подвижного состава, не соответствующего классу опасности груза, или нарушению норм совместимости товарных партий. Отсутствие механизма жесткой логической верификации и онтологического контроля входных данных в векторных моделях делает невозможным их использование в качестве единственного звена принятия решений, требуя введения дополнительных детерминированных контуров валидации.

Для систематизации возможностей и ограничений различных классов ИИ-технологий в контексте задач агрологистики составлена таблица 1.4.

Таблица 1.4 - Сравнительный анализ применимости классов технологий ИИ для задач управления транспортно-логистическими системами АПК

Класс технологий ИИ	Типовые задачи (Capabilities)	Фундаментальные ограничения (Limitations)	Риск для логистики АПК
Машинное обучение	Прогноз спроса, расчет времени прибытия (ETA), скоринг надежности.	Зависимость от исторических данных. Неспособность обрабатывать новые типы инцидентов.	Ошибки при резком изменении условий (климат, санкции).
Компьютерное зрение	Контроль качества груза, мониторинг состояния водителя, считывание номеров.	Узкая специализация. Отсутствие понимания контекста ситуации.	Локальная оптимизация без учета системных связей.
Генеративные модели	Интерпретация текстов, общение с клиентами, генерация отчетов.	Стохастичность (галлюцинации). Отсутствие актуальных знаний. Слабая арифметика.	Генерация юридически или физически невыполнимых маршрутов.
Генеративные модели + Векторный поиск	Поиск похожих ситуаций, работа с базами знаний.	Потеря логических связей при векторизации. Низкая точность на композиционных запросах.	Выбор нерелевантного транспортного средства или маршрута.

Проблема актуальности знаний является еще одним барьером. Базовые LLM обучены на статичном датасете и не обладают информацией о текущем состоянии

системы (положение транспорта, погода, биржевые цены). Стандартным решением является использование технологии RAG, подгружающей контекст из внешних баз данных. Однако, как следует из анализа [15], классический RAG, основанный на семантической близости векторов, часто извлекает нерелевантный контекст, если запрос содержит специфическую отраслевую терминологию или сложные причинно-следственные связи. В логистике АПК, где понятие «совместимость грузов» или «температурный режим» имеет строгую нормативную дефиницию, семантической близости недостаточно - необходима онтологическая точность.

Преодоление описанных ограничений возможно лишь в рамках нейросимволического подхода, объединяющего нейросетевые методы и алгоритмы с технологиями онтологического моделирования и графами знаний [16]. В данной парадигме LLM используется не как генератор конечного решения, а как интерфейс для перевода неструктурированной задачи в формальное представление, которое затем обрабатывается детерминированными алгоритмами. Перспективным направлением, является концепция *Ontology-Grounded RAG* (англ - *OG-RAG*), где поиск информации и генерация ответа ограничиваются и направляются жесткой онтологической моделью предметной области. Онтология выступает в роли «семантического каркаса», гарантирующего, что сгенерированный сценарий не нарушает физических законов и бизнес-правил логистики.

Сравнительный анализ подходов и механик работы с генеративными моделями представлен в таблице 1.5.

Таблица 1.5 - Подходы и механики работы с генеративными моделями

Характеристика	Чистый LLM (Zero-shot)	Классический RAG (Vector-based)	Гибридный подход (Ontology-grounded + Math)
Источник знаний	Веса модели (статичные)	Векторная БД (фрагменты текста)	Онтология + ГИС + Оперативные данные
Механизм вывода	Вероятностная генерация токенов	Генерация на основе найденного контекста	Логический вывод + Математическая оптимизация
Проверяемость	Низкая («Черный ящик»)	Средняя (ссылки на источники)	Высокая (верификация через мат. модель)
Применимость в 5PL	Недопустима (риски)	Ограничена (справочная функция)	Целевая архитектура

Изолированное применение генеративных сетей или классических алгоритмов машинного обучения не способно обеспечить надежность управления транспортными потоками АПК. Архитектура системы требует перехода к гибриднему формату с четким разделением ответственности, где обработка неструктурированных массивов данных и когнитивная адаптивность делегируются LLM-агентам, верификация же сгенерированных гипотез, как и поиск итогового оптимума, остаются в зоне ответственности детерминированного математического аппарата и онтологических моделей.

Данный вывод служит основанием для формулирования концепции интеллектуальной системы поддержки принятия решений.

1.4. Концепция интеллектуальной системы поддержки принятия решений на основе каскадной архитектуры

Синтез результатов анализа предметной области, выполненного в предыдущих разделах, позволяет сформулировать научную гипотезу, заключающуюся в использовании вместо уязвимых монолитных генеративных моделей, архитектуры, которая бы встраивалась по гибриднему принципу. Когнитивные способности искусственного интеллекта декомпозируются на функционально обособленные части, которые соответствуют определенным типам агентов.

Сама концепция интеллектуальной системы (ИСППР) реализует каскадную обработку информации. Двигаясь по цепочке агентов, данные теряют энтропию, что кратно повышает достоверность итогового управляющего воздействия. Разрабатываемая модель обладает семантической пластичностью - она свободно интерпретирует неструктурированные данные, сохраняя абсолютную математическую строгость на этапе финального утверждения решений.

Вектором оптимизации в разрабатываемой системе, определяется эффективность согласно на концепции «Точно-в-срок» (*англ. – Just-In-Time сокр. JIT*). Отклонение от временного окна доставки (ΔT) напрямую коррелирует с

потерей потребительских свойств груза, следовательно, целевая функция эффективности системы E_{sys} носит векторный характер, где доминантой выступает минимизация временных отклонений при соблюдении ограничений по стоимости и качеству:

$$E_{sys} = \langle \min(\Delta T), \min(C), \max(Q), \min(R) \rangle \quad (1.2)$$

где: C - транзакционные издержки,

Q - показатель сохранности качества,

R - интегральная оценка рисков.

Приоритезация компонентов вектора осуществляется динамически в зависимости от контекста, задаваемого онтологической моделью (например, в период уборочной кампании вес ΔT стремится к максимуму).

Показатель сохранности качества Q представляет собой функцию, зависящую от совокупности физико-логистических характеристик перевозимой продукции. На примере логистики зерновых культур (пшеница, кукуруза, подсолнечник) к таким параметрам относятся: *влажность* (W), *температура зерновой массы* (θ), *насыпная плотность* (ρ) и *скважистость* груза. Взаимодействие данных параметров во времени определяет интенсивность биохимических процессов (дыхание зерна, развитие микрофлоры), приводящих к самосогреванию и порче груза. Функция качества Q в момент доставки t_{end} может быть описана как остаточный ресурс потребительских свойств:

$$Q(t_{end}) = Q_{initial} - \int_0^{T_{plan} + \Delta T} \lambda(W, \theta, \rho) dt \quad (1.3)$$

где: $\lambda(W, \theta, \rho)$ - функция интенсивности потери качества (скорость деградации), зависящая от текущих физико-логистических параметров

$(T_{plan} + \Delta T)$ - фактическое время транспортировки.

Задача соблюдения принципов ЛТ в логистике АПК сводится к обеспечению условия, при котором фактическое время доставки (в рамках транспортной составляющей) не превышает критический период безопасного хранения груза в кузове транспортного средства (инкубационный период самосогревания τ_{crit}).

Данное ограничение вводит зависимость между логистическими и физическими параметрами:

$$T_{plan} + \Delta T \leq \tau_{crit}(W, \theta) \quad (1.4)$$

Нарушение данного неравенства вследствие логистических задержек (ΔT) приводит к обнулению показателя качества ($Q \rightarrow 0$). Аналогичные ограничения могут относиться к складской и операционной деятельности в рамках функционирования транспортно-логистического комплекса.

Архитектурным ядром предлагаемой ИСППР является каскад из пяти специализированных интеллектуальных агентов, функционирующих в едином онтологическом пространстве. Необходимость введения расширенного набора агентов, по сравнению с классической кибернетической триадой «Восприятие - Анализ - Действие», обусловлена стохастической природой генеративных моделей. В классических детерминированных системах этап «Анализ» гарантированно приводит к логически верному выводу при корректных входных данных. В случае использования LLM этап анализа (генерации решения) является вероятностным процессом, подверженным риску возникновения семантических и логических ошибок («галлюцинаций») [11]. Для купирования данного риска применяется принцип декомпозиции рассуждений [12, 17] : процесс принятия решения разбивается на атомарные операции, каждая из которых контролируется отдельным агентом с жестко заданными параметрами генерации. Гиперпараметром, определяющим поведение агента, выступает «температура» (T) - коэффициент, описывающий и масштабирующий распределение вероятностей перед применением Softmax-функции при выборе следующего токена. Низкие значения ($T \rightarrow 0$) делают модель детерминированной и консервативной, выбирающей наиболее вероятные токены, тогда как повышение T увеличивает энтропию выхода, способствуя вариативности и креативности, но снижая точность.

Первичный контур защиты от ошибок формирует Агент-Валидатор. Модуль не обращается к внешней среде для проверки фактической истинности, а оценивает исключительно внутреннюю согласованность сгенерированного ответа. Механизм опирается на анализ распределения логитов – векторных предсказаний нейросети

до их нормализации. Плоское распределение (модель присваивает близкие вероятности взаимоисключающим токенам) или превышение порогового значения энтропии прямо указывают на высокий риск галлюцинации. Обнаружив неуверенность модели, Валидатор блокирует сценарий и запускает повторную генерацию либо запрашивает уточняющие данные. Строгость проверки обеспечивается жестким температурным диапазоном генерации ($T \in [0.15; 0.2]$).

Семантический контроль делегирован Агенту-Судье. Этот уровень верификации отсекает алогизмы (например, прибытие груза до момента его погрузки) и проверяет соответствие гипотезы онтологическим правилам предметной области. Интерпретация сложных контекстуальных зависимостей требует расширения когнитивной гибкости, поэтому температурный параметр Судьи повышен до $T \in [0.25; 0.35]$. Сценарий, успешно прошедший двойную фильтрацию, получает статус допустимого решения и направляется в математическое ядро. Подобная архитектура отсекает до 90% ошибочных генераций еще до запуска ресурсоемких вычислений.

Купирование стохастичности LLM достигается прецизионной настройкой гиперпараметров декодирования. Помимо температуры, масштабирующей логиты, вводится жесткое ограничение выборки токенов через механизм Nucleus Sampling (Тор-Р). Отсечение «длинного хвоста» маловероятных токенов блокирует генерацию абсурдных конструкций, сохраняя вариативность в пределах заданного контекста. Профиль каждого агента калибруется под конкретную атомарную операцию:

— **Агент-Парсер** занимается строгим извлечением фактов. Параметры сведены к минимуму ($T \approx 0.1$, Тор-Р ≈ 0.1), что трансформирует вероятностную модель в детерминированный автомат, жестко следующий схеме данных.

— **Агент-Анализатор** генерирует гипотезы. Поиск нетривиальных логистических решений (включая мультимодальные маршруты) требует расширения пространства выборки. Повышение Тор-Р до 0.9 открывает модели доступ к широкому вокабуляру и неочевидным онтологическим связям.

Арбитражные узлы требуют специфической балансировки. Технический контроль Агента-Валидатора протекает в суженном вероятностном коридоре ($\text{Top-P} \approx 0.3$), смещая фокус исключительно на синтаксическую и логическую связность. Агент-Судья работает в среднем диапазоне параметров: ему необходимо интерпретировать сложные причинно-следственные связи, не теряя из виду физические ограничения и целевую функцию. Стабилизация вывода на длинных цепочках рассуждений обеспечивается введением штрафов за повторения (Frequency Penalty), что исключает заикливание генерации. Индивидуальная комбинация этих метрик формирует уникальный «когнитивный профиль» каждого модуля в общем контуре управления.

Параметрическая конфигурация агентов, обеспечивающая баланс между детерминизмом исполнения и адаптивностью планирования, систематизирована в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Ролевая модель, функционал и гиперпараметры генерации агентов в каскадной архитектуре ИСППР

Агент	Функциональная роль	Обоснование необходимости	Гиперпараметры генерации (Config)
1.Агент-Парсер (Parser)	Семантический разбор входящего гетерогенного потока и маппинг сущностей на классы Онтологии.	Преобразует неструктурированные данные в формализованные факты. Требуется максимальной точности извлечения без «додумывания».	T: 0.1 – 0.15 Top-P: 0.1 – 0.2
2.Агент-Анализатор (Analyzer)	Генерация множества гипотез (сценариев) решения задачи с использованием OG-RAG.	Формирует вариативное поле решений. Требуется охвата широкого спектра онтологических связей для поиска оптимума.	T: 0.25 – 0.35 Top-P: 0.85 – 0.95
3.Агент-Валидатор (Validator)	Первичный контур. Проверка на внутреннюю непротиворечивость и анализ распределения логитов.	Отсеивает технический брак генерации. Требуется фокуса на наиболее вероятных логических конструкциях.	T: 0.15 – 0.2 Top-P: 0.2 – 0.4
4. Агент-Судья (Judge)	Вторичный контур. Оценка сценария на соответствие цели и физическим	Обеспечивает целеполагание. Требуется способности интерпретировать сложные контекстуальные условия.	T: 0.25 – 0.35 Top-P: 0.7 – 0.8

	ограничениям. Инициация Loorback.		
5. Агент-Учитель (Teacher)	Кибернетический контур. Постфактум-анализ расхождений, корректировка весов и промптов.	Обеспечивает адаптацию системы. Параметры варьируются в зависимости от типа обучающей выборки (Few-shot / Zero-shot).	Variable (Var) Freq. Penalty: 0.1-0.3

Особую роль в архитектуре ИСППР играет **Онтология предметной области**, выступающая в качестве семантического каркаса и единого протокола обмена данными между агентами. Прямая передача контекста между LLM-агентами на естественном языке несет риски накопления семантического шума и потери важных деталей при каждой итерации генерации («эффект испорченного телефона»). Для купирования данной проблемы применяется подход **OG-RAG**. В отличие от классического RAG, базирующегося на векторном поиске по семантической близости (который, как показано выше, обладает низкой точностью в задачах со сложной логикой), OG-RAG осуществляет поиск и извлечение контекста путем навигации по графу знаний (Knowledge Graph). Это позволяет ограничить пространство генерации Агента-Анализатора исключительно верифицированными фактами и логически допустимыми связями. Например, при планировании перевозки зерна система не просто ищет «похожие» транспортные средства, а осуществляет траверс графа по связям *hasCapability* (имеет возможность) и *isCompatibleWith* (совместим с), гарантированно исключая из выборки транспорт, не предназначенный для сыпучих пищевых грузов, даже если его векторное описание семантически близко к запросу.

Использование онтологии, построенной на базе стандартов верхнего уровня [18], позволяет реализовать механизм «заземления» (grounding) генеративных процессов на жесткие структуры данных. Агент-Парсер в данной схеме выполняет функцию транслятора: он не просто реферирует входящий текст, а инстанцирует объекты онтологии (создает экземпляры классов, например, «Грузовик_ID_123» с атрибутами «Грузоподъемность», «Текущая координата»). Агент-Анализатор, в свою очередь, строит гипотезы, оперируя только допустимыми в рамках онтологической модели предикатами. Такой подход обеспечивает семантическую интероперабельность между разнородными модулями системы и позволяет

бесшовно интегрировать в контур управления жесткий математический аппарат. Математическое ядро, подключаемое на этапе работы Агента-Судьи, получает на вход не сырой текст, требующий интерпретации, а структурированный вектор параметров, валидированный онтологией, что необходимо для детерминированного расчета эффективности сценариев.

Математическое ядро ИСППР, функционирующее на этапе работы Агента-Судьи, базируется на методологии **ситуационного управления и теории игр с природой**, адаптированной для задач многокритериальной оптимизации в условиях неопределенности. В отличие от классических подходов, где весовые коэффициенты критериев задаются априорно и статично, предлагаемая модель оперирует динамическими матрицами эффективности $\|a_{ij}\|$, где строки i соответствуют множеству возможных сценариев (действий), сгенерированных Агентом-Анализатором, а столбцы j - множеству состояний внешней среды (состояний природы), идентифицированных Агентом-Парсером. Элемент матрицы a_{ij} представляет собой количественную оценку эффективности i -го сценария при реализации j -го состояния среды, рассчитанную по векторной целевой функции E_{sys} . Особенность такого подхода это отказ от попытки точного определения вероятностей состояний природы P_j (что в условиях стохастичности АПК часто невозможно) в пользу **метода районирования**. Данный метод предполагает разбиение пространства возможных состояний среды на области доминирования определенных стратегий, что позволяет принимать устойчивые решения даже при неполной информации о вероятностных характеристиках входных параметров.

Для формализации процесса выбора оптимального сценария используется модифицированный алгоритм, где распределение вероятностей состояний природы (или, в терминах многокритериальной задачи, коэффициентов относительной важности критериев c_j) ранжируется в соответствии с принципом «слабого доминирования» ($c_1 \geq c_2 \geq \dots \geq c_n$) [19]. Это позволяет свести задачу выбора к решению серии линейных оптимизационных задач вида:

$$D_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} c_j \rightarrow \max \quad (1.5)$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} \sum c_j = 1 \\ 0 \leq c_j \leq 1 \end{cases} \quad (1.6)$$

Подобный вариант, описанный в работах по развитию метода районирования, позволяет Агенту-Судье оценить риски, связанные с ошибкой в определении состояния среды (например, резким изменением погоды). Интеграция данного математического аппарата с генеративными возможностями LLM создает замкнутый контур управления, где нейросеть формирует пространство гипотез (строки матрицы), а детерминированный алгоритм осуществляет их селекцию на основе строгого ранжирования приоритетов, обеспечивая тем самым математически обоснованную поддержку принятия решений в условиях высокой неопределенности.

Замыкание кибернетического контура управления реализуется посредством **Агента-Учителя**, функционирующего в интервальном режиме и обеспечивающего адаптацию системы на основе принципов обратной связи. В отличие от оперативного контура, задача данного агента заключается не в мгновенной реакции, а в ретроспективном анализе и формировании динамической прецедентной базы знаний. Структура формируемого прецедента включает триаду данных: «сгенерированное системой решение - фактически принятое решение (автоматическое или скорректированное оператором) - результирующая событийная цепочка (данные объективного контроля)». На основе сопоставления прогнозных и фактических показателей Агент-Учитель выявляет системные отклонения и паттерны успешных стратегий, осуществляя корректировку контекста промптов для Агентов-Анализатора и Судьи

Предлагаемая концепция гибридной ИСППР (Рисунок 1.5) позволяет разрешить выявленные в ходе анализа противоречия. Каскадная архитектура с двойным контуром проверки (Валидатор + Судья) нивелирует риски

стохастичности нейросетей, делая систему пригодной для управления критическими процессами. Интеграция с жестким математическим аппаратом обеспечивает точность расчетов, недостижимую для чистых LLM. Онтологическое ядро гарантирует целостность данных и возможность масштабирования системы до уровня 5PL-оператора, способного оркестровать сложные экосистемы АПК в условиях высокой неопределенности.

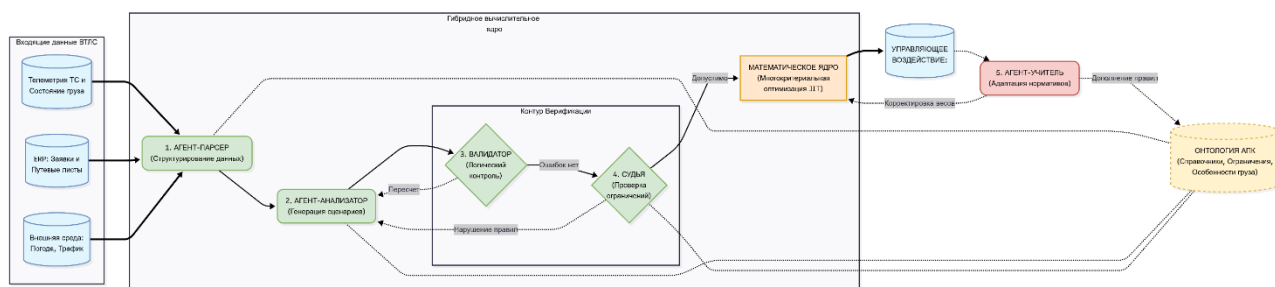


Рисунок 1.5 - Концептуальная схема гибридной интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР)

Сформулированная концепция гибридной интеллектуальной системы поддержки принятия решений, объединяющая адаптивность нейросетевых агентов с точностью детерминированных математических методов, формирует теоретический базис для преодоления технологических барьеров перехода [20] к модели 5PL в агропромышленном комплексе. Вместе с тем, практическая реализация описанной нейросимволической архитектуры зависит от наличия формализованной модели знаний, обеспечивающей семантическую интероперабельность между гетерогенными источниками данных и модулями системы. Эффективность работы каскада агентов, корректность интерпретации неструктурированной информации и валидность генерируемых сценариев определяются глубиной и непротиворечивостью заложенных логических связей. В этой связи, следующая глава исследования посвящена разработке онтологической модели предметной области транспортной логистики АПК, которая выступает в качестве семантического фундамента и единого информационного пространства для функционирования интеллектуального ядра системы.

2. ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АПК

2.1. Разработка онтологической модели предметной области

Построение семантического ядра интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) базируется на методологии онтологического инжиниринга, обеспечивающей формализацию знаний о предметной области и обеспечение семантической связанности между гетерогенными источниками данных. В качестве концептуального фундамента разрабатываемой модели выбрана онтология верхнего уровня BFO [18, 21, 22], стандартизированная в РФ, что гарантирует интероперабельность создаваемой системы с государственными информационными платформами и внешними цифровыми экосистемами. Доменная онтология «Логистика АПК» (AIC-Logistics Ontology) представляет собой иерархическую структуру классов, атрибутов и отношений, описывающую статические и динамические аспекты функционирования транспортно-логистического комплекса. Архитектура онтологии спроектирована с учетом диспропорции функциональной нагрузки элементов системы: доминирующая роль отведена транспортному домену (обеспечение мобильности материальных потоков), который функционирует в жестких ограничениях, накладываемых складской инфраструктурой (буферные зоны) и производственными процессами (генераторы грузопотока).

В основе онтологической модели находится разветвленная таксономия транспортных активов, детализирующая абстрактный класс `TransportAsset` (подкласс `bfo:Object`). Классические TMS-системы оперируют упрощенными сущностями, сводя описание подвижного состава к базовому набору полей. Разрабатываемая онтологическая модель отходит от этой практики. Жесткие технологические ограничения агрологистики требуют глубокой спецификации активов. Так, класс `GrainTruck` (Зерновоз) дифференцируется по тоннажу и по типу разгрузки (`bodyType`: боковая, задняя, донная). Для Агента-Анализатора данный атрибут выступает блокирующим фактором. Правило запретит маршрутизацию

зерновоза с задней выгрузкой на элеватор, оснащенный исключительно боковыми опрокидывателями, полностью игнорируя идеальное совпадение по объему кузова или времени подачи.

Архитектура данных напрямую обеспечивает соблюдение норм пищевой безопасности. Введение атрибутов санитарного статуса (`sanitaryStatus`) и истории рейсов позволяет на этапе генерации гипотез отсекаать транспортные средства, ранее перевозившие минеральные удобрения, от работы с продовольственным зерном.

Интеграция высокоавтоматизированных транспортных средств (BATC) реализована через специализированный подкласс `UnmannedTruck`. Опираясь на методологию Ризаевой Ю.Н. [9], сущность наделена атрибутами эксплуатационного домена (`Operational Design Domain, ODD`). Уровень автономности по стандарту SAE (`autonomyLevel`), статус телеметрии (`connectivityStatus`) и актуальность цифровой карты (`digitalMapVersion`) транслируются из справочной информации в жесткие ограничители (`Hard Constraints`). Формализованная связь `requires` ставит планирование рейса в прямую зависимость от состояния цифровой инфраструктуры. Назначение беспилотного грузовика на сегмент дорожной сети блокируется при отсутствии верифицированного цифрового двойника или стабильного покрытия V2X-связью.

Данный подход позволяет реализовать управление смешанными парками (пилотируемая и беспилотная техника) в едином семантическом контуре. Для BATC роль «Водителя» трансформируется в роль «Удаленного оператора» (`RemoteOperator`), что меняет логику учета рабочего времени и ответственности. Агенты-Анализаторы, используя данные онтологии, способны динамически перераспределять задачи: сложные, нестандартные маршруты с грунтовыми дорогами делегируются пилотируемому транспорту, в то время как BATC направляются на магистральные плечи с подготовленной инфраструктурой. Тем самым, онтологическая модель выступает гарантом безопасности и технологической совместимости, блокируя генерацию заведомо невыполнимых для робототехники сценариев еще на этапе их формирования. Формализация транспортного домена представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Фрагмент онтологической модели домена «Транспортная логистика»

Класс (Class) / Подкласс	Родительский класс (BFO Mapping)	Ключевые атрибуты (Data Properties)	Тип данных / Ед. изм.	Семантические отношения (Object Properties)	Источник данных (Data Source)	Описание и ограничения
TransportAsset (Транспортное средство)	bfo:MaterialEntity	hasVIN hasCapacity hasFuelLevel currentStatus	String Float (т/м³) Integer (%) Enum (Idle, Busy, Maint)	locatedAt (GeoPoint) operatedBy (Driver/AI) compatibleWith (CargoType)	Телеметрия (IoT), ERP	Базовый класс для всех видов техники (M1, M2, M3).
GrainTruck (Зерновоз)	TransportAsset	bodyType sanitaryStatus axleLoadLimit	Enum (Side, Rear, Hopper) Boolean Float (т)	canAccess (Field/Elevator) assignedTo (Order)	ГИС ЭПД, Бортовой компьютер	Специализированный транспорт (M1). Атрибут bodyType критичен для совместимости с приемным бункером элеватора.
UnmannedTruck (Беспилотный грузовик)	TransportAsset	autonomyLevel connectivityStatus digitalMapVersion	Integer (0-5) Boolean String (Hash)	requires (DigitalInfrastructure) controlledBy (FleetManager)	БАТС API, Система управления роём	Специфика: Требуется наличие цифрового двойника дороги. Не может быть назначен на маршруты без покрытия связью.
Driver (Водитель/Оператор)	bfo:Role	licenseCategory workShiftTime fatigueLevel	String Time (ч) Float (0-1)	drives (TransportAsset) hasPermit (Zone)	Тахограф, СКУД	Для БАТС роль водителя трансформируется в роль удаленного оператора.
RoadSegment (Участок дороги)	bfo:Site	surfaceType weightLimit trafficDensity	Enum (Asphalt, Dirt) Float (т) Float (0-10)	connects (Node A, Node B) isPassableFor (TransportAsset)	ГИС, Погодные API	Динамический атрибут isPassable меняется в зависимости от погоды (дождь блокирует грунтовые дороги).

Складской домен в онтологической модели выполняет функцию ограничивающего фактора и буфера, сглаживающего неравномерность производственных и транспортных потоков. Класс *StorageFacility* описывает узлы хранения (элеваторы, токи, портовые терминалы) не как статические объекты, а как динамические системы массового обслуживания. Номинальная емкость, мгновенная пропускная способность приемки (*intakeRate*), текущая длина очередей и статус технологического оборудования (сушилок, сепараторов) выступают рабочими атрибутами складского домена. Переход к маршрутизации по принципам ЛП обеспечивается интеграцией в онтологическую модель классов «Слот приемки» (*TimeSlot*) и «Очередь» (*Queue*), за счет чего транспортное средство направляется не к абстрактному физическому объекту, а бронирует конкретное временное окно, параметры которого привязаны к типу и влажности доставляемого груза. Детализация элементов инфраструктуры хранения приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Фрагмент онтологической модели домена «Складская логистика»

Класс	Атрибуты	Ед. изм.	Отношения	Роль в управлении
StorageFacility (Место хранения)	— totalCapacity — currentFillLevel — operatingHours	— Тонны — % — TimeRange	— hasEquipment (Dryer, Cleaner) — locatedIn (Region)	Определяет точку назначения. Если currentFillLevel = 100%, объект исключается из маршрутизации.
IntakePoint (Точка приемки)	— intakeRate — queueLength — supportedBodyType	— Тонн/час — Integer (шт) — Enum	— belongsTo (StorageFacility) — isOccupiedBy (TransportAsset)	Критический ресурс. Ограничивает поток транспорта. Используется для расчета времени ожидания.
ProcessingUnit (Оборудование обработки)	— dryingCapacity — cleaningRate — status	— Тонн/час — Тонн/час — Enum (Active, Repair)	— Processes (GrainBatch) — requiresEnergy (Fuel/Electricity)	Если влажность зерна > 14%, маршрут строится только на склады с активным ProcessingUnit.
GrainBatch (Партия зерна на складе)	— moistureContent — temperature — impurityLevel	— % — °C — %	— storedIn (Silo) — ownedBy (Producer)	Динамическое изменение качества во времени (риск самосогревания).

Источником материального потока и базовых сценарных ограничений выступает производственный домен, в котором, формирующий его класс Field (Поле), моделируется как динамический объект, чьи характеристики меняются во времени. Пространственные границы рабочей зоны фиксируются атрибутом geoPolygon, обеспечивая топологическую основу для внутрихозяйственной маршрутизации. При этом оперативное управление опирается на динамические параметры: влажность почвы (soilMoisture) и состояние культуры (CropState). Превышение допустимого порога влажности автоматически активирует онтологическое правило, блокирующее въезд магистральных зерновозов (категория M1) и перестраивающее логистическую цепь на использование тракторов с бункерами-перегрузчиками. Риск порчи урожая (spoilageRisk) и уровень его зрелости (maturityLevel) определяют динамический приоритет задачи (Urgency Score). Возрастание угрозы осыпания или заболевания культуры повышает вес генерируемых заявок на вывоз, напрямую корректируя целевую функцию Агента-Судьи.

Темп работы логистического конвейера задается классом HarvestingMachine (Уборочная техника, M2). Интеграция паспортных характеристик машины - скорости уборки (harvestingSpeed) и объема бункера (hopperVolume) - с электронной картой урожайности позволяет прогнозировать дискретные интервалы потребности в выгрузке. Наполнение бункера рассматривается как стохастический процесс, зависящий от локальной плотности биомассы на конкретном участке. Отказ от жестких статических планов в пользу такого подхода обеспечивает переход к проактивной диспетчеризации. Опираясь на данные онтологии, Агент-Анализатор заблаговременно рассчитывает координаты точки встречи комбайна и грузовика (Rendezvous Point), исключая простой уборочной техники.

Междоменное взаимодействие агрономического и транспортного контуров реализуется через семантическое отношение createsDemandFor. Выполняя функцию событийного триггера, данная связь инициирует работу

каскада интеллектуальных агентов при приближении расчетного объема бункера к критической отметке. В этот момент система генерирует экземпляр процесса `TransportationProcess`. Происходит автоматическая трансляция агрономических параметров (текущие координаты комбайна, влажность и масса намолоченного зерна) в формализованную спецификацию транспортной заявки, содержащую требования к типу кузова, грузоподъемности и временному окну подачи автомобиля. Описанные выше процессы сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3- Фрагмент онтологической модели домена «Производственная логистика»

Класс (Class)	Атрибуты	Ед. изм.	Отношения (Object Properties)	Влияние на транспортную задачу
Field (Поле)	— geoPolygon — cropType — soilMoisture	— WKT — String — %	— hasAccessRoad (RoadSegment) — isHarvestedBy (HarvestingMachine)	Источник груза. soilMoisture определяет проходимость для колесной техники (M1).
HarvestingMachine (Комбайн / M2)	— hopperVolume — harvestingSpeed — geoPosition	— м³ — Га/час — GPS	— createsDemandFor (TransportAsset) — unloadsTo (TransportAsset)	Генератор дискретных заявок на вывоз. Остановка комбайна - критический инцидент.
CropState (Состояние культуры)	— maturityLevel — moisture — spoilageRisk	— % — % — Float (0-1)	— belongsTo (Field) — requiresAction (Harvesting)	Определяет приоритет (Urgency Score). Высокий риск порчи повышает приоритет заявки на транспорт.

Переход от статического описания классов к оперативному управлению невозможен без определения топологии межсущностных связей. Иерархия наследования свойств и система ограничений, накладываемых на транспортные активы, визуализирована на графе таксономии (рисунок 2.1). Наследуя базовые характеристики абстрактного родительского класса `TransportAsset`, специализированные узлы (включая `UnmannedTruck`) формируют уникальные наборы атрибутов, выступающие базисом для логического вывода Агента-Судьи. Подобная архитектурная детализация напрямую задает жесткие маршрутные ограничители (Hard Constraints) - в частности, блокируя эксплуатацию беспилотных комплексов вне зон покрытия развернутой цифровой инфраструктуры (рисунок 2.1).

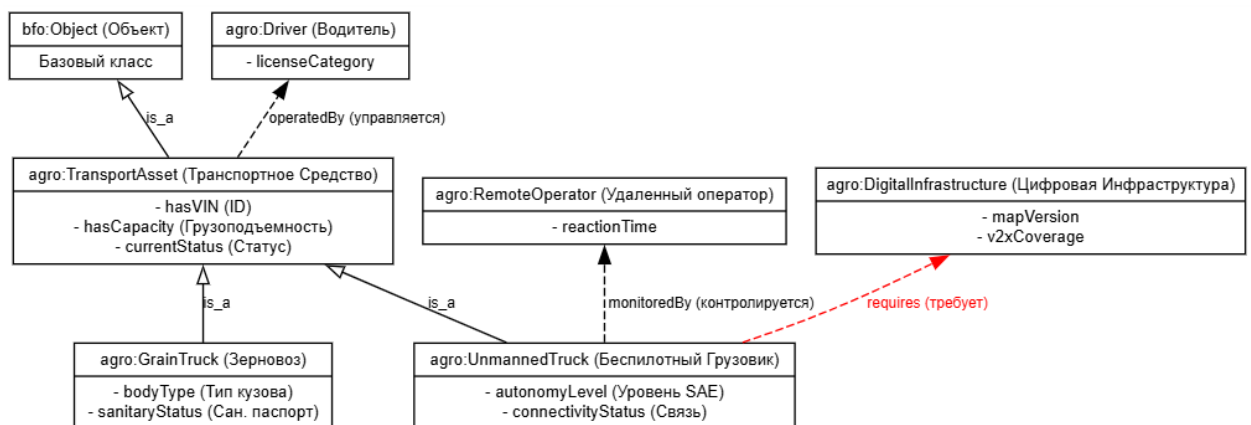


Рисунок 2.1 - Фрагмент графа онтологии: Таксономия транспортных активов и их атрибутивный состав

Транспортная таксономия логически продолжается формализацией складского домена. Инфраструктура хранения в агропромышленном комплексе берет на себя роль демпфера, поглощающего пиковые всплески неравномерных грузопотоков. Отказываясь от редукции склада до абстрактной вершины графа с единственным параметром емкости, онтология глубоко декомпозирует класс `StorageFacility` (Объект хранения). Внутренние функциональные зоны моделируются как самостоятельные сущности, поскольку они жестко лимитируют скорость обслуживания техники.

Базовым узлом взаимодействия становится IntakePoint (Точка приемки/разгрузки). Ее атрибуты - пропускная способность (intakeRate) и технологическая совместимость (supportedBodyType) - формируют физические рамки маршрутизации. Заложенные на этом уровне правила автоматически блокируют невыполнимые операции, пресекая отправку автопоездов с задним свалом на завальные ямы, оснащенные исключительно боковыми опрокидывателями. Возможность разгрузки партий влажного зерна напрямую увязывается с классом ProcessingUnit (Оборудование подработки), текущий статус которого разрешает или запрещает экстренную сушку. Графическое представление складской таксономии приведено на рисунке 2.2.

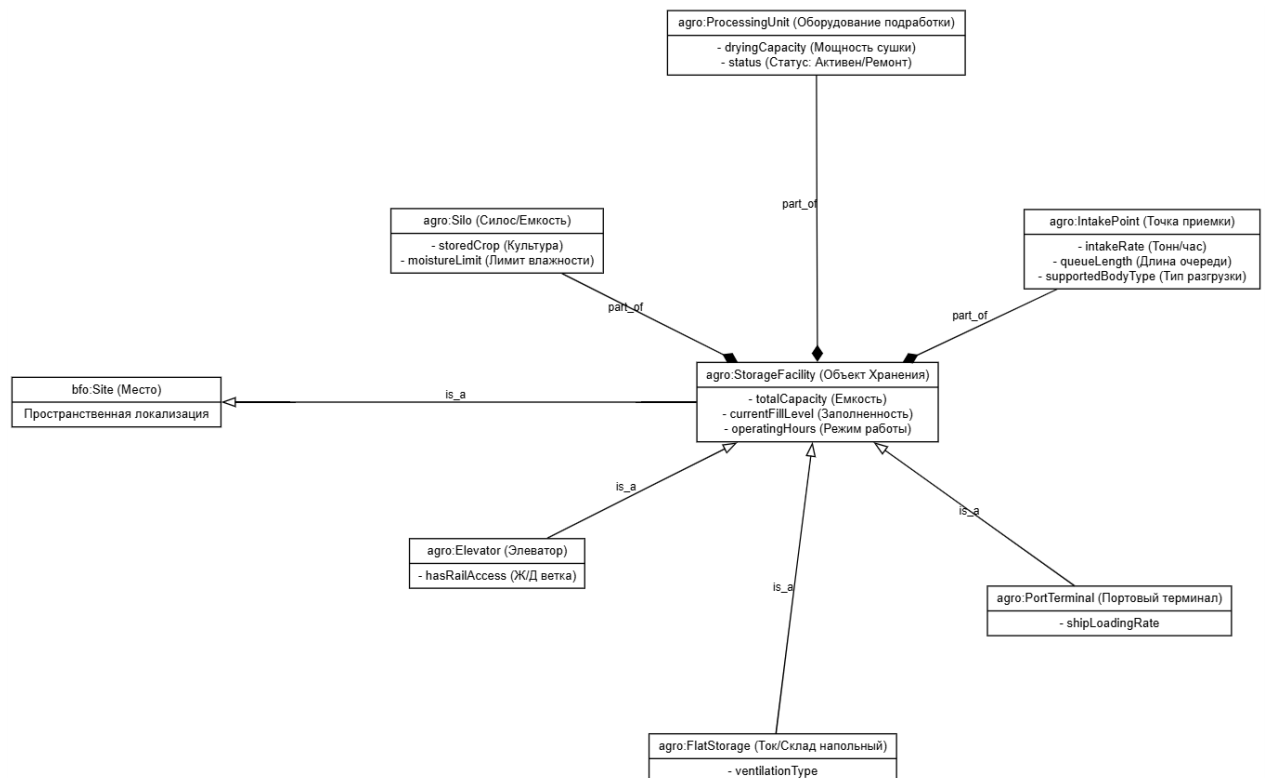


Рисунок 2.2 - Фрагмент графа онтологии: Таксономия складской инфраструктуры и технологических узлов

Формализацию источников зарождения материального потока обеспечивает производственный домен. Отказываясь от традиционной трактовки поля (Field) как статичного земельного участка, онтология

описывает его в качестве динамической площадки, чье текущее состояние непрерывно корректирует параметры транспортного спроса.

Архитектура домена опирается на классы состояния агрофона (SoilState) и культуры (CropState). Заложенный в них атрибут влажности почвы (soilMoisture) служит управляющим триггером для Агента-Судьи. Фиксируя превышение допустимого порога, система накладывает вето на прямой доступ магистрального транспорта (M1) к комбайнам, принудительно включая в логистическую цепь тракторы с бункерами-перегрузчиками. Сама динамика поступления урожая моделируется через класс HarvestingMachine (Уборочная техника): привязка атрибутов скорости уборки к конкретным геоэонам дает возможность предиктивно вычислять моменты заполнения бункеров. Структурные связи производственного сегмента отражены на рисунке 2.3.

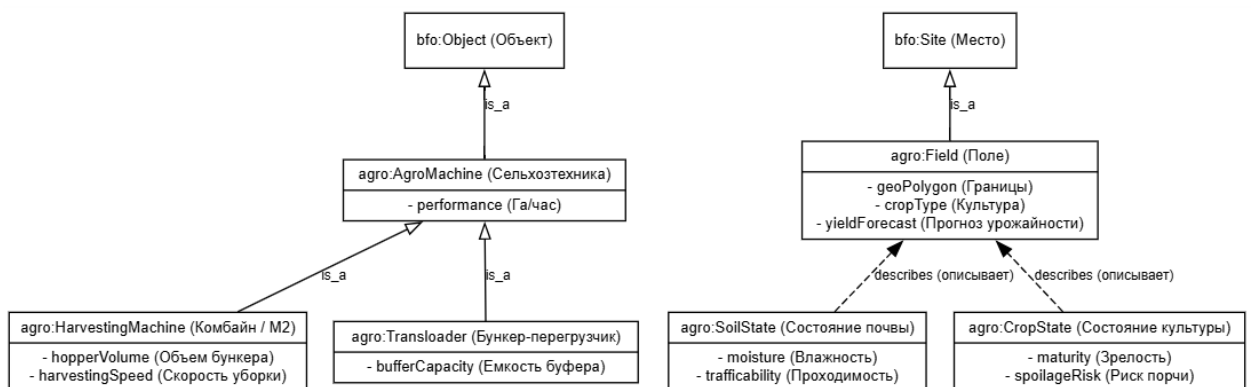


Рисунок 2.3 - Фрагмент графа онтологии: Таксономия
производственных активов и агрономических условий

Описанные таксономии задают лишь статический словарь предметной области. Операционный потенциал онтологической модели реализуется исключительно через формализацию междоменных связей, объединяющих производственный, транспортный и складской контуры в единую семантическую сеть (рисунок 2.4). Базовым архитектурным принципом такого объединения становится событийно-ориентированная связность. Взаимодействие объектов из разных доменов носит дискретный характер,

инициируясь специфическими триггерами. Центральным элементом схемы выступает отношение `createsDemandFor`, прокладывающее мост между классами `HarvestingMachine` и `TransportAsset`. Лишенная статичности, эта связь активируется в момент достижения критической отметки прогнозируемого заполнения бункера, мгновенно трансформируя локальный агрономический процесс в полноценную логистическую заявку на вывоз урожая.

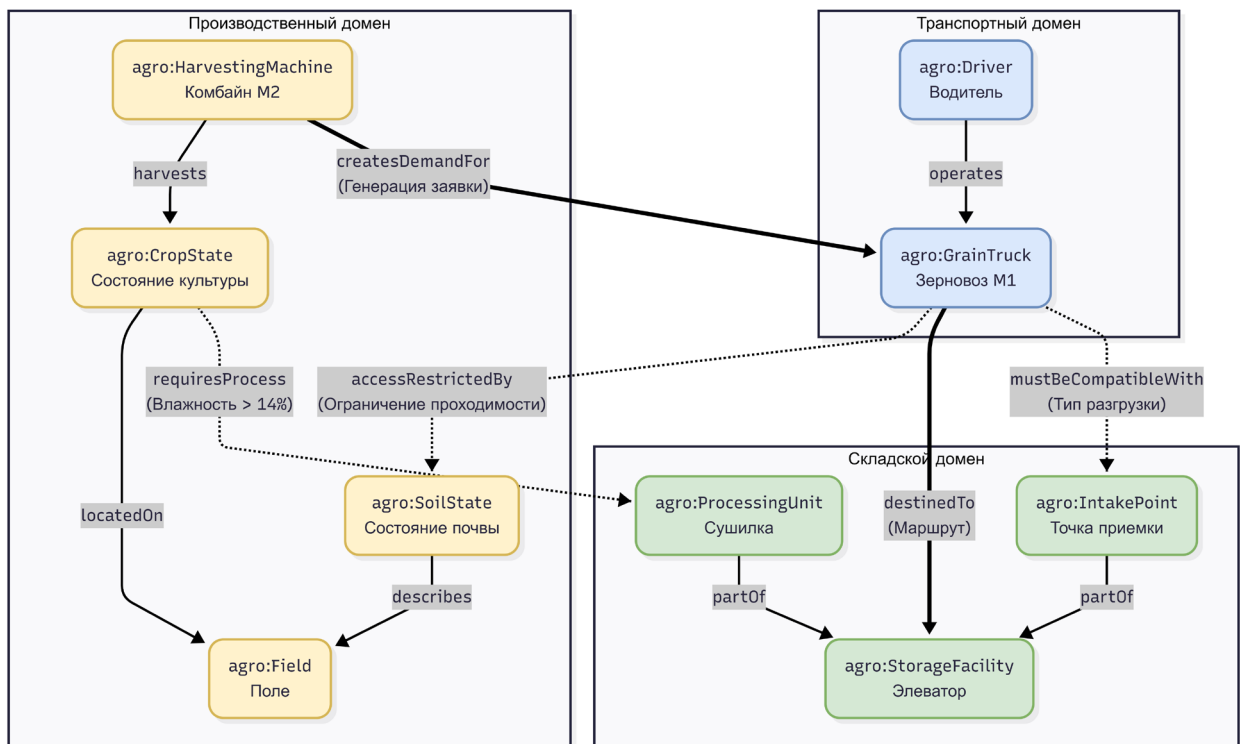


Рисунок 2.4 - Семантическая сеть взаимодействия производственного, транспортного и складского доменов

Система жестких ограничений (Hard Constraints), заложенная в объектных свойствах, строго регламентирует пересечение транспортного и складского доменов. Выполняя функцию автоматического фильтра, связь `isCompatibleWith` между узлами `GrainTruck` и `IntakePoint` блокирует построение маршрута при малейшем несоответствии типа разгрузки автомобиля техническому оснащению приемного бункера. Зеркальный механизм реализован и на стороне производственного контура: атрибут

состояния почвы (SoilState) через отношение restrictsAccess накладывает вето на подачу магистральных тягачей в условиях превышения допустимой влажности грунта. Разрозненные технические характеристики агрегируются онтологией в свод непреложных правил, опираясь на которые Агент-Судья верифицирует любые сгенерированные сценарии.

Помимо маршрутизации, сформированная семантическая сеть выступает вычислительным фундаментом для оценки эффективности. Ребра графа, описывающие физические процессы (перемещение, ожидание, разгрузку), инкапсулируют параметры времени и стоимости. Фиксация очереди на стыке транспорта и склада (отношение inQueueAt) или регистрация простоя комбайна в ожидании грузовика (waitsFor) напрямую сигнализируют о деградации логистической цепи. Перевод этих состояний из качественного описания в количественный формат требует внедрения метрического аппарата - системы показателей эффективности (KPI) и событийных триггеров, архитектура которых раскрывается далее.

2.2. Формирование системы показателей эффективности и событийных триггеров в контуре оперативного управления

Переход от статического описания предметной области к динамическому управлению требует формализации системы критериев, на основе которых интеллектуальные агенты будут принимать решения, и событий, инициирующих эти решения. В разработанной онтологической модели данные сущности не являются просто атрибутами классов, а представляют собой отдельный семантический слой, связывающий физические процессы с экономической целесообразностью. Для обеспечения корректной работы каскада агентов (Парсера, Анализатора, Судьи) необходимо четкое разграничение входящих сигналов по их функциональному назначению в контуре управления [23-26]. Предлагаемая классификация делит информационные сигналы на три функциональные категории:

- **Триггеры (Events)** - дискретные события, запускающие процесс пересчета сценариев;
- **Маркеры (State Indicators)** - граничные условия и текущие статусы объектов, используемые для валидации решений;
- **KPI (Metrics)** - целевые функции, подлежащие оптимизации.

Систематизация данных сигналов, их привязка к доменам логистики АПК и описание механизма реакции интеллектуальной системы представлены в таблице 2.4. Данная матрица служит нормативной базой для настройки логики Агентов, определяя, какие данные являются побуждением к действию, какие - жестким ограничением, а какие - критерием успеха.

Таблица 2.4 - Классификация информационных сигналов, показателей эффективности и ограничений в онтологической модели управления агрологистикой

Категория сигнала	Домен	Показатель / Событие	Онтологическая привязка (Class / Property)	Источник данных	Реакция системы (Роль агентов)
ТРИГГЕРЫ	Производство	Критическое заполнение бункера комбайна (>80%)	agro:HopperLevelCritical	IoT (Датчик уровня)	Агент-Парсер: Фиксирует потребность. Агент-Анализатор: генерирует заявку на вывоз (M1).
	Внешняя среда	Начало осадков в геозоне поля	agro:PrecipitationStart	Метео-API / Радар	Агент-Судья: блокирует маршруты на поле. Агент-Анализатор: перенаправляет транспорт на базу.
	Транспорт	Поломка / Остановка ТС на маршруте	agro:VehicleBreakdown	CAN-шина / GPS	Агент-Анализатор: инициирует поиск замены ТС и пересчет ETA.
	Склад	Аварийная остановка приемного оборудования	agro:EquipmentFailure	SCADA элеватора	Агент-Судья: вводит запрет (Hard Constraint) на выбор данного склада как точки назначения.
МАРКЕРЫ	Груз	Влажность зерновой массы	agro:MoistureContent	Лаборатория / IoT	Агент-Судья: проверяет совместимость с типом хранения (сушилка vs склад). Отсекает маршруты без сушки при влажности >14%.
	Транспорт	Санитарный статус кузова	agro:SanitaryStatus	ERP / Журнал	Агент-Валидатор: Исключает ТС, перевозившие химикаты, из пула доступных для пищевых грузов.
	Склад	Длина очереди на выгрузку	agro:QueueLength	Система видеоаналитики	Агент-Анализатор: учитывает время ожидания при расчете общего времени рейса.
	Инфраструктура	Несущая способность грунта	agro:SoilTrafficability	Агро-модель	Агент-Судья: запрещает въезд шоссейных зерновозов на поле при низких значениях.
KPI	ЛТ (Время)	Отклонение от временного слота (ΔT)	agro:TimeSlotDeviation	Расчет (Fact - Plan)	Агент-Анализатор: минимизирует параметр при выборе маршрута. Основной критерий оптимизации.
	Качество	Температурный интеграл (Риск самосогревания)	agro:HeatAccumulation	Расчетная модель	Агент-Судья: отвергает сценарии, где интеграл превышает допустимый порог для текущей влажности.
	Экономика	Удельная себестоимость рейса	agro:CostPerTonKm	Экономическая модель	Агент-Анализатор: использует как вторичный критерий при ранжировании допустимых сценариев.
	Ресурсы	Коэффициент порожнего пробега	agro:EmptyRunRatio	GPS-трек	Агент-Учитель: анализирует постфактум для корректировки алгоритмов маршрутизации.

Целевые показатели системы КРІ

Центральное место в иерархии показателей эффективности занимает группа транспортных КРІ, поскольку именно транспортная подсистема обеспечивает физическую связность дискретных процессов уборки (производство) и приемки (складирование). В парадигме многокритериальной оптимизации, характерной для гибридных интеллектуальных систем, задача управления транспортным парком не сводится к тривиальной минимизации пробега или стоимости [26]. Она трансформируется в поиск парето-оптимального решения в многомерном пространстве конфликтующих критериев, где доминирующим вектором в условиях реализации ЛТ становится соблюдение временных интервалов. В разработанной онтологической модели данный показатель формализуется не как абстрактное время в пути, а как функционал потерь, зависящий от дельты (ΔT) между расчетным временем прибытия (ETA), динамически обновляемым на основе стохастических данных телеметрии, и забронированным слотом на элеваторе (T_{slot}).

$$F_{time}(\Delta T) = \begin{cases} ETA < T_{slot} \Rightarrow \alpha \cdot |ETA - T_{slot}|, \\ ETA > T_{slot} \Rightarrow \beta \cdot (ETA - T_{slot}) \cdot e^{\lambda \cdot Q_{risk}}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где: α и β - штрафные коэффициенты за простой техники и срыв слота соответственно,

Q_{risk} - коэффициент риска потери качества груза. Минимизация данного функционала - приоритетная задачей Агента-Анализатора.

Коэффициент утилизации пробега формирует второй базис экономической эффективности системы, требуя жесткого сокращения порожних перегонов. Неравномерное распределение инфраструктуры АПК и огромные плечи доставки делают классические челночные рейсы («Поле - Элеватор - Поле») финансово несостоятельными. Исключение неоплачиваемого «холостого хода» переводит работу Агента-Анализатора в плоскость решения динамической задачи маршрутизации (Dynamic VRP) на фоне постоянно меняющегося спроса. Отказываясь от линейных возвратов,

модуль конструирует сложные кольцевые цепи, интегрируя вывоз урожая с попутными операциями - например, направляя освободившийся на элеваторе зерновоз на базу удобрений перед его возвращением к уборочной бригаде. Онтологическая модель выступает как граф допустимых переходов, где связи между узлами активируются или блокируются в зависимости от совместимости типов кузовов и грузов. Оптимизация данного показателя напрямую влияет на снижение удельной себестоимости перевозки тонны продукции, однако она должна быть сбалансирована с жесткими временными ограничениями ЛТ: экономия на пробеге не должна приводить к критическому ожиданию комбайнов в поле [25].

Третьим компонентом вектора эффективности являются показатели **топливной эффективности и энергоемкости**, рассчитываемые на основе методик, адаптированных из работ Карелиной М.Ю. [5, 27]. В онтологии данные показатели интегрируются как динамические атрибуты класса *TransportAsset*, зависящие от паспортных характеристик техники и от внешних условий эксплуатации (тип дорожного покрытия, рельеф, влажность грунта). В условиях неопределенности, когда состояние полевых дорог может резко ухудшиться из-за осадков, выбор маршрута с минимальным расстоянием может привести к экстремальному перерасходу топлива или застреванию техники. Поэтому Агент-Анализатор при ранжировании сценариев использует не статический норматив расхода, а предиктивную модель, учитывающую текущее состояние инфраструктуры (*agro:RoadCondition*), получаемое от внешних источников или IoT-датчиков [6, 27-29, 30].

Влияние факторов неопределенности на выбор критериев оптимизации и реакцию системы систематизировано в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Матрица влияния факторов неопределенности на критерии многокритериальной оптимизации транспортных процессов

Фактор неопределенности	Влияние на КРІ	Корректировка целевой функции (Логика Агента-Анализатора)
Дорожная обстановка (Заторы, ДТП)	Увеличение ΔT (Риск срыва ЛТ)	Повышение веса критерия «Надежность времени прибытия» в ущерб критерию «Минимальная стоимость». Переход на альтернативные, более длинные, но скоростные маршруты.
Погодные условия (Осадки, Распутица)	Рост расхода топлива, Снижение скорости	Введение штрафных коэффициентов для грунтовых участков дорог. Приоритезация техники повышенной проходимости (даже при меньшей грузоподъемности).
Состояние груза (Влажность, Температура)	Экспоненциальный рост риска порчи (Q_{risk})	Абсолютный приоритет критерия «Время доставки» ($\Delta T \rightarrow \min$). Игнорирование экономической эффективности (порожних пробегов) ради спасения груза.
Очереди на приемке (Сбой на элеваторе)	Непредсказуемое время ожидания	Динамическая смена точки назначения (перенаправление потока). Включение в оптимизацию критерия «Пропускная способность узла».

Следственно, транспортная логистика в архитектуре ИСППР рассматривается не как изолированный процесс физического перемещения, а как сложная адаптивная система, состояние которой описывается матрицей эффективности сценариев [25]. Задача Агента-Анализатора формализуется как поиск оптимального вектора управления в условиях многокритериальности, где каждый возможный сценарий транспортировки S_i (маршрут, тип ТС, временной слот) характеризуется набором показателей k_j (стоимость, время, риск) [20, 31]. Это позволяет представить пространство решений в виде матрицы эффективности E размерности $m \times n$:

$$E = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \cdots & e_{mn} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

где: m - количество сгенерированных гипотез,

n - количество критериев оценки

Элемент e_{ij} в таком представлении отражает нормированное значение j -го критерия (например, ΔT или $Cost$) для i -го сценария. Однако статичная оценка невозможна из-за стохастичности внешней среды. Влияние экзогенных факторов (погода, дорожная ситуация) и эндогенных ограничений (состояние груза) учитывается через введение динамического вектора весовых коэффициентов $\vec{w}(\Omega)$, зависящего от текущего состояния системы Ω , определяемого через онтологические маркеры [20-31].

В такой постановке задача Агента-Анализатора сводится к нахождению сценария S_{opt} , максимизирующего интегральную функцию полезности, которая представляет собой произведение матрицы эффективности на вектор динамических весов. При этом онтологические правила выступают в роли системы жестких ограничений (Hard Constraints), обнуляющих строки матрицы, соответствующие недопустимым сценариям (например, нарушение санитарных норм):

$$\forall k: C_k(S_i) = \text{True} \Rightarrow S_{opt} = \operatorname{argmax}_i \left(\sum_{j=1}^n e_{ij} \cdot w_j(\Omega) \right) \quad (2.3)$$

где C_k - логические предикаты онтологии (совместимость, доступность).

Такой подход позволяет системе в режиме реального времени находить математически обоснованный компромисс между противоречивыми целями (быстро, дешево, безопасно), адаптируя стратегию управления под мгновенные изменения контекста, будь то резкое ухудшение погоды или изменение рыночной конъюнктуры.

Маркеры

Группа показателей качества и рисков, определяемая в онтологии как «Маркеры» (State Indicators), формирует систему жестких ограничений (Hard Constraints), в рамках которых осуществляется поиск оптимального решения. В отличие от KPI, которые подлежат минимизации или максимизации, маркеры функционируют по бинарному принципу «допустимо

/ недопустимо», выступая фильтрами для отсева технологически несостоятельных сценариев.

Для продукции растениеводства критическим маркером выступает **температурный интеграл** - накопленная сумма температур зерновой массы за время нахождения в кузове транспортного средства или временном хранилище. В онтологии данный параметр моделируется как динамическое свойство, значение которого растет нелинейно в зависимости от влажности груза и температуры окружающей среды. Если прогнозное значение маркера на момент доставки приближается к критическому порогу (точка начала самосогревания), Агент-Судья автоматически блокирует любые маршруты, предполагающие длительное ожидание или транспортировку на дальние расстояния, принудительно перенаправляя поток на ближайший пункт обработки (сушки), даже если это экономически менее выгодно (увеличивает $C(x)$).

Маркеры логистической инфраструктуры формируют второй контур ограничений. Поступая в систему в режиме реального времени, данные о текущей длине очереди (`agro:QueueLength`) и статусе технологического оборудования срабатывают как динамические вето-факторы. Фиксация аварии сушилки или превышение лимита пропускной способности слота приводит к немедленному исключению проблемного элеватора из графа доступных вершин [20, 25, 31]. Маркеры, их пороговые значения и логика влияния на маршрутизацию систематизированы в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Матрица маркеров состояния и граничных условий в системе управления логистики АПК

Маркер (Показатель состояния)	Онтологическая сущность	Единица измерения	Источник данных	Критическое условие (Threshold)	Реакция (Ограничение) Агента-Судьи
Температур ный интеграл	agro:HeatAccumul ation	Градус-часы	Расчетная модель (на основе IoT)	$> Q_{crit}$ (зависит от влажности)	Блокировка маршрута. Запрет на перевозку далее N км. Принудительная выгрузка.
Влажность зерна	agro:MoistureCont ent	%	Бортовой датчик / Лаборатория	$> 14\%$	Фильтрация узлов. Исключение складов без активного оборудования сушки (ProcessingUnit).
Длина очереди	agro:QueueLength	Единиц ТС	Видеоаналитика / СКУД	$> N_{max}$ (емкость накопителя)	Временный запрет. Исключение элеватора из целевых точек на T часов.
Проходимос ть почвы	agro:SoilTrafficabil ity	Баллы (0-10) / Влажность	Агро-метеомодель	< 5 (или влажность $> 30\%$)	Ограничение типа ТС. Запрет въезда шоссейных зерновозов (M1) на поле. Требование бункера-перегрузчика.
Статус оборудован ия	agro:EquipmentSta tus	Enum (Active, Error, Maint)	SCADA элеватора	$\neq$ Active	Полный запрет. Исключение узла из графа маршрутизации.

Триггеры

Механизм событийных триггеров (Event-Driven Triggers) гарантирует динамическую устойчивость логистической сети. Если маркеры фиксируют текущий статус-кво, то триггеры отражают дискретные возмущения среды, вынуждая управляющий контур реагировать незамедлительно. Формализация этих возмущений через класс `agro:TransportEvent` переводит сухую констатацию факта (например, поломку комбайна) в статус управляющего сигнала, напрямую меняющего топологию графа решений.

Степень деструктивного воздействия на оперативный план делит триггеры на две категории:

- Жесткие триггеры (Hard Triggers / Critical Events) разрушают императивные ограничения, делая маршрут физически невыполнимым. Интенсивные осадки в зоне погрузки, авария на элеваторе или выход из строя уборочной техники запускают протокол «Stop-Loss». Система сбрасывает задачи затронутых ресурсов и перезапускает каскад агентов, полностью перестраивая расписание для минимизации ущерба.

- Мягкие триггеры (Soft Triggers / Optimization Opportunities) сохраняют физическую реализуемость плана, но сдвигают параметры целевой функции. Досрочная выгрузка, опережение расчетного ETA или внезапное снижение трафика формируют окна для локальной оптимизации. Не ломая общую структуру цепи поставок, такие события инициируют фоновый пересчет, направленный на уплотнение графика и улучшение итоговых KPI [30-38].

Систематизация событийных триггеров, их онтологическая привязка и сценарии реагирования представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7- Матрица событийных триггеров и сценариев реагирования в системе управления агрологистикой

Тип триггера	Событие (Event)	Онтологический класс	Источник сигнала	Влияние на план	Сценарий реакции (Workflow)
Жесткий	Поломка техники (M1/M2)	agro:EquipmentFailure	Телеметрия (CAN-bus) / Сообщение водителя	Критическое. Разрыв цепи поставок.	1. Парсер: Фиксирует статус Unavailable. 2. Анализатор: ищет ближайший резервный борт. 3. Судья: утверждает замену, если $ETA_{резерва} < \tau_{crit}$.
	Метео-блокировка (Ливень)	agro:WeatherAlert	Метео-радар / API	Критическое. Остановка уборки/вывоза.	1. Парсер: Обновляет атрибут isPassable для поля. 2. Анализатор: отзывает транспорт на базу или перенаправляет на крытые тока. 3. Судья: блокирует любые маршруты в зону осадков.
	Отказ в приемке (Сбой элеватора)	agro:ReceptionStop	SCADA / ERP элеватора	Критическое. Риск простоя груженого ТС.	1. Парсер: Блокирует узел графа StorageFacility. 2. Анализатор: пересчитывает маршрут на альтернативный склад. 3. Судья: проверяет допустимость пробега до нового склада.
Мягкий	Опережение графика	agro:EarlyArrival	GPS-трекер	Позитивное. Появление временного резерва.	1. Анализатор: предлагает дополнительный короткий рейс или техобслуживание в образовавшееся «окно».
	Изменение урожайности (Факт > План)	agro:YieldUpdate	Бортовой компьютер комбайна	Нейтральное. Риск дефицита транспорта.	1. Парсер: Обновляет прогноз объема груза. 2. Анализатор: добавляет дополнительные рейсы в очередь (Demand-M1).
	Снятие ограничений (Дорога открыта)	agro:RoadOpening	Дорожные сервисы	Позитивное. Сокращение пути.	1. Анализатор: пересчитывает активные маршруты. Если выигрыш $\Delta T > 15$ мин, предлагает смену маршрута.

Формализация триггеров в онтологии через классы событий (agro:TransportEvent) позволяет **Агенту-Парсеру** выполнять функцию семантического фильтра. Он однозначно интерпретирует входящие неструктурированные сообщения (например, голосовое сообщение механизатора: «на пятом поле начало капать, сворачиваемся») как формализованную команду к изменению статуса доступности соответствующего гео-полигона (Field_ID_5. isWorkable = False).

Интеграция описанной системы показателей и триггеров в работу каскада агентов реализуется по следующему алгоритмическому циклу:

1. Этап семантического распознавания (Агент-Парсер): Агент в непрерывном режиме сканирует входящие потоки данных. При обнаружении сигнала он классифицирует его как «Маркер» (обновление статуса) или «Триггер» (событие). В случае триггера происходит мгновенная актуализация экземпляров онтологии (Digital Twin), что переводит систему в состояние «Требуется решение» [35-37].

2. Этап генерации гипотез (Агент-Анализатор): на основе обновленного графа знаний агент формирует пул альтернативных сценариев. Используя KPI как целевую функцию, он стремится найти экстремум в многомерном пространстве решений (например, минимизировать ΔT при возникшем ограничении). Для мягких триггеров поиск идет в окрестности текущего плана, для жестких - генерируется новый граф маршрутов с нуля.

3. Этап верификации и арбитража (Агент-Судья): Сгенерированные сценарии проходят проверку через систему вето. Судья использует значения маркеров из таблицы 2.6 как жесткие фильтры. Любое решение, нарушающее граничные условия (например, отправка влажного зерна на элеватор, где по данным телеметрии сломалась сушилка, или превышение допустимого времени ожидания комбайна), отвергается как недопустимое, даже если оно математически выгодно [38-39].

4. Этап адаптивного обучения (Агент-Учитель): В фоновом режиме агент анализирует историю срабатывания триггеров. Систематическое

расхождение между прогнозом и фактом (аномальные заторы в конкретном районе или хроническое превышение нормативов выгрузки на элеваторе) фиксируется Агентом-Учителем. Анализируя накопленную статистику, модуль калибрует весовые коэффициенты KPI и пороги чувствительности к триггерам. Накапливая опыт, система эволюционирует, сдвигая парадигму от реактивного реагирования к предиктивному управлению рисками [16]. Математическая оптимизация лишается абстрактности: ситуационное управление реализуется строго внутри физических, технологических и биологических границ, продиктованных онтологией [30].

2.3. Архитектура и алгоритмы работы каскада интеллектуальных агентов с использованием технологии *Ontology-Grounded RAG*

Отказ от монолитных алгоритмов в пользу распределенной агентной архитектуры опирается на принципы *Ontology-Grounded Retrieval-Augmented Generation (OG-RAG)* [22]. Стандартный RAG ищет семантически близкие текстовые фрагменты в векторных базах, оставляя пространство для ошибок. Технология OG-RAG, напротив, жестко «заземляет» генеративный процесс на структуру графа знаний. Ограничение поиска аксиоматикой и конкретными экземплярами онтологии полностью исключает риск формирования правдоподобных, но ложных фактов. Выстроенный конвейер последовательно обрабатывает информацию: верифицированный выход предыдущего агента становится входом для следующего, а сама онтология функционирует как единая шина данных [25, 40-44].

В рамках архитектуры важно разделять понятия типа агента и его программного экземпляра. Агент-Парсер, Агент-Анализатор, Агент-Валидатор, Агент-Судья и Агент-Учитель - это не единичные скрипты, а пять функциональных ролей. Каждая роль закрепляет строгий контракт: допустимые входы, применяемую логику и формат итогового вывода. Наличие ровно пяти типов агентов выступает структурной константой

нейросимволического контура. Это число продиктовано самой логикой декомпозиции управленческого процесса, разбитого на этапы семантического извлечения, генерации гипотез, двойной верификации и последующей адаптивной коррекции [44].

Терминология, принятая в архитектуре больших языковых моделей, требует однозначного сопоставления с функциональными блоками кибернетической системы [45]. Далее ролевые наименования агентов используются как обозначения следующих структурных элементов ИСППР:

- «Агент-Анализатор» — блок многокритериальной генерации транспортных сценариев;
- «Агент-Парсер» функционирует как модуль семантической трансляции и инстанцирования телематических данных; «Агент-Анализатор» представляет собой блок многокритериальной генерации транспортных сценариев;
- «Агент-Валидатор» выступает в роли первичного контура фильтрации стохастических выбросов (ошибок генерации);
- «Агент-Судья» реализует функции модуля логического арбитража и верификации технологических ограничений;
- «Агент-Учитель» является блоком адаптивной калибровки (регулятором с обратной связью).

Подобная трансляция понятийного аппарата позволяет рассматривать каскад нейросетевых моделей не как эвристический алгоритм типа «черный ящик», а как классическую многоуровневую систему управления транспортными потоками. Каждый выделенный модуль решает узкоспециализированную задачу логистики, оперируя строго заданными телематическими входами, физическими ограничениями инфраструктуры и математически обоснованными критериями оценки эффективности использования подвижного состава [41, 42].

Количество же экземпляров каждого типа не фиксировано и определяется масштабом и топологией конкретного развёртывания. В рамках одной организации в произвольный момент времени могут одновременно функционировать десятки и сотни экземпляров одного типа - например, множество экземпляров Агента-Анализатора, каждый из которых обслуживает отдельный элеватор, автопарк или уборочную бригаду, тогда как при мультитенантной эксплуатации на региональной цифровой платформе АПК суммарное число экземпляров всех типов может достигать тысяч. Экземпляры создаются, реплицируются и уничтожаются динамически, в зависимости от текущей нагрузки, границ зоны ответственности и заданного времени жизни (от кратковременных, порождаемых под обработку единичного события, до долгоживущих, сопровождающих полный сезонный цикл). При этом типовая ролевая модель и контракты взаимодействия остаются инвариантными для всех экземпляров, что и обеспечивает горизонтальную масштабируемость системы без изменения её концептуальной архитектуры [46, 47].

Первым этапом алгоритмического цикла является **семантический парсинг и инстанцирование**, выполняемые Агентом-Парсером. Задача агента - преобразовать гетерогенный входящий поток D_{in} (телеметрия IoT, текстовые заявки, метеосводки) в набор RDF-триплетов, совместимых с онтологической моделью. Математически этот процесс описывается как функция отображения неструктурированного контекста C на множество классов O_{class} и свойств O_{prop} онтологии:

$$f_{parse}: D_{in} \rightarrow \{ \langle s, p, o \rangle \mid s \in I, p \in O_{prop}, o \in I \cup L \}, \quad (2.4)$$

где: I - множество экземпляров (инстансов),

L - литералы (числа, строки).

Агент-Парсер использует языковые модели с низкой температурой ($T \approx 0.1$) для извлечения именованных сущностей и их сопоставления с классами онтологии.

Второй этап это генерация гипотез Агентом-Анализатором, который, получив триггер от Парсера формирует SPARQL-запрос к графу знаний для выборки доступных ресурсов. Механизм OG-RAG здесь работает следующим образом: агент определяет потребность (вывоз зерна) и осуществляет обход графа по связям `createsDemandFor` → `TransportAsset` [22]. При этом автоматически учитываются ограничения совместимости, заложенные в онтологии (рисунок 2.2) [48-49].

Алгоритм работы Агента-Анализатора можно представить следующей последовательностью шагов:

1. Идентификация потребности: Определение узла-источника (комбайн) и требуемых параметров сервиса (объем, время).

2. Поиск кандидатов (Graph Traversal): Выборка всех экземпляров класса `TransportAsset`, имеющих статус `Available` и находящихся в радиусе доступности.

3. Фильтрация (Soft Constraints): Ранжирование кандидатов по целевой функции E_{sys} (расчетное время прибытия ЕТА, стоимость).

4. Формирование сценария: Генерация кортежа $\langle \text{Ресурс}, \text{Маршрут}, \text{Слот} \rangle$ [30, 31]

Визуализация алгоритма работы каскада на этапе генерации и первичной обработки представлена на рисунке 2.5.

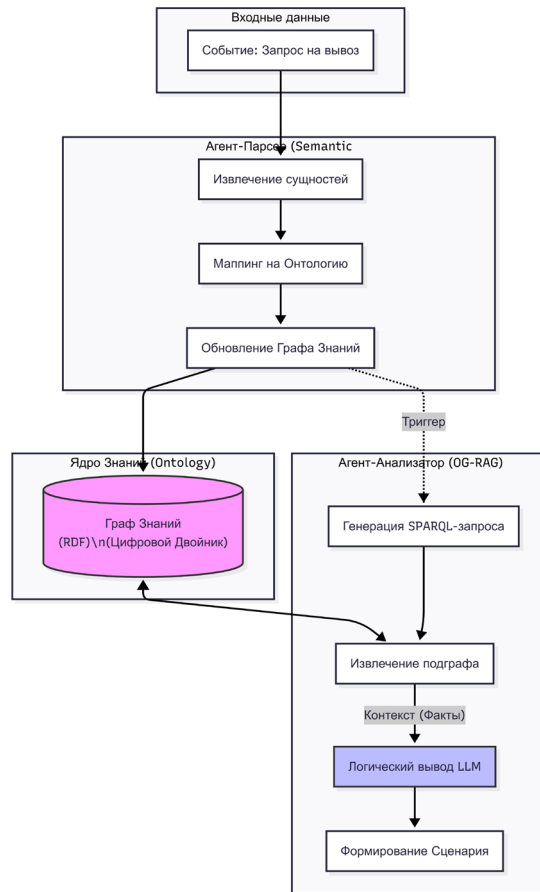


Рисунок 2.5 - Алгоритмическая схема работы OG-RAG в контуре генерации решений

Третий этап заключается в **двухфакторной верификации**, выполняемая Агентом-Валидатором и Агентом-Судьей.

Агент-Валидатор осуществляет технический контроль генерации, анализируя распределение логитов (вероятностей токенов) в ответе Анализатора и оценивает энтропию $H(P)$ как индикатор неуверенности модели на данном шаге генерации. Высокое значение энтропии не является прямым признаком фактической ложности ответа, однако сигнализирует о повышенной неопределённости выбора токена; сценарии, для которых энтропия превышает пороговое значение ϵ , помечаются как требующие обязательной перепроверки на последующем этапе семантического арбитража [50, 51]:

$$H(P) = - \sum p_i \log p_i > \epsilon \Rightarrow \text{Flag for review} \quad (2.5)$$

Тем самым энтропийный порог выполняет функцию фильтра первого уровня, перенаправляющего потенциально ненадёжные гипотезы на строгую проверку Агентом-Судьей.

Агент-Судья осуществляет семантический контроль, проверяя сгенерированный сценарий на соответствие жестким ограничениям, описанным в разделе 2.2 (таблица 2.6). Математически это проверка выполнения системы неравенств:

$$\forall m \in M_{markers}: V(m)_{scenario} \in [V_{min}, V_{max}] \quad (2.6)$$

где $M_{markers}$ - множество маркеров (влажность, очередь, статус оборудования). Если хотя бы одно условие нарушено, Судья возвращает сценарий на доработку с указанием конкретной причины отказа.

Четвертый этап - **адаптивное обучение**, реализуемое Агентом-Учителем. Этот процесс происходит асинхронно. Учитель анализирует журнал операций, содержащий тройки: ⟨Ситуация,Решение,Результат⟩. На основе анализа отклонений фактических KPI от плановых, Учитель корректирует мета-параметры системы. Это реализует кибернетический принцип обратной связи, превращая систему из статической в адаптивную.

Полный алгоритм взаимодействия агентов, включая циклы обратной связи и верификации, представлен на рисунке 2.6.

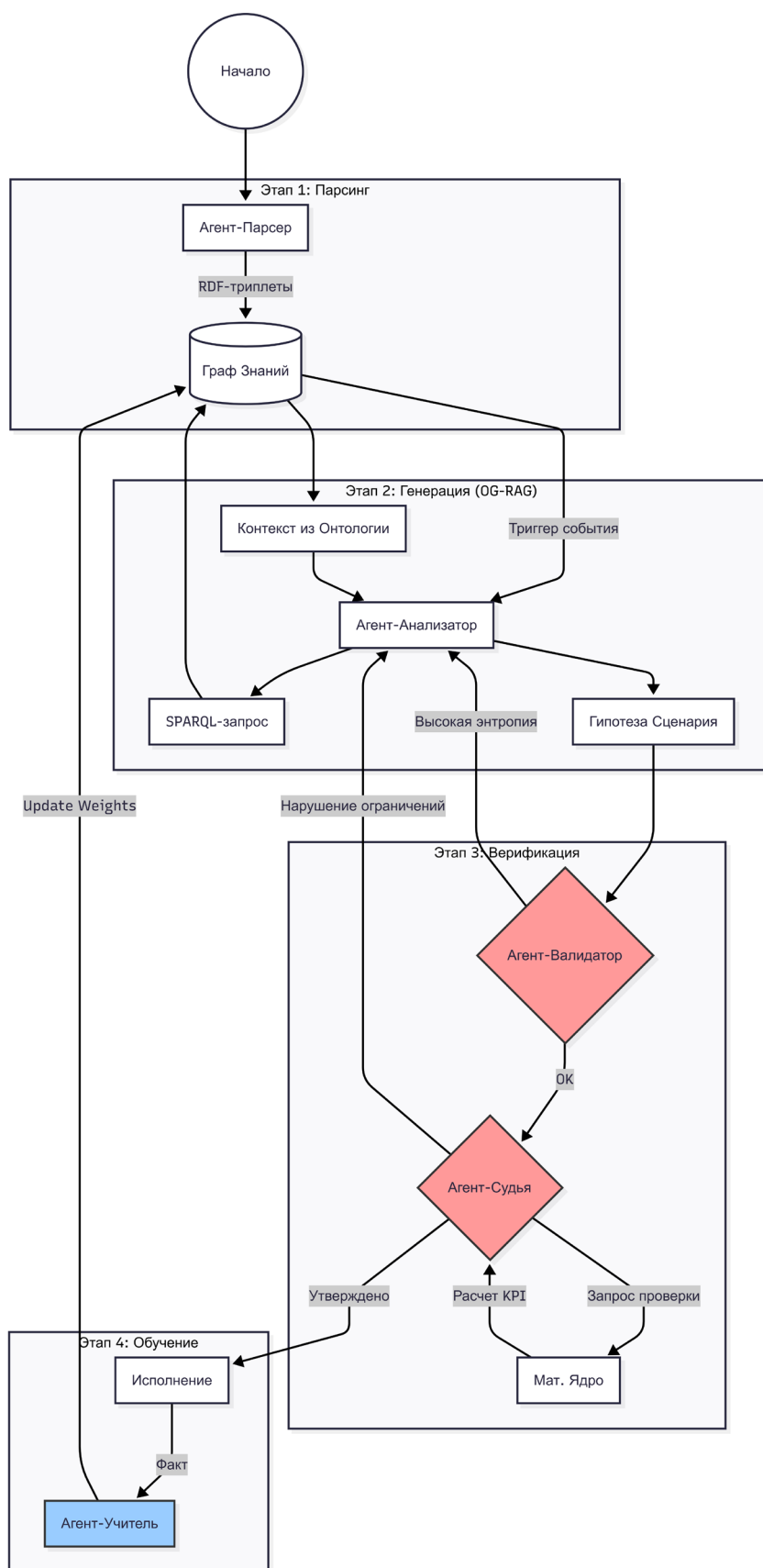


Рисунок 2.6 - Блок-схема алгоритма принятия решения в каскадной архитектуре ИСППР

Заложенный в основу системы алгоритмический цикл опирается на принципы нейросимволической обработки. Проходя через каскад агентов, сырые данные последовательно трансформируются, обретая структурную определенность и управленческую ценность. Формирующий семантический слой тандем Парсера и Анализатора берет на себя интерпретацию контекста. Генерируя вариативные гипотезы, этот модуль успешно обходит фундаментальное ограничение классической математики - неспособность напрямую работать с неструктурированным информационным потоком. Контур верификации (Валидатор и Судья) существенно повышает надёжность процесса, перенаправляя гипотезы с высокой неопределённостью на дополнительную проверку и отсекая физически нереализуемые сценарии на этапе семантического арбитража [41-44]. Адаптивный слой (Учитель) замыкает кибернетическую петлю обратной связи, позволяя системе накапливать опыт и автономно корректировать параметры принятия решений в ответ на системные сдвиги во внешней среде [32].

Звеном, обеспечивающим переход от качественной оценки сценариев к количественной оптимизации, является взаимодействие Агента-Судьи с Математическим ядром. Если онтология определяет пространство *допустимых* решений (через систему ограничений и правил), то математический аппарат отвечает за выбор *оптимального* решения в многомерном пространстве критериев эффективности. Агент-Судья не вычисляет значения целевой функции самостоятельно, а делегирует эту задачу детерминированным алгоритмам, передавая им структурированные параметры верифицированных сценариев. Это позволяет исключить вычислительные погрешности, свойственные языковым моделям, и гарантировать точность экономических и временных расчетов [52-53].

Однако практическая реализация функции целеполагания и выбора оптимального сценария требует строгого математического описания. Необходимо формализовать методы расчета матриц эффективности, алгоритмы многокритериальной оптимизации в условиях неопределенности и

математические модели адаптации системы на основе обратной связи. Разработка и обоснование данного математического аппарата, составляющего вычислительное ядро системы, является предметом следующей главы диссертационного исследования [53].

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

3.1. Формализация задачи многокритериального выбора сценария транспортировки на основе онтологических ограничений

Переход от этапа семантического анализа и интерпретации неструктурированных данных, реализуемого каскадом интеллектуальных агентов на базе больших языковых моделей (как описано в Главе 2), к процедуре принятия оптимального управленческого решения требует выполнения строгой математической формализации пространства поиска. В архитектуре ИСППР данный этап выступает шлюзом, обеспечивающим трансформацию вероятностных, «мягких» суждений генеративного искусственного интеллекта в детерминированные, верифицируемые структуры данных. Передача управления от Агента-Анализатора к Агенту-Судье и Математическому ядру фиксирует смену вычислительной парадигмы внутри системы. Сформировав пул гипотез на базе онтологических связей, Анализатор уступает место механизмам жесткой фильтрации и ранжирования. На этапе генерации система оперирует категориями смысла и контекста, однако итоговая оценка эффективности требует применения строгих численных методов. Преодоление этого барьера сводится к однозначному отображению семантического пространства в систему математических переменных [54].

В рамках математических построений данной главы наименования агентов (Анализатор, Судья, Учитель, Парсер) обозначают не единичные вычислительные сущности, а классы функциональных операторов. Они реализуют строго заданные преобразования над пространством сценариев. Архитектура фиксирует ровно пять базовых типов, зеркально отражая логику декомпозиции управленческой задачи [55]. При этом количество активных экземпляров каждого класса остается величиной переменной, напрямую зависящей от масштаба и конфигурации конкретного развертывания. Формулы

вида $d^* = \arg \max_{d_i \in D^*} V_i$ или процедура коррекции весов $w_p^{(t+1)}$ описывают логику, единую для всех экземпляров данного типа: при параллельном обслуживании нескольких полей, элеваторов или автопарков соответствующие вычисления выполняются независимо для каждого экземпляра над его собственным подмножеством ресурсов R_t и заявок Z_t .

Первичное назначение весовых коэффициентов выполняется экспертным путём с последующей проверкой согласованности суждений. Исходное распределение отражает структуру себестоимости перевозок зерна на плече до 50 км, в которой затратная и временная составляющие доминируют над остальными: $w_1 = 0,30$ (прямые затраты), $w_2 = 0,35$ (соблюдение временных окон), $w_3 = 0,20$ (сохранность качества), $w_4 = 0,15$ (риск срыва рейса). Преобладание временного критерия обусловлено спецификой уборочной кампании, когда простой уборочной техники из-за неподанного транспорта обходится дороже перерасхода топлива на маршруте. Существенно, что приведённые значения задают лишь начальное приближение: в процессе эксплуатации они уточняются Агентом-Учителем по результатам сопоставления плановых и фактических показателей (раздел 3.3), вследствие чего система не остаётся зависимой от качества первичной экспертной оценки.

Разделение существенно для корректной интерпретации математической модели. Приводимые далее выражения формализуют поведение *типа* агента; при переходе к промышленной эксплуатации каждый экземпляр применяет эти выражения к локальному срезу операционной обстановки, а согласование их решений (например, во избежание назначения одного транспортного средства двум заявкам разными экземплярами Агента-Анализатора) обеспечивается на уровне общей онтологической шины и не изменяет самих формальных постановок. Тем самым математический аппарат сохраняет универсальность независимо от того, развёрнута ли система в единственном экземпляре

каждого типа для отдельного хозяйства или в тысячах экземпляров в масштабах региональной платформы [56].

Задача формализации в данном контексте сводится к построению дискретной модели принятия решений, где семантические конструкции онтологии подвергаются процедуре квантификации и векторизации. Абстрактные классы и экземпляры онтологии, такие как «Грузовое транспортное средство», «Маршрут доставки» или «Риск выпадения осадков», трансформируются в упорядоченные векторные и матричные величины, пригодные для обработки детерминированными алгоритмами оптимизации. Например, физический объект «Зерновоз» представляется вектором состояния, компоненты которого (грузоподъемность, текущие координаты, стоимость километра пробега, допустимый тип разгрузки) становятся коэффициентами в системе ограничений и целевой функции. Аналогичным образом, качественное понятие «Риск» преобразуется в количественную оценку вероятности наступления неблагоприятного события или штрафной коэффициент в функции потерь [55-56].

Такая трансформация сохраняет когнитивную гибкость LLM-агентов и одновременно обеспечивает строгость, присущую математическому аппарату. Формируемая модель выступает «цифровым слепком» операционной ситуации, очищенным от лингвистической избыточности и приведённым к каноническому виду задачи исследования операций. К сценариям, представленным в таком виде, применим аппарат линейного программирования, теории игр и стохастической оптимизации, что делает итоговое решение не только логически обоснованным, но и оптимальным по заданному вектору критериев [57–59].

Пусть Ω - предметная область транспортной логистики АПК, описанная в онтологической модели. В момент времени t состояние системы характеризуется множеством доступных ресурсов R_t (транспортные средства, складские мощности) и множеством активных заявок на обслуживание

Z_t (потребности в вывозе урожая). **Агент-Анализатор**, используя механизм OG-RAG, формирует множество альтернативных сценариев (стратегий)

$$D = d_1, d_2, \dots, d_m \quad (3.1)$$

где каждый сценарий d_i представляет собой кортеж, описывающий конкретный вариант аллокации ресурсов:

$$d_i = \langle r_k, z_l, \mu_{kl}, \tau_{start} \rangle \quad (3.2)$$

где: $r_k \in R_t$ - единица транспортного ресурса (например, конкретный зерновоз);

$z_l \in Z_t$ - обслуживаемая заявка (лот груза на поле);

μ_{kl} - маршрут движения (последовательность ребер дорожного графа);

τ_{start} - планируемое время начала операции.

Однако, как было показано в разделе 1.2, функционирование системы происходит в условиях стохастической внешней среды. Множество возможных состояний среды («состояний природы») обозначим как:

$$S = s_1, s_2, \dots, s_n \quad (3.3)$$

Каждое состояние s_j характеризуется вектором параметров $\vec{p}_j$ (температура, осадки, дорожный трафик), значения которых определяются **Агентом-Парсером** на основе прогнозов.

Проблема, решаемая на данном этапе это фильтрация множества D на основе системы жестких ограничений (Hard Constraints), заданных в онтологии. Эту функцию выполняет **Агент-Судья**. Математически это описывается введением бинарной функции допустимости

$\Phi(d_i, s_j)$, которая принимает значение 1, если сценарий d_i физически и технологически реализуем в состоянии среды s_j , и 0 в противном случае.

Система ограничений Φ декомпозируется на подмножества, соответствующие доменам онтологии:

$$\Phi(d_i, s_j) = \Phi_{tech}(d_i) \wedge \Phi_{geo}(d_i, s_j) \wedge \Phi_{time}(d_i, s_j) \wedge \Phi_{quality}(d_i, s_j) \quad (3.4)$$

Рассмотрим формализацию данных ограничений подробнее (таблица 3.1).

Таблица 3.1- Математическая формализация жестких ограничений (Hard Constraints) в модели Агента-Судьи

Тип ограничения	Онтологическое основание	Математическое условие ($\Phi = 1$)	Физический смысл
Технологическое (Φ_{tech})	Совместимость ТС и Инфраструктуры	$Type(r_k) \in AllowedTypes(Dest(z_l))$	Тип разгрузки автомобиля соответствует приемному устройству элеватора.
Геопространственное (Φ_{geo})	Проходимость и доступность	$\forall e \in \mu_{kl}: Load(r_k) \leq Limit(e) \cdot K_{weather}(s_j)$	Нагрузка на ось не превышает лимит дороги (с учетом погодного коэффициента $K_{weather}$).
Временное (Φ_{time})	Режим работы и ЛТ	$ETA(d_i, s_j) \in [T_{open}, T_{close}]$	Расчетное время прибытия попадает в часы работы склада.
Качественное ($\Phi_{quality}$)	Сохранность груза	$\int_{t_0}^{ETA} f_{deg}(Q, s_j) dt \leq Q_{crit}$	Накопленный ущерб качеству (температурный интеграл) не превышает критического порога.

Множество допустимых сценариев $D^* \subseteq D$ формируется как:

$$D^* = \{d_i \in D \mid \forall s_j \in S_{active}: \Phi(d_i, s_j) = 1\} \quad (3.5)$$

Только сценарии из множества D^* допускаются до этапа расчета экономической эффективности. Это позволяет отсеять заведомо нереализуемые варианты (например, маршрут через закрытый мост или перевозку влажного зерна на дальнее расстояние), существенно сокращая размерность задачи оптимизации [60].

Следующим шагом является формирование **матрицы эффективности**

$$A = \| a_{ij} \|, \quad (3.6)$$

где элемент a_{ij} отражает количественную оценку эффективности применения сценария d_i при реализации состояния среды s_j . Значение a_{ij} представляет собой свертку вектора частных критериев.

Введем вектор частных критериев эффективности для пары (d_i, s_j) :

$$\vec{K}(d_i, s_j) = k_1, k_2, k_3, k_4 \quad (3.7)$$

где: $k_1 = C(d_i, s_j)$ - прямые затраты (стоимость рейса);

$k_2 = |\Delta T(d_i, s_j)|$ - отклонение от временного окна (JIT-метрика);

$k_3 = Q_{loss}(d_i, s_j)$ - прогнозируемая потеря качества;

$k_4 = R_{risk}(d_i, s_j)$ - риск срыва рейса.

Перевод экономических показателей в плоскость транспортной инженерии требует раскрытия критерия прямых затрат через технико-эксплуатационные показатели работы подвижного состава. Транспортный процесс вывоза урожая декомпозируется на ездки; совокупность ездки с грузом, порожнего перегона и простоя под погрузочно-разгрузочными операциями образует оборот транспортного средства, исходя из чего параметры оборота служат физическими переменными, которыми должно управлять оптимизационное ядро.

Степень производительного использования пробега характеризуется коэффициентом использования пробега

$$\beta = \frac{L_{гр}}{L_{общ}} = \frac{L_{гр}}{L_{гр} + L_{пор} + L_{н}}, \quad (3.8)$$

где: $L_{гр}$ - пробег с грузом, км;

$L_{пор}$ - порожний пробег между пунктами разгрузки и последующей погрузки, км;

$L_{н}$ - нулевой пробег от места стоянки до первого пункта погрузки и обратно, км.

Полнота использования номинальной грузоподъемности оценивается статическим и динамическим коэффициентами:

$$\gamma_{\text{ст}} = \frac{q_{\text{факт}}}{q_{\text{н}}}, \gamma_{\text{дин}} = \frac{\sum_e q_{\text{факт}}^e l_{\text{гр}}^e}{q_{\text{н}} \sum_e l_{\text{гр}}^e}, \quad (3.9)$$

где: $q_{\text{н}}$ - номинальная грузоподъёмность единицы подвижного состава, т;

$q_{\text{факт}}^e$ - фактическая масса груза в езде e , т;

$l_{\text{гр}}^e$ - длина ездки с грузом, км.

Динамический коэффициент учитывает распределение загрузки по плечам маршрута и потому служит более точным измерителем при разноплечевых схемах вывоза с нескольких полей.

Продолжительность оборота определяется технической скоростью и структурой простоев:

$$t_{\text{об}} = \frac{l_{\text{гр}}}{V_{\text{т}} \beta} + t_{\text{п-р}} + t_{\text{ож}}, \quad (3.10)$$

где $V_{\text{т}}$ - техническая скорость движения, км/ч;

$t_{\text{п-р}}$ - время погрузочно-разгрузочных операций, ч;

$t_{\text{ож}}$ - время ожидания в очереди на пункте приёма, ч.

Величина $t_{\text{ож}}$ определяется загрузкой узла инфраструктуры и рассчитывается средствами теории массового обслуживания (раздел 3.3), что связывает модель подвижного состава с моделью пропускной способности элеватора.

Суточная производительность единицы подвижного состава в тонно-километрах составляет

$$W_{\text{сут}} = \frac{q_{\text{н}} \gamma_{\text{дин}} V_{\text{т}} T_{\text{н}} \beta l_{\text{гр}}}{l_{\text{гр}} + V_{\text{т}} \beta (t_{\text{п-р}} + t_{\text{ож}})}, \quad (3.11)$$

где: $T_{\text{н}}$ - время в наряде, ч.

Раскрытие критерия прямых затрат через приведённые показатели даёт выражение удельной себестоимости перевозки в расчёте на тонно-километр:

$$k_1 = C_{\text{уд}} = \frac{C_{\text{пер}} L_{\text{общ}} + C_{\text{пост}} T_{\text{н}}}{q_{\text{н}} \gamma_{\text{дин}} L_{\text{гр}}} = \frac{C_{\text{пер}} + C_{\text{пост}} T_{\text{н}} / L_{\text{общ}}}{q_{\text{н}} \gamma_{\text{дин}} \beta}, \quad (3.12)$$

где $C_{\text{пер}}$ - переменные затраты на 1 км пробега, руб./км;

$C_{\text{пост}}$ - постоянные затраты за час работы, руб./ч.

Выражение (3.12) показывает, что снижение удельных издержек достигается не изменением тарифных ставок, а ростом произведения $q_n \gamma_{\text{дин}} \beta$, то есть повышением полноты загрузки и доли производительного пробега. Тем самым семантическая гипотеза, порождённая нейросетевым контуром, преобразуется в измеримый технологический результат: алгоритмическое ядро сокращает порожние перегоны за счёт построения сдвоенных и кольцевых маршрутов между производственными участками и узлами хранения, а перераспределение грузопотоков на терминалы с резервом пропускной способности уменьшает $t_{\text{ож}}$ и продолжительность оборота.

Временные и качественные критерии модели детерминированы теми же физическими параметрами. Отклонение от заданного временного окна k_2 определяется расчётным моментом прибытия, вычисляемым через V_T и составляющие простоя, а прогнозируемая потеря качества k_3 пропорциональна времени нахождения груза в транспортном цикле, то есть величине $t_{\text{об}}$. Сокращение оборота одновременно улучшает оба критерия и повышает коэффициент выпуска парка на линию без привлечения дополнительных транспортных средств [61-62].

Приведённая параметризация лишает целевую функцию абстрактности: оптимизационный аппарат оперирует не обобщёнными штрафами, а технико-эксплуатационными показателями работы подвижного состава, а качество генерируемых решений оценивается через провозную способность логистической сети и себестоимость транспортных операций [63].

Поскольку критерии имеют разную размерность, для расчета элементов матрицы эффективности a_{ij} необходимо выполнить процедуру нормализации и взвешивания.

Используем метод линейной свертки с динамическими весами, определяемыми как:

$$a_{ij} = \sum_{p=1}^4 w_p \cdot \hat{k}_p(d_i, s_j) \quad (3.13)$$

где w_p - весовой коэффициент p -го критерия ($\sum w_p = 1$),

$\hat{k}_p$ - нормализованное значение критерия. Для критериев, подлежащих минимизации (затраты, время, риск), нормализация выполняется по формуле:

$$\hat{k}_p(x) = \frac{k_p^{max} - x}{k_p^{max} - k_p^{min}} \quad (3.14)$$

где: k_p^{max} и k_p^{min} - экстремальные значения показателя на множестве D^* .

Получается, чем ближе значение a_{ij} к 1, тем выше эффективность сценария.

Сформированная матрица A размерности $m \times n$ является математическим отображением пространства решений:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

причем:

$$\begin{cases} m = |D^*| \\ n = |S| \end{cases} \quad (3.16)$$

Строки матрицы соответствуют стратегиям управления (сценариям), а столбцы - вариантам развития событий во внешней среде (состояниям природы). Данная матрица служит входным объектом для алгоритма выбора оптимального решения в условиях неопределенности, который будет рассмотрен в следующем разделе.

3.2. Разработка алгоритма оценки и выбора оптимального управленческого решения в условиях неопределенности

Сформированная матрица эффективности $A = \| a_{ij} \|$ представляет собой формализованное описание пространства решений, однако выбор конкретного сценария d_i осложняется фундаментальной неопределенностью относительно того, какое именно состояние среды s_j будет реализовано [64]. В классической теории принятия решений данная задача сводится к максимизации математического ожидания выигрыша, что требует знания точного распределения вероятностей:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \quad (3.17)$$

наступления состояний s_j .

Однако в реальных условиях операционной логистики АПК, характеризующейся высокой динамикой и влиянием труднопрогнозируемых стохастических факторов (локальные микроклиматические изменения, внезапные отказы техники, колебания пропускной способности элеваторов), точное определение вектора вероятностей P часто представляется невозможным. Классические статистические методы требуют репрезентативных выборок для оценки вероятностей, которых в условиях уникальности каждого сельскохозяйственного сезона зачастую не существует. **Агент-Парсер**, анализируя неструктурированные метеосводки, текстовые отчеты агрономов и исторические данные, способен предоставить лишь **интервальные оценки** (например, вероятность дождя лежит в диапазоне от 0.6 до 0.8) или **иерархическое ранжирование** вероятностей (например, событие «Осадки» более вероятно, чем «Ясно», что формализуется как неравенство $p_1 \geq p_2$) [65]. Попытка свести эту неполную информацию к точечной оценке (одному вектору) привела бы к ложной точности и высоким рискам принятия ошибочного решения при малейшем отклонении реальной ситуации от модели.

Для решения задачи выбора оптимальной стратегии в условиях такой неполной (нечеткой) информации в рамках математического ядра системы предлагается использовать **развитие группы методов районирования**, адаптированное для работы в контуре интеллектуальной системы. Сущность данного методологического подхода заключается в фундаментальном отказе от попытки «угадать» единственное «идеальное» распределение вероятностей. Вместо этого фокус смещается на анализ **устойчивости (робастности)** решений относительно вариаций параметров внешней среды. Система ищет не то решение, которое максимально эффективно в одной конкретной точке вероятностного пространства, а то, которое сохраняет свою эффективность в широком диапазоне возможных сценариев, совместимых с имеющейся у Агента-Парсера информацией [65-67].

С геометрической точки зрения, пространство всех теоретически возможных распределений вероятностей состояний природы образует многомерный симплекс. Метод районирования позволяет разбить этот симплекс на конечное число выпуклых подмножеств (районов или полиэдров доминирования). В пределах каждого такого района одна конкретная стратегия d_i (например, «Использовать маршрут через северный мост») гарантированно доминирует над всеми остальными, то есть обеспечивает максимальное значение целевой функции. Задача Агента-Судьи в этой схеме сводится к тому, чтобы наложить ограничения, полученные от Агента-Парсера (например, $p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_n$), на карту районов симплекса и определить, в какой район попадает область допустимых вероятностей. Это позволяет выбрать стратегию, которая будет математически обоснованной и безопасной даже при значительных флуктуациях реальных погодных или дорожных условий внутри заданных границ [67-70].

Пусть известно иерархическое соотношение вероятностей состояний среды, полученное от Агента-Парсера на основе анализа прогнозов:

$$p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_n \quad (3.18)$$

где s_1 - наиболее вероятное состояние, характеризуемое вероятностью p_1 (например, «Штатная работа»),

s_n - наименее вероятное состояние, характеризуемое вероятностью p_n («Форс-мажор»).

Данное условие ограничивает область поиска в симплексе Σ .

Задача выбора оптимального сценария d^* формулируется как поиск стратегии, обеспечивающей максимальную эффективность с учетом заданного ранжирования вероятностей. Для этого используется алгоритм, сводящий задачу к серии линейных оптимизационных задач. Для каждого сценария d_i рассчитывается максимально возможная эффективность E_i^{max} при наихудшем (для конкурентов) распределении вероятностей, удовлетворяющем условию иерархии:

$$E_i(P) = \sum_{j=1}^n a_{ij} p_j \rightarrow \max \quad (3.19)$$

при ограничениях:

$$\sum_{j=1}^n p_j = 1, p_j \geq p_{j+1} \geq 0 \quad (3.20)$$

Решение данной задачи имеет аналитическое выражение. Оптимальное распределение вероятностей P^* для сценария d_i достигается в одной из вершин многогранника допустимых решений, которые имеют вид:

$$P^{(k)} = \underbrace{\frac{1}{k}, \dots, \frac{1}{k}}_k, 0, \dots, 0, k = 1, \dots, n \quad (3.21)$$

То есть, вероятность равномерно распределяется между k наиболее вероятными состояниями, а остальные вероятности равны нулю.

Изложенный подход развивает классический аппарат принятия решений в условиях неопределённости, восходящий к критериям Гурвица и принципу недостаточного основания Лапласа, и в части учёта порядковых ограничений на вероятности состояний природы опирается на метод районирования

пространства распределений Оптимум линейной формы (формула 3.19) на многограннике, заданном условиями нормирования и монотонного упорядочения (формула 3.20), достигается в одной из вершин этого многогранника; допустимые вершины имеют вид равномерного распределения вероятности между k — старшими состояниями (формула 3.21), что является прямым следствием линейности целевой функции на выпуклом компактном множестве [71-74]. Оригинальность предлагаемого решения состоит не в самой процедуре районирования, а в её встраивании в контур интеллектуальной системы: границы области допустимых распределений формируются не экспертно, а автоматически - по результатам семантического анализа неструктурированных прогнозных данных Агентом-Парсером.

Следовательно, для каждого сценария d_i можно вычислить набор оценок эффективности V_{ik} для каждого k :

$$V_{ik} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k a_{ij} \quad (3.22)$$

Итоговая оценка эффективности сценария d_i определяется как:

$$V_i = \max_k V_{ik}$$

А оптимальным признается сценарий d^* , имеющий максимальную оценку V_i :

$$d^* = \operatorname{argmax}_{d_i \in D^*} V_i \quad (3.23)$$

Алгоритм реализуется в **Математическом ядре** системы. Он позволяет Агенту-Судье выбрать робастное (т.е. устойчивое) к ошибкам в оценке вероятностей решение, при этом учитывающее имеющуюся информацию о трендах (иерархию p_j). После выбора стратегического сценария d^* (например, «Назначить зерновоз №5 на вывоз с поля "Заречное" на Элеватор "Центральный"») необходимо детализировать его до уровня конкретного маршрута и временного графика. Эта задача решается модулем **динамической маршрутизации**, реализующим алгоритм VRP with Profits (Vehicle Routing Problem with Profits) в реальном времени.

Целевая функция маршрутизации F_{route} строится с учетом штрафов за нарушение ЛТ-окон, определенных в разделе 2.2:

$$\begin{cases} JIT_k = \alpha \cdot \max(0, T_{arrival}^k - T_{late}^k) + \beta \cdot \max(0, T_{early}^k - T_{arrival}^k) \\ F_{route} = \sum_{k \in K} (C_{dist}(r_k) + JIT_k) \rightarrow \min \end{cases} \quad (3.24)$$

где: K - множество точек посещения в маршруте,

C_{dist} - стоимость пробега,

α и β - штрафы за опоздание и преждевременное прибытие.

Особенностью предлагаемой системы является реакция на **событийные триггеры** (из таблицы 2.7). При поступлении сигнала о триггере Агент-Анализатор обновляет граф дорожной сети (увеличивает веса ребер, соответствующих проблемному участку) и инициирует локальный пересчет маршрута для выбранного сценария d^* [75-76]. Если новый маршрут нарушает жесткие ограничения, Агент-Судья отменяет сценарий d^* и запускает процедуру выбора следующего по эффективности сценария из матрицы A .

Следовательно, алгоритм принятия решений представляет собой двухуровневую процедуру:

— **Стратегический уровень (районирование):** выбор пары «ресурс - заявка» на основе матрицы эффективности и робастной оценки вероятностей в условиях неполной информации о распределении состояний среды.

— **Тактический уровень (динамическая маршрутизация и диспетчеризация):** построение маршрута для выбранной пары с учётом текущего состояния дорожной сети и ограничений по временным окнам.

Предметом экспериментальной проверки в настоящей работе выступает стратегический уровень, определяющий качество закрепления подвижного состава за заявками, поскольку именно на этом уровне реализуется предлагаемый механизм принятия решений в условиях неопределённости. Тактический уровень описан как компонент архитектуры и опирается на известные алгоритмы решения задачи маршрутизации с временными окнами; его детальная параметризация и экспериментальная оценка для гетерогенного

парка составляют самостоятельную задачу и отнесены к направлениям дальнейшего развития системы.

Применимость предложенной процедуры в контуре оперативного управления определяется её вычислительной трудоёмкостью. Формирование матрицы эффективности требует расчёта $m \times n$ элементов, каждый из которых представляет свёртку четырёх частных критериев, что даёт оценку $O(mnk)$, где m - число допустимых сценариев, np - число состояний среды, k - число критериев. Процедура районирования сводится к вычислению оценки D_i для каждого сценария по np состояниям, то есть имеет сложность $O(mn)$. Итоговая трудоёмкость цикла принятия решения линейна по числу сценариев и не содержит комбинаторного перебора, что принципиально отличает предлагаемый подход от точных методов решения задачи маршрутизации.

Размерность задачи ограничена сверху естественными пределами предметной области. Число допустимых сценариев определяется произведением мощности парка на число доступных пунктов приёмки и после отсека не допустимых вариантов функцией Φ не превышает нескольких десятков, число состояний среды равно пяти. При таких размерностях время выработки решения составляет единицы миллисекунд, что на несколько порядков меньше характерного интервала между событиями в контуре оперативного управления вывозом урожая, составляющего десятки минут. Вычислительным ограничением системы выступает, таким образом, не математическое ядро, а задержка семантического контура, связанная с обработкой неструктурированных данных языковыми моделями.

Визуализация алгоритма выбора и маршрутизации представлена на рисунке 3.1.

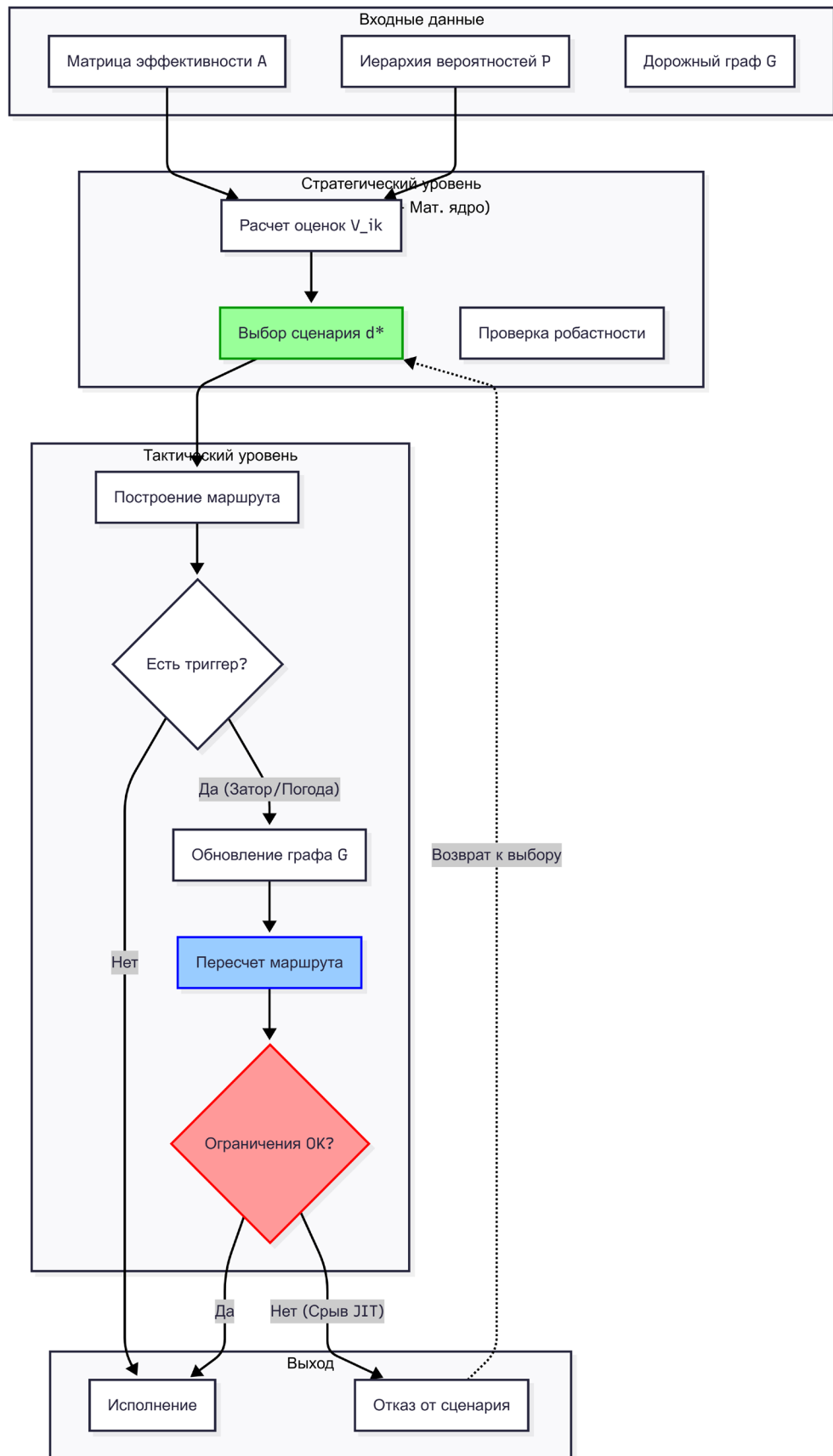


Рисунок 3.1- Блок-схема алгоритма многокритериального выбора и динамической маршрутизации в условиях неопределенности

3.3. Математическая модель адаптивного управления и коррекции поведения агентов (Модуль «Учитель»)

Замыкание контура управления в предлагаемой архитектуре ИСППР реализуется посредством **Агента-Учителя**, который обеспечивает адаптацию системы к дрейфу параметров внешней среды и уточнение онтологической модели на основе накопленного опыта. С позиций технической кибернетики, функционирование транспортно-логистической системы АПК представляет собой нестационарный стохастический процесс, где детерминированные планы, сформированные на этапе анализа, неизбежно подвергаются эрозии под воздействием случайных возмущений. Реальные показатели логистических операций - время в пути, длительность ожидания разгрузки, скорость приемки зерна - выступают случайными величинами с нестационарным распределением. Роль регулятора по отклонению в такой среде берет на себя Агент-Учитель. Отказываясь от жесткого программного управления, он замыкает контур обратной связи. Переход к адаптивной модели заставляет систему непрерывно калиброваться. Каждая новая итерация планирования снижает общую энтропию и повышает точность прогнозов.

Математически функция Агента-Учителя сводится к минимизации функционала ошибки. Модуль сопоставляет два вектора. Первый содержит плановые метрики, рассчитанные Агентом-Анализатором на базе априорных нормативных и паспортных данных. Второй формируется из фактических результатов, собранных апостериори через системы телематики. Анализируя массивы исторических логов, агент выявляет систематические смещения и корректирует алгоритмы принятия решений [77-78].

Например, если на определенном участке дорожной сети фактическая скорость движения систематически ниже расчетной, или время обслуживания на конкретном элеваторе превышает норматив, Агент-Учитель инициирует процедуру калибровки атрибутов в Графе Знаний. Тем самым, онтология трансформируется из статического справочника в динамическую модель

(«Цифровой Двойник»), параметры которой (веса ребер графа, пропускные способности узлов) постоянно актуализируются, отражая реальное состояние физической системы.

Особое внимание в моделировании уделяется поведению узловых элементов инфраструктуры - элеваторов и портовых терминалов, которые в пиковые периоды уборочной кампании становятся «узкими местами» логистической цепи. Для математического описания процессов, протекающих в этих узлах, применяется аппарат **теории массового обслуживания (ТМО)** на базе марковских процессов. Элеватор рассматривается как многоканальная система массового обслуживания (СМО) с очередью, где входящий поток заявок (прибытие грузовиков) и поток обслуживания (разгрузка) носят вероятностный характер. Состояние системы в любой момент времени описывается вероятностью нахождения в ней определенного количества транспортных средств. Использование марковских моделей позволяет Агенту-Учителю не просто фиксировать факт очереди, а восстанавливать скрытые параметры системы (например, реальную интенсивность обслуживания μ), решать уравнения состояния и прогнозировать вероятность возникновения заторов в будущем, что служит входными данными для Агента-Анализатора при маршрутизации потоков [79].

Рассмотрим работу пункта приемки зерна (элеватора) как систему массового обслуживания (СМО). Состояние системы в момент времени t описывается вероятностью $p_k(t)$ нахождения в ней k транспортных средств (включая обслуживаемые и ожидающие в очереди). Интенсивность входящего потока заявок (прибытия грузовиков) обозначим как λ , а интенсивность обслуживания (скорость разгрузки) - как μ . В реальной эксплуатации параметр μ не будет константой: он зависит от влажности зерна, типа кузова автомобиля и технического состояния оборудования. Агент-Учитель анализирует исторические треки завершённых операций разгрузки и восстанавливает фактическую интенсивность обслуживания μ_{fact} как оценку, обратную к

среднему наблюдаемому времени обслуживания - выборочное среднее длительности разгрузки по накопленной телеметрии. Полученная оценка подставляется в стационарные уравнения (формулы 3.25-3.27), что и составляет решение обратной задачи ТМО - восстановление скрытого параметра системы по наблюдаемой статистике потока [80-83].

Пункт приёмки рассматривается как многоканальная система массового обслуживания с ожиданием, в которой входящий поток заявок и поток обслуживания приняты пуассоновскими, что позволяет описать динамику состояний марковским процессом гибели и размножения. Для стационарного режима (когда $t \rightarrow \infty$, что соответствует установившемуся ритму работы) вероятности состояний p_k определяются рекуррентными соотношениями:

$$p_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k} p_{k-1}, \quad (3.25)$$

где λ_k и μ_k - интенсивности перехода между соседними состояниями. Значения p_k замыкаются условием нормировки

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1, \quad (3.26)$$

из которого однозначно определяется вероятность p_0 свободного состояния системы. Среднее число транспортных средств в системе вычисляется как $\bar{N} = \sum_{k=1}^{\infty} k p_k$, после чего математическое ожидание времени пребывания T_{sys} (время ожидания в очереди и время разгрузки) находится по формуле Литтла:

$$T_{sys} = \frac{\bar{N}}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^{\infty} k p_k, \quad (3.27)$$

Если фактическое время пребывания T_{fact} , зафиксированное средствами телеметрии, систематически превышает плановое T_{plan} , это свидетельствует о структурном изменении параметров системы (например, скрытая поломка оборудования или снижение квалификации персонала)[84-85]. В этом случае Агент-Учитель формирует управляющее воздействие на обновление

Онтологии: корректируется атрибут `intakeRate` (скорость приемки) для соответствующего экземпляра `IntakePoint`. Это приводит к тому, что в следующих итерациях планирования Агент-Анализатор будет использовать уже скорректированные, пессимистичные оценки времени, что повысит точность ЛТ-прогнозов.

Вторая функция Агента-Учителя заключается в **коррекции весовых коэффициентов** в матрице эффективности A (описанной в разделе 3.1). Пусть вектор весов критериев (затраты, время, качество, риск) выглядит как:

$$W = w_1, w_2, w_3, w_4 \quad (3.28)$$

Агент-Учитель анализирует успешность реализованных сценариев. Если сценарий d^* , выбранный как оптимальный, привел к срыву поставки (например, из-за недооценки риска погоды), система должна повысить значимость критерия риска R в будущем в такой же или близкой ситуации.

Алгоритм коррекции весов реализуется через механизм обучения с подкреплением (англ. - Reinforcement Learning), где функция ошибки L определяется как взвешенная разность между ожидаемой и полученной полезностью:

$$L = \sum_{p=1}^4 \gamma_p (k_p^{plan} - k_p^{fact})^2 \quad (3.29)$$

Обновление весов происходит по правилу градиентного спуска (или его дискретного аналога для семантических весов):

$$w_p^{(t+1)} = w_p^{(t)} + \eta \cdot \frac{\partial L}{\partial w_p} \quad (3.30)$$

где: η - скорость обучения. Система автоматически «штрафует» критерии, оптимизация которых привела к неустойчивым решениям, и «поощряет» критерии, обеспечившие надежность. Визуализация контура адаптивного управления и взаимодействия Агента-Учителя с элементами системы представлена на рисунке 3.2.

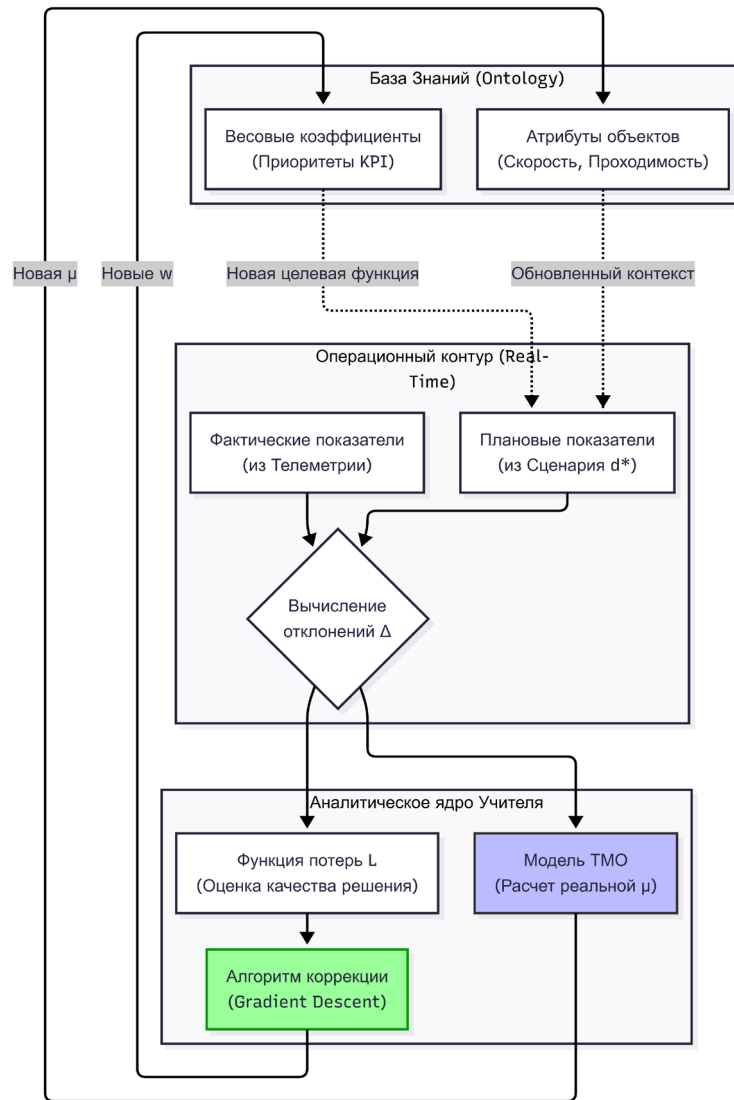


Рисунок 3.2 - Схема кибернетического контура адаптации и обучения ИСППР на основе анализа расхождений план/факт

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

4.1. Архитектура и практическая реализация интеллектуальной системы поддержки принятия решений

Архитектура гибридной интеллектуальной системы выстроена по микросервисному принципу, гарантируя модульность и независимость компонентов. Подобный подход позволяет масштабировать решение: от автономного контура внутри отдельного агрохолдинга до встраиваемого блока региональной цифровой платформы. Обязательным условием развертывания выступает технологический суверенитет. Использование открытого программного обеспечения и локальный хостинг критических узлов, включая генеративные нейросети, полностью исключают зависимость от внешних провайдеров [25].

Центральным элементом оркестрации служит сервер приложений. Специфика событийной модели управления требует асинхронной обработки массивных потоков телеметрии с минимальной задержкой, что диктует выбор быстрых фреймворков уровня FastAPI. Сервисное ядро маршрутизирует данные между парсером, графом знаний и каскадом агентов, параллельно фиксируя транзакции. Слабая связность компонентов защищает непрерывный логистический цикл от простоев: обновление или замена Агента-Анализатора происходит в горячем режиме, не прерывая сбор телеметрии или работу верификационных фильтров [41-44].

Слой интеллектуального анализа опирается исключительно на локально развернутые большие языковые модели. Управление нейросетями через специализированные интерфейсы решает сразу две задачи: защищает коммерческую тайну от утечек на внешние серверы и обеспечивает автономность работы в зонах нестабильного интернет-покрытия, типичных для аграрных территорий. Прямой доступ к языковой модели закрыт. Программная обертка динамически собирает контекст, подмешивая в промпт

фрагменты онтологии и свежую телеметрию. Одновременно она жестко фиксирует параметры генерации под конкретную ролевую модель агента. Вероятностная нейросеть тем самым трансформируется в детерминированный инструмент инженерного анализа [86-87].

Знания о предметной области изолированы в графовых базах данных или специализированных RDF-хранилищах. Если классические реляционные СУБД фиксируют транзакционные логи, то онтологический слой удерживает саму семантику транспортной системы: графы дорог, нормативы времени, правила товарного соседства и технические допуски. Опираясь на этот фундамент, нейросети получают жесткую привязку к физической реальности через верифицированные факты. Математическое ядро, отвечающее за оптимизацию и районирование, связывается с онтологией по API. Забирая на вход исключительно валидированные структуры данных, алгоритмы защищаются от вычислительных сбоев, вызванных некорректными параметрами.

Пользовательский интерфейс адаптивен и подстраивается под операционный контекст. Офисный диспетчер работает с классическим веб-дашбордом, насыщенным картографией и аналитикой. Механизатор в поле или агроном взаимодействуют с системой через корпоративные мессенджеры, получая наряды и отправляя отчеты в формате диалога с чат-ботом. Форма подачи информации меняется, однако принцип прозрачности остается неизменным: вместе с итоговой рекомендацией человек всегда видит пошаговую логику рассуждений, выстроенную каскадом агентов. Сводная структура программных компонентов представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1- Компонентный состав и технологический стек реализации ИСППР

Компонент архитектуры	Рекомендуемый стек технологий	Функциональное назначение в системе	Обоснование выбора для АПК
Сервисное ядро (Backend)	Python (FastAPI / Flask), Go	Оркестрация агентов, API-шлюз, валидация данных, логирование.	Асинхронность для обработки потока телеметрии; богатая экосистема библиотек для Data Science.
Генеративный модуль (LLM)	Ollama, Llama.cpp, vLLM (Локальный хостинг)	Исполнение когнитивных функций агентов (Парсинг, Анализ, Судейство).	Суверенитет данных: работа без интернета, отсутствие утечек на внешние сервера.
Онтологическое хранилище	Neo4j, Apache Jena, RDFLib	Хранение графа знаний, выполнение SPARQL-запросов, логический вывод.	Поддержка сложных связей «многие-ко-многим», характерных для логистики (Груз-Транспорт-Маршрут).
Математическое ядро	SciPy, OR-Tools, Gurobi (опц.)	Расчет матриц эффективности, решение задач VRP и оптимизации.	Высокая скорость точных вычислений, недостижимая для чистых LLM.
Слой интеграции (ETL)	Apache Airflow, Kafka	Сбор данных из ERP (1C), WMS, систем мониторинга (Wialon).	Гарантированная доставка сообщений от датчиков в условиях нестабильной связи в полях.
Интерфейсный слой	React/Vue (Web), Bot API (Мессенджеры)	Визуализация решений, получение обратной связи от персонала.	Омниканальность: доступ к системе с любого устройства (планшет в кабине, ПК в офисе).

Визуализация общей архитектуры системы и потоков данных между компонентами представлена на рисунке 4.1.

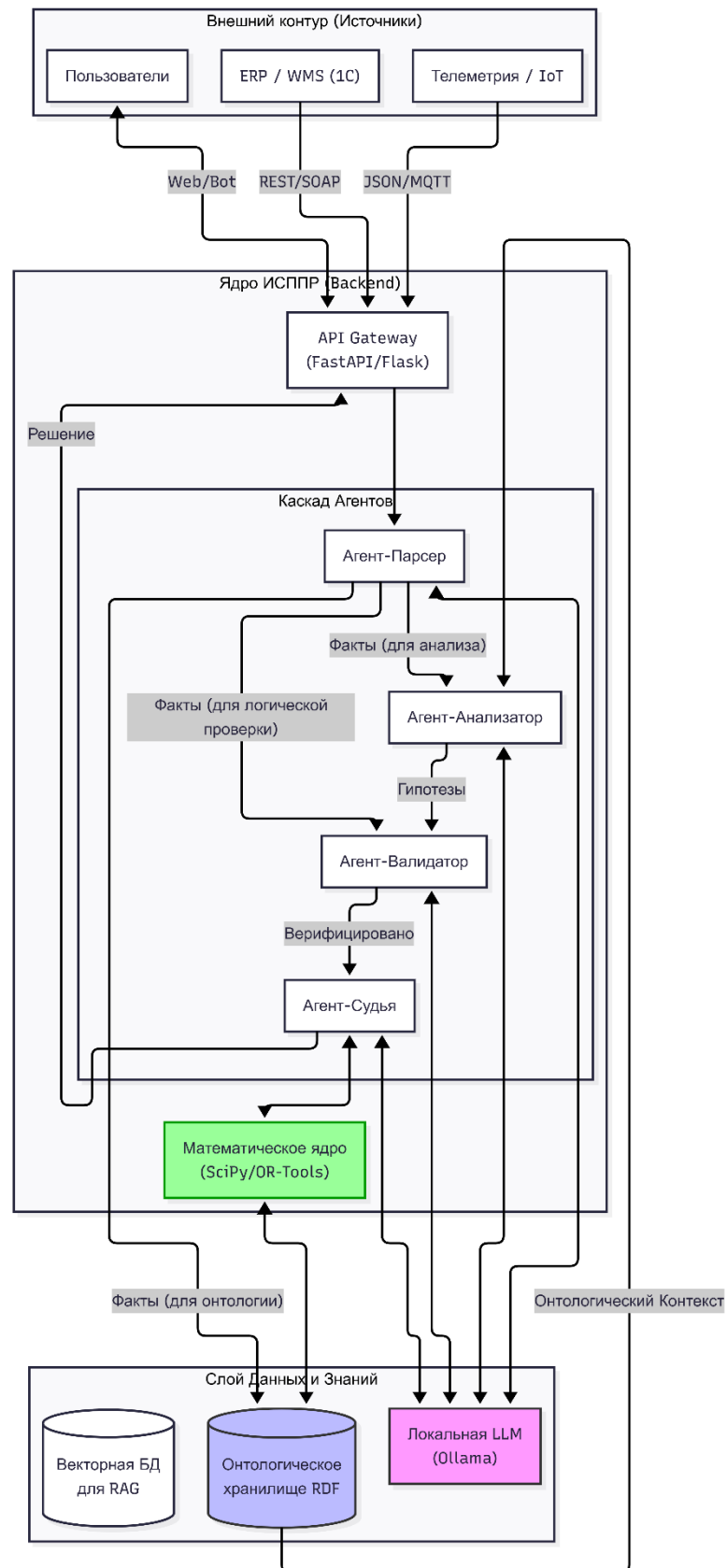


Рисунок 4.1 - Слой взаимодействия с генеративными моделями

Для обеспечения детерминированности вывода взаимодействие с моделью, развернутой в среде Ollama, осуществляется в режиме принудительной генерации JSON-схем, что позволяет исключить необходимость постобработки текста на естественном языке и гарантирует, что выходные данные Агента-Парсера или Агента-Анализатора могут быть немедленно десериализованы в объекты программного кода для дальнейшей маршрутизации [88-89].

Оркестрация агентов и управление состоянием

Центральным элементом программной реализации системы является **сервисное ядро (Orchestrator)**, функционирующее на базе асинхронного фреймворка FastAPI в связке с менеджером очередей задач (Task Queue, например, на базе Redis или RabbitMQ). Данный архитектурный выбор обусловлен необходимостью обработки пиковых нагрузок от телематических систем без блокировки основного интерфейса. Ядро реализует паттерн «Конечный автомат», управляя жизненным циклом задачи не как линейным скриптом, а как набором изолированных состояний, обрабатываемых специализированными воркерами – рабочими потоками выполнения.

Еще одной особенностью архитектуры является вынесение контекста исполнения в быстрое хранилище состояний (State Store, реализованное на Redis). Это обеспечивает отказоустойчивость и возможность реализации циклов обратной связи: в случае обнаружения ошибки на этапе валидации или судейства, Оркестратор не прерывает процесс, а загружает предыдущее сохраненное состояние и перезапускает соответствующего воркера с скорректированными параметрами.

Многоступенчатая трансформация данных внутри конвейера (рисунок 4.2) опирается на двойной контур контроля. Сначала входной поток обрабатывается воркером Парсинга, после чего немедленно запускается структурная валидация, необходимая для блокировки записи некорректных форматов в онтологическое хранилище. Затем воркер Анализа формирует сценарные гипотезы, которые подвергаются повторной фильтрации: модуль

Валидации проверяет логическую связность и отсекает галлюцинации нейросети. До математического ядра доходят исключительно верифицированные сценарии. Подобная маршрутизация радикально экономит вычислительные ресурсы при расчете KPI [90].

Обращения воркеров к генеративным моделям строго унифицированы через единый шлюз LLM Gateway. Извлечение предметных знаний идет параллельно через графовую базу OntoDB. Разделение потоков синхронизирует все компоненты с актуальным контекстом, сохраняя целостность итоговых решений. Поточковая диаграмма пути от сбора телеметрии до генерации управленческого воздействия приведена на рисунке 4.2.

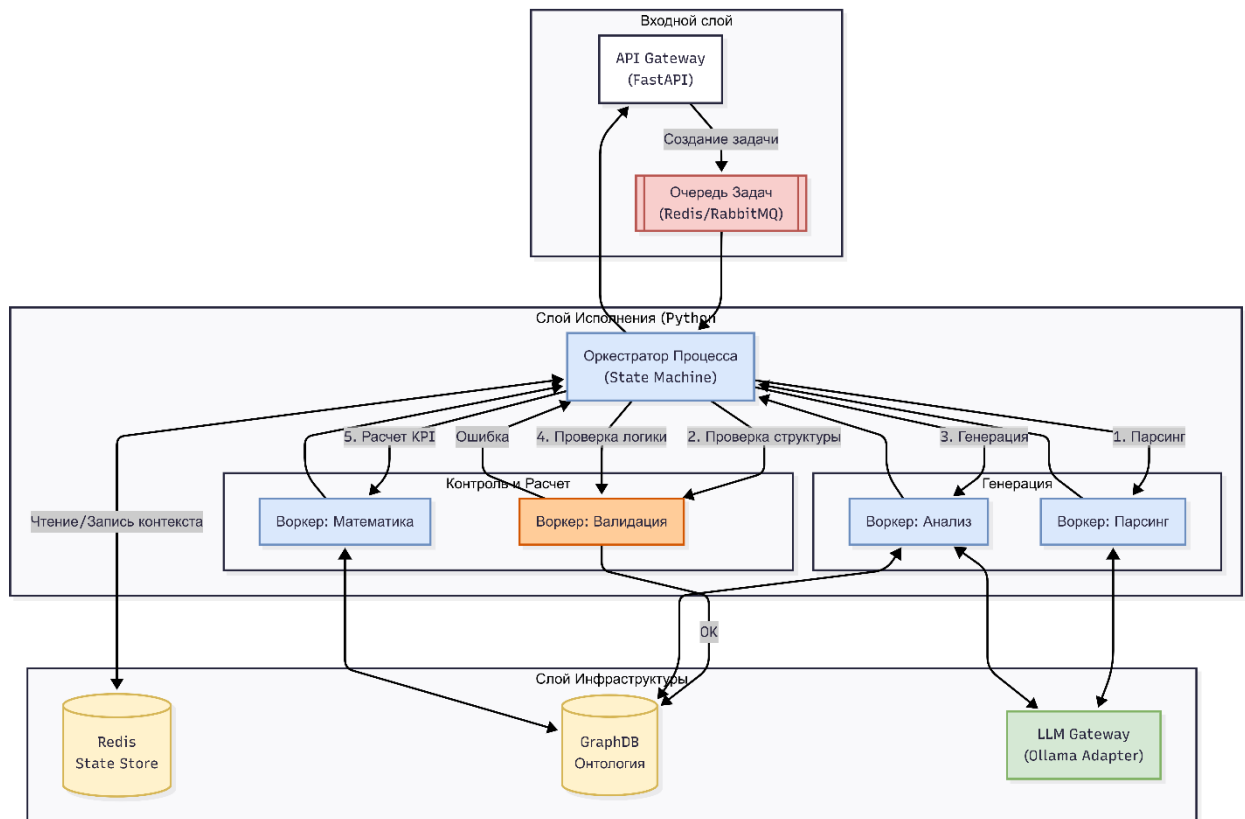


Рисунок 4.2 - Поточковая диаграмма обработки данных в ИСППР: от сбора телеметрии до генерации управленческого решения.

Подсистема сбора и интеграции данных (ETL)

Интеграция аналитического контура в действующую цифровую инфраструктуру агропредприятия реализуется через уровень захвата (Ingestion

Layer). Он объединяет разнородные адаптеры: потоковая телеметрия с IoT-датчиков (координаты техники, температура зерна) поступает по протоколу MQTT, обмен с учетными системами (1С: ERP, ФГИС «Зерно») идет через REST API, исторические отчеты подгружаются файловыми шлюзами.

Главная задача интеграционного слоя сводится к семантическому переводу технических сигналов в термины предметной области. Получив с CAN-шины комбайна сырой код ошибки «Е-404», Агент-Парсер конвертирует его в формализованный онтологический факт: Event:HarvestingMachine_05 hasStatus:Breakdown. Оркестрацию потоков и расписание обновлений контролирует Apache Airflow. Регулярная синхронизация локального графа знаний с внешними мастер-системами поддерживает контекст в актуальном состоянии[91]. Схема сведения разнородных источников в единый аналитический контур показана на рисунке 4.3.

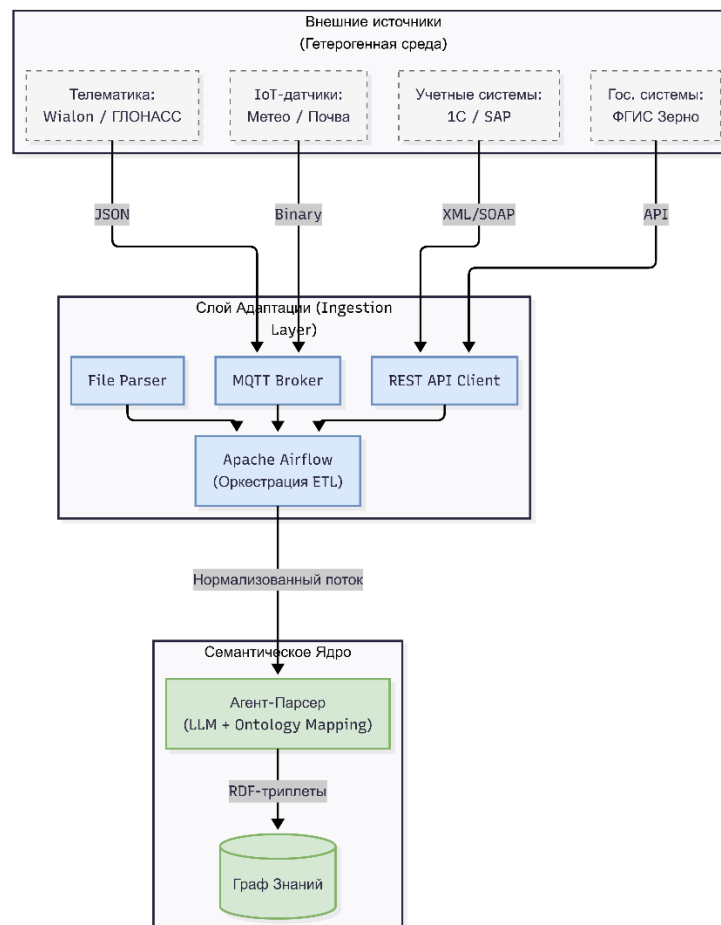


Рисунок 4.3 - Схема интеграции источников данных: преобразование технических протоколов в семантическую модель

Реализованная архитектура интеграционного слоя обеспечивает техническую связность разнородных информационных систем, а также, что более важно, семантическую интероперабельность данных. Использование специализированных адаптеров в сочетании с механизмом семантического подъема позволяет нивелировать различия в форматах и протоколах передачи данных (от бинарных пакетов телеметрии до XML-выгрузок из ERP), приводя их к единому онтологическому знаменателю. Тем самым создается единое информационное пространство, в котором физические объекты (техника, поля, склады) и цифровые сущности (заявки, путевые листы) существуют в неразрывной логической связи, доступной для обработки интеллектуальными агентами.

Однако наличие развитой программной инфраструктуры является лишь необходимым, но не достаточным условием эффективного управления. Фактором, определяющим качество принимаемых решений в режиме реального времени, является полнота и достоверность первичных данных, поступающих из физического мира. В условиях логистики АПК основным источником объективной информации выступают телематические системы и средства IoT-мониторинга [92]. Специфика интеграции этих потоков, механизмы их интерпретации Агентом-Парсером и трансформация «сырых» сигналов в значимые бизнес-события требуют отдельного рассмотрения, что и составляет предмет следующего раздела.

Практическая внедряемость разработанной системы определяется её способностью встраиваться в действующий контур информационного обеспечения перевозок, не требуя замены эксплуатируемых учётных систем. Предлагаемая архитектура предусматривает интеграцию по принципу надстройки: система не подменяет транзакционные функции существующих решений, а извлекает из них данные для формирования управляющих рекомендаций и возвращает результат в виде структурированных заданий. Состав внешних систем и характер обмена приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Состав внешних систем и характер информационного обмена

Внешняя система	Направление обмена	Передаваемые сущности	Способ интеграции
Система управления перевозками (TMS)	Двусторонний	Заявки на вывоз, назначения подвижного состава, статусы выполнения рейсов	REST API, обмен в формате JSON
Учётная система предприятия (ERP)	Входящий	Номенклатура культур, плановые объёмы вывоза, тарифные ставки, состав парка	Регламентный файловый обмен либо выгрузка через промежуточный слой
ФГИС «Зерно»	Двусторонний	Сведения о партиях зерна, товаросопроводительные документы	Интеграция через API оператора системы
Системы телеметрии подвижного состава	Входящий	Координаты, скорость, расход топлива, факт погрузки и разгрузки	Потоковая передача по протоколу MQTT
Системы весового контроля элеватора	Входящий	Фактическая масса принятой партии, время начала и окончания разгрузки	Опрос базы данных весовой платформы
Система взимания платы «Платон»	Входящий	Сведения о начислениях за проезд по маршруту	Выгрузка отчётов, учёт в составе переменных затрат

Данные телеметрии и весового контроля образуют основу обратной связи: именно они служат источником фактических показателей, сопоставляемых Агентом-Учителем с плановыми при калибровке параметров модели, включая восстановление действительной интенсивности обслуживания на пункте приёмки (раздел 4.2.5). Сведения из ФГИС «Зерно» и учётной системы формируют нормативную часть Графа Знаний, задавая допустимые сочетания культур, транспортных средств и пунктов приёмки, проверяемые функцией допустимости ФФ.

Такая организация обмена отвечает требованиям многоуровневого взаимодействия элементов транспортно-логистической системы и позволяет разворачивать предлагаемое решение поэтапно: на начальной стадии - в режиме выработки рекомендаций для диспетчера, с последующим переходом к автоматическому формированию заданий по мере накопления статистики подтверждённых решений.

4.2. Экспериментальное исследование процессов интеграции и семантической трансформации данных

4.2.1. Описание экспериментального стенда и исходных данных

Для апробации предложенной интеллектуальной системы поддержки принятия решений был развернут экспериментальный стенд, имитирующий функционирование логистической подсистемы агропромышленного предприятия. Экспериментальный стенд предназначен для исследования процессов интеграции разнородных данных, семантической трансформации информации и принятия диспетчерских решений в условиях неопределенности и динамически изменяющейся производственной среды.

Разработка и использование экспериментального стенда обусловлены тем, что в реальных условиях транспортной логистики АПК доступ к полному спектру телематических и производственных данных, как правило, ограничен. В связи с этим в рамках исследования использовалась комбинация квази-реальных и синтетически сгенерированных данных, отражающих типовые производственные и логистические ситуации.

Общая структура экспериментального стенда

Экспериментальный стенд реализован в виде модульной программной среды и включает следующие ключевые компоненты:

- сервисное ядро интеллектуальной системы, реализующее оркестрацию агентов и обработку событий;
- подсистему генерации и воспроизведения входных данных;
- онтологическое хранилище знаний предметной области;
- математическое ядро оценки и ранжирования сценариев;
- подсистему логирования и формирования отчетов.

Логика работы стенда построена по событийно-ориентированному принципу: принятие решений инициируется поступлением событий, отражающих изменения состояния производственной или транспортной системы.

Структура папок и файлов экспериментального стенда выглядит следующим образом (листинг 4.1)

Листинг 4.1 – Структура директорий и файлов стенда

```

root --
|-- agents
|   |-- analyzer_agent.py
|   |-- base_agent.py
|   |-- judge_agent.py
|   |-- parser_agent.py
|   |-- teacher_agent.py
|   `-- validator_agent.py
|-- configs
|-- data
|   |-- raw
|   |   `-- field_operations.csv
|   |-- reference
|   |   `-- distances.json
|   `-- synthetic
|       |-- fleet_config.json
|       `-- unified_events.json
|-- logs
|-- main_simulation.py
|-- math_core
|   `-- evaluator.py
|-- ontology
|   |-- agro_logistics.ttl
|   |-- mappings.yaml
|   `-- ontology_manager.py
|-- prompts
|   |-- analyzer.md
|   |-- judge.md
|   |-- parser.md
|   |-- teacher.md
|   `-- validator.md
|-- results
|-- smoke_simulation.py
`-- utils
    |-- debug_llm_gemini.py
    |-- debug_ontology.py
    |-- logger.py
    `-- simulation_core.py

```

Исходные данные для проведения экспериментов

В качестве исходных данных использовались данные, подготовленные на основе материалов, полученных в рамках взаимодействия с Омским

аграрно-научным центром. Первичные данные включали сведения о выполнении полевых работ, задействованной технике, объемах операций и временных характеристиках. В целях соблюдения требований обезличивания и универсальности эксперимента данные были агрегированы и частично синтетически модифицированы.

Основной файл с производственными данными представлен в виде таблицы формата CSV (файл `field_operations.csv`), которая содержит записи о выполнении сельскохозяйственных операций (тракторные работы, обработка полей и др.), включая идентификаторы полей, типы операций, объемы работ и временные метки. Данные в файле являются квази-реальными, созданными на основе статистических характеристик исходных данных Омского Аграрного Научного центра(листинг 4.2).

Листинг 4.2 – Пример данных о выполнении сельскохозяйственных операций

```
timestamp,field_name,crop_type,harvester_id,bunker_volume_tons,gps_lat,gps_lon
2024-08-20 08:23:00,Field_102 (South),Попс,Acros-595
(ID:H1),8.1,54.929876,73.358328
2024-08-20 08:34:00,Field_205 (East),Пшеница,Acros-595
(ID:H1),7.6,54.965135,73.419855
2024-08-20 09:00:00,Field_205 (East),Пшеница,Acros-595
(ID:H1),5.6,54.958002,73.436712
2024-08-20 09:16:00,Field_102 (South),Ячмень,Acros-595
(ID:H1),5.6,54.920579,73.356352
2024-08-20 09:37:00,Field_205 (East),Ячмень,Torum-785
(ID:H2),6.6,54.965456,73.426166
2024-08-20 10:04:00,Field_101 (North),Попс,John Deere S700
(ID:H3),7.6,54.992045,73.299239
2024-08-20 10:30:00,Field_102 (South),Попс,John Deere S700
(ID:H3),7.3,54.924323,73.346572
2024-08-20 10:42:00,Field_101 (North),Пшеница,Torum-785
(ID:H2),5.6,54.995068,73.306391
2024-08-20 10:57:00,Field_102 (South),Попс,Acros-595
(ID:H1),6.1,54.935433,73.355609
2024-08-20 11:08:00,Field_101 (North),Попс,Torum-785
(ID:H2),7.4,54.996833,73.317713
2024-08-20 11:37:00,Field_102 (South),Попс,Acros-595
(ID:H1),7.7,54.923730,73.339166
2024-08-20 12:04:00,Field_205 (East),Ячмень,John Deere S700
(ID:H3),7.8,54.962688,73.415142
```

Конфигурация транспортного парка

Для моделирования транспортной подсистемы в рамках экспериментального стенда используется отдельный конфигурационный файл, описывающий состав и характеристики парка транспортных средств. Конфигурация задается в структурированном формате (JSON) и включает следующие параметры (файл `fleet_config.json`): идентификатор транспортного средства, тип, грузоподъемность, среднюю скорость и текущее состояние (листинг 4.3).

Листинг 4.3 - Пример конфигурации транспортного парка

```
[
  {
    "id": "Kamaz_55102_01",
    "type": "agro:GrainTruck",
    "capacity": 10.0,
    "speed": 60,
    "status": "Idle"
  },
  {
    "id": "Kamaz_55102_02",
    "type": "agro:GrainTruck",
    "capacity": 10.0,
    "speed": 55,
    "status": "Idle"
  }
]
```

Моделирование событий телематики

Входные события, инициирующие работу системы, моделируются в виде телематических сообщений (файл `unified_events.json`). События отражают типовые ситуации, возникающие в процессе уборки и транспортировки продукции, такие как достижение порога заполнения бункера комбайна или формирование запроса на вывоз урожая (листинг 4.4).

Листинг 4.4 - Пример структуры телематического события

```
{
  "event_id": "evt_000",
  "timestamp": "2024-08-20 08:23:00",
  "type": "harvest_request",
  "source": "telemetry",
  "data": {
    "entity_id": "Acros-595 (ID:H1)",
    "location": "Field_102 (South)",
    "crop": "Пшеница",
    "volume": 8.1,
    "moisture": 14.0,
    "coordinates": {
      "lat": 54.98,
      "lon": 73.32    }
  }
}
```

Пространственная модель и матрица расстояний

Для учета пространственного фактора в экспериментальном стенде используется матрица расстояний между объектами логистической инфраструктуры: гаражами, элеваторами и полями. Матрица расстояний задается в явном виде (файл `distances.json`) и используется математическим ядром системы при расчете времени и стоимости перевозок (Листинг 4.5).

Листинг 4.5 - Пример фрагмента матрицы расстояний

```
{
  "Garage_Main|Garage_Main": 0,
  "Garage_Main|Elevator_Main": 20,
  "Elevator_Main|Garage_Main": 20,
  "Garage_Main|Elevator_Reserve": 26,
  "Elevator_Reserve|Garage_Main": 26,
  "Garage_Main|Field_101 (North)": 25,
  "Field_101 (North)|Garage_Main": 25
}
```

Обоснование выбора задачи диспетчеризации

В качестве базовой экспериментальной задачи в работе рассматривается задача диспетчеризации транспортных средств при вывозе сельскохозяйственной продукции с полей. Выбор данной задачи обусловлен ее

высокой отраслевой значимостью для логистики АПК, а также тем, что она сочетает в себе пространственные, временные и ресурсные ограничения.

Предложенная архитектура интеллектуальной системы не ограничивается исключительно задачами диспетчеризации, однако, именно данный класс задач наиболее наглядный с точки зрения демонстрации взаимодействия агентов, использования онтологий и работы математического ядра, что делает его целесообразным для экспериментальной апробации.

Описанный экспериментальный стенд формирует замкнутый воспроизводимый контур, в рамках которого входные данные, процессы семантической трансформации, генерация сценариев и математическая оценка реализуются в виде единого экспериментального цикла. Все последующие результаты, приведённые в подразделах 4.2.2 и 4.2.3, получены в рамках данного контура при варьировании входных параметров и состава событий.

4.2.2 Трансформация потоков данных

Интеграция разнородных источников данных и их трансформация в семантически согласованное представление отрабатывались на базе экспериментального стенда. Практическая апробация архитектуры потребовала реализации механизмов непрерывного сбора объективной информации о состоянии физических активов.

Телематическая подсистема функционирует как сенсорный слой, «заземляющий» абстрактные онтологические модели на физическую реальность. Отказываясь от классического для ВІ-систем принципа накопления исторических массивов, архитектура переходит к событийно-ориентированной обработке (Event-Driven). Любой поступающий пакет телеметрии или транзакция в ERP-системе трактуется как потенциальный триггер, запускающий каскад интеллектуальных агентов.

Динамические данные генерируются бортовыми навигационно-связными терминалами (ГЛОНАСС/GPS) и контроллерами CAN-шин уборочной и транспортной техники. Входящий поток структурируется по трем

направлениям. Позиционные метрики (географические координаты, вектор скорости, курс) обеспечивают геофенсинг - контроль нахождения объектов в зонах полей, дорог или элеваторов, а также расчет времени прибытия (ETA). Эксплуатационные параметры, включая обороты двигателя, мгновенный расход топлива и осевые нагрузки, выступают индикаторами технического состояния и маркерами простоев. Технологический срез формируется специфическими датчиками навесного оборудования и бункеров, фиксирующими уровень заполнения, влажность зернового потока и статус выгрузного шнека.

Информационный ландшафт дополняется транзакционными выгрузками из корпоративных учетных систем. Телеметрия фиксирует фактическое местоположение и состояние актива, тогда как ERP задает нормативный контекст - плановую задачу. Двусторонняя синхронизация справочников и документов с платформами уровня 1C:ERP или SAP выстроена через REST-адаптеры. На этом этапе Агент-Парсер берет на себя функцию семантического обогащения, связывая аппаратные идентификаторы (например, IMEI терминала) с инвентарными номерами и путевыми листами. Сопоставление этих слоев позволяет системе отличать несанкционированный «простой» от планового «отстоя», что недостижимо при анализе голых GPS-координат.

Трансформация низкоуровневых технических сигналов в высокоуровневые бизнес-факты реализуется Агентом-Парсером. Модуль функционирует на базе LLM с жестко заданной схемой вывода (JSON Schema). Превосходя классические алгоритмические парсеры, агент успешно обрабатывает как структурированную телеметрию, так и свободные текстовые сообщения от механизаторов или агрономов, приводя разнородный поток к единому машинно-читаемому формату.

Механика семантической интерпретации наглядно прослеживается на примере события «Запрос на вывоз урожая» (объект №1, Листинг 4.6). Получив гетерогенный набор вводных - координаты комбайна, показания

датчика бункера и текстовый комментарий механизатора - Агент-Парсер формирует унифицированный JSON-объект. Поскольку JSON остается лишь промежуточным транспортным форматом, для запуска механизмов логического вывода (Reasoning) извлеченные данные конвертируются в RDF-триплеты и встраиваются в общую структуру онтологического графа.

Листинг 4.6 - Примеры унифицированных событийных объектов

```
[
  {
    "//_comment": "Событие от Производства (M2): Запрос на обслуживание",
    "event_type": "harvest_request",
    "entity_id": "Harvester_M2_05",
    "attributes": {
      "volume": 8.5,
      "moisture": 14.2,
      "location": "Field_Sector_B4",
      "crop_type": "wheat_winter",
      "urgency": 8
    },
    "raw_text_summary": "Бункер заполнен на 85%, влажность в норме (14.2%), требуется выгрузка в секторе B4."
  },
  {
    "//_comment": "Событие от Транспорта (M1): Критический инцидент (Жесткий триггер)",
    "event_type": "vehicle_breakdown",
    "entity_id": "Truck_KAMAZ_X542",
    "attributes": {
      "current_status": "stopped",
      "cargo_weight": 9.5,
      "location": "Route_E119_km45",
      "error_code": "ENG_OVERHEAT_CRIT",
      "urgency": 10
    },
    "raw_text_summary": "Аварийная остановка на маршруте. Перегрев двигателя. Гружен 24т, требуется тягач."
  },
  {
    "//_comment": "Событие от Склада: Ограничение пропускной способности (Обновление маркера)",
    "event_type": "storage_congestion",
    "entity_id": "Elevator_North_Intake_1",
    "attributes": {
      "queue_length": 12,
      "estimated_wait_time": 180,
```

```

        "intake_status": "active_slow",
        "supported_dump_type": "rear_only",
        "urgency": 6
    },
    "raw_text_summary": "Затор на приемке №1. Очередь 12 машин,
ожидание ~3 часа. Принимаем только заднюю разгрузку."
},
{
    "//_comment": "Событие Внешней среды: Метео-условия (Жесткий
триггер)",
    "event_type": "weather_alert",
    "entity_id": "Field_Sector_C3",
    "attributes": {
        "precipitation_mm": 15.0,
        "soil_trafficability": 2,
        "wind_speed": 12.5,
        "is_workable": false,
        "urgency": 10
    },
    "raw_text_summary": "Штормовое предупреждение. Ливень в секторе
C3. Грунтовые дороги непроходимы. Стоп-лосс."
}
]

```

Сформированный унифицированный JSON-объект перед передачей в онтологическое ядро проходит процедуру автоматической верификации. Данную задачу решает **Агент-Валидатор**, функционирующий как фильтр аномалий и логических противоречий. Необходимость данного этапа обусловлена риском поступления «зашумленных» данных от неисправных датчиков или ошибок ручного ввода. Агент использует набор декларативных правил (Листинг 4.7), проверяя физическую возможность и логическую непротиворечивость параметров.

Листинг 4.7 - Фрагмент правил валидации входных данных

```

{
    "validation_context": "harvest_process",
    "rules": [
        {
            "check": "speed < 90",
            "error_msg": "CRITICAL: Аномальная скорость для зерновоза в
поле",
            "action": "flag_as_sensor_error"
        },
        {
            "check": "volume > 0 AND volume <= max_capacity",

```

```

    "error_msg": "ERROR: Объем груза превышает паспортную
вместимость",
    "action": "request_manual_check"
  },
  {
    "check": "body_type == cargo_type.required_body",
    "error_msg": "WARNING: Несовместимость типа кузова и груза",
    "action": "reject_assignment"
  }
]
}

```

Только после успешного прохождения валидации данные допускаются к процедуре инстанцирования в графе знаний, что предотвращает «загрязнение» онтологии ложными фактами

Процесс **семантического обогащения** на данном этапе заключается в инстанцировании классов онтологии и установлении связей между ними на основе атрибутов JSON-объекта [42].

1. Поле `entity_id`: "Harvester_M2_05" идентифицируется как существующий экземпляр класса `agro:HarvestingMachine`.
2. Поле `event_type`: "harvest_request" инициирует создание нового экземпляра события `agro: TransportEvent_Req_001`.
3. Атрибуты `volume` и `moisture` трансформируются в свойства данных (Data Properties) или, в случае использования паттерна SOSA, в экземпляры наблюдений (`sosa:Observation`), привязанные к событию.
4. Поле `location`: "Field_Sector_B4" устанавливает топологическую связь `agro:locatedIn` между событием, техникой и конкретным земельным участком.

Визуализация того, как JSON-объект трансформируется в подграф знаний, представлена на рисунке 4..

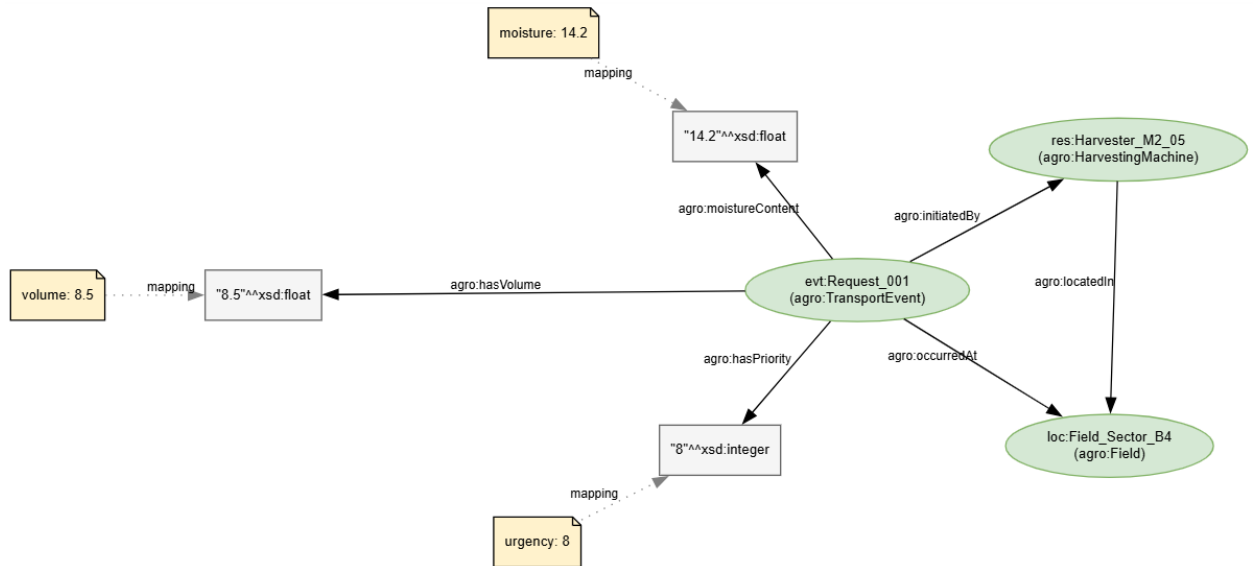


Рисунок 4.4 - Схема трансформации JSON-события в RDF-граф
(Инстанцирование онтологии)

Формализация правил преобразования входных параметров в элементы онтологии систематизирована в таблице 4.3. Данная матрица маппинга служит инструкцией для Агента-Парсера, определяя, как именно технические сигналы интерпретируются в терминах предметной области.

Таблица 4.3 - Карта структурно-семантической трансформации параметров телеметрии в атрибуты онтологической модели

Источник данных	Параметр (Raw Data)	Атрибут Онтологии (Ontology Property)	Логика интерпретации (Transformation Logic)
CAN-шина	Fuel Level (%)	agro:hasFuelLevel	Прямое отображение. При значении < 10% генерируется событие agro:RefuelNeeded.
GPS/ГЛОНАСС	Lat, Lon, Speed	agro:locatedAt, agro:isMoving	Геофенсинг: сопоставление координат с полигоном agro:Field для определения факта нахождения в рабочей зоне.
Датчик бункера	Fill Level (0-100%)	agro:hopperFillStatus	При значении > 80% и нахождении в зоне поля генерируется триггер agro:HarvestRequest с приоритетом High.
Датчик влажности	Moisture (%)	agro:moistureContent	Значение используется Агентом-Судьей для выбора места разгрузки (Сушилка vs Склад напольного хранения).

Текст (Чат)	"Сломался на 5 поле"	agro:TransportEvent	NLP-анализ (NER): Тип события=Breakdown, Локация=Field_05.
-------------	----------------------	---------------------	--

Описанные процессы трансформации данных реализованы в экспериментальном режиме и позволяют воспроизводить типовые сценарии поступления информации, характерные для логистических и производственных подсистем агропромышленного предприятия [63], что обеспечивает возможность систематического анализа поведения интеллектуальной системы при варьировании входных параметров и состава источников данных.

После интеграции события в граф знаний, система получает возможность анализировать контекст (например связь с объектом Field_Sector_B4 позволяет Агенту-Анализатору мгновенно возвращает через граф дополнительные данные, которые не содержались в исходном сообщении, но критичны для принятия решения).

Единичное событие «Запрос на вывоз» обогащается контекстом, превращаясь в **Ситуацию**, требующую разрешения. На рисунке 4.5 показано, как новое событие встраивается в существующую топологию графа и активирует связи с другими сущностями [63-64].

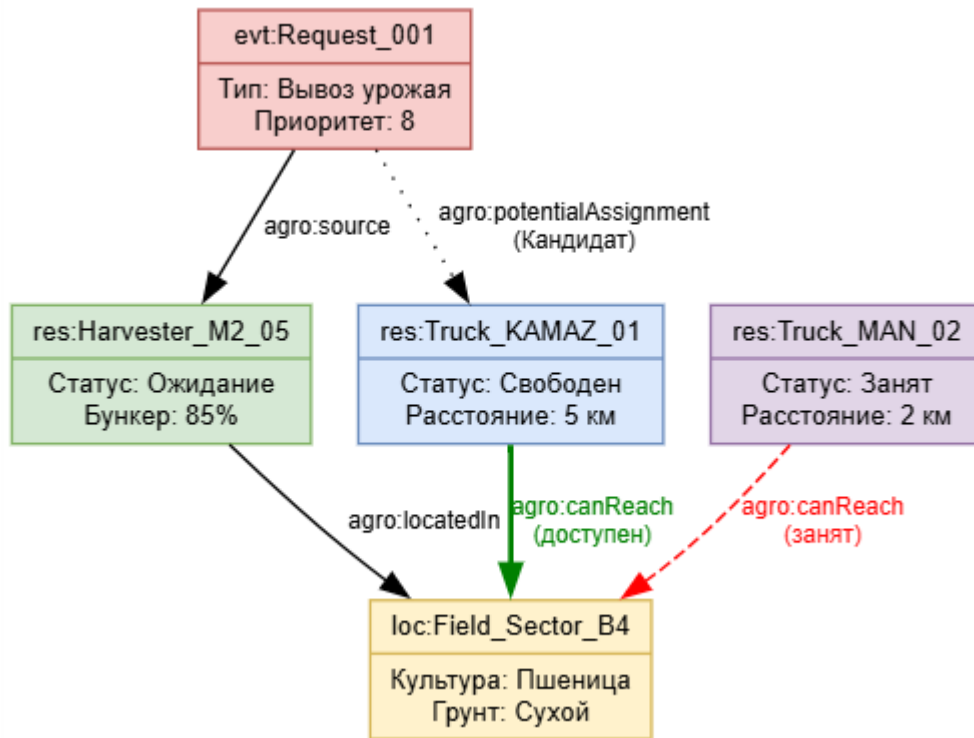


Рисунок 4.5 - Контекстуализация события в Графе Знаний: связь оперативного события со статической инфраструктурой

В рамках работы экспериментального стенда обеспечивается непрерывный поток данных от разнородных источников к ядру интеллектуальной системы, где они используются для формирования и оценки альтернативных сценариев принятия решений. Полученные в результате трансформации структурированные данные являются входом для математического ядра системы, работа которого описывается в следующем подразделе. Детализированные результаты экспериментов будут представлены в приложение А.

4.2.3 Математическое ядро интеллектуальной системы

Количественную оценку и ранжирование сгенерированных сценариев в экспериментальном стенде выполняет математическое ядро. Опираясь на семантически обогащенные данные, модуль переводит качественные описания логистических ситуаций в строгие числовые метрики, формируя базис для принятия диспетчерских решений.

Вычислительный аппарат подключается к работе строго после завершения семантической трансформации и логической валидации гипотез. Подобная последовательность гарантирует корректность входных параметров и соблюдение физических ограничений предметной области. Изолируя математические методы от процессов языковой интерпретации и генерации, архитектура кратно повышает воспроизводимость и прозрачность итоговых результатов.

Встроенный алгоритм не решает классическую задачу оптимизации в ее строгом понимании. Функционал ядра сводится к агрегированию и сопоставлению конфликтующих критериев - временных, стоимостных и ресурсных характеристик каждого маршрута. Отказ от поиска абсолютного глобального оптимума в пользу многокритериального ранжирования отвечает целям эксперимента: проанализировать адаптивность интеллектуальной системы в условиях динамически меняющейся среды агрологистики.

Этап 1. Генерация и первичная оценка сценариев (Агент-Анализатор)

Агент-Анализатор, используя онтологический поиск (OG-RAG), сформировал два допустимых сценария транспортировки объёма 8,5 т с поля на элеватор. Оба доступных транспортных средства относятся к типу `agro:GrainTruck` (КАМАЗ-55102, грузоподъёмность 10,0 т), однако различаются паспортной скоростью и текущим положением, что порождает разные по эффективности стратегии:

- **Сценарий d_1 :** назначение `Kamaz_55102_01` (грузоподъёмность 10,0 т, паспортная скорость 60 км/ч), находящегося в гараже; расстояние до поля 25 км. Объём заявки (8,5 т) размещается за один рейс с высокой утилизацией кузова (85 %).

- **Сценарий d_2 :** назначение `Kamaz_55102_02` (грузоподъёмность 10,0 т, паспортная скорость 55 км/ч), расположенного дальше от поля; расстояние с учётом подачи выше, а меньшая скорость увеличивает расчётное

время прибытия, что снижает устойчивость сценария к ухудшению дорожных условий.

Для каждого сценария Математическое ядро рассчитывает вектор частных критериев эффективности $\vec{K}(d_i)$ в соответствии с формулой (3.7). Расчет производится для двух состояний среды: s_1 (штатный режим) и s_2 (ухудшение погодных условий, снижающее скорость движения) [93-94].

Вектор весов: С учетом высокого приоритета заявки, Агент-Учитель задает весовой вектор (риск учтён косвенно через состояния среды):

$$\vec{w} = \{w_C = 0.3, w_T = 0.5, w_Q = 0.2, w_R = 0\}$$

Расчет матрицы эффективности $A = \| a_{ij} \|$:

1. Для сценария d_1 (10т):

Состояние s_1 (Ясно): $C = 1125$ руб (норма), $\Delta T = 0$ (успевает), $Q_{risk} = 0.1$. Нормированная оценка $a_{11} = 0.92$.

Состояние s_2 (Дождь): Скорость падает, ΔT увеличивается незначительно (высокая проходимость). Оценка снижается до $a_{12} = 0.85$

2. Для сценария d_2 (удалённое ТС, 55 км/ч):

Состояние s_1 (Ясно): $C = 1125$ руб, однако бóльшая дистанция подачи и меньшая скорость увеличивают расчётное время прибытия, приближая его к границе ЛТ-окна. Нормированная оценка $a_{21} = 0.75$.

Состояние s_2 (Дождь): при снижении скорости движения на размокших грунтовых участках расчётное время ΔT возрастает и выходит за пределы допустимого окна. Оценка падает до $a_{22} = 0.40$.

Итоговая матрица эффективности A :

$$A = \begin{pmatrix} 0.92 & 0.85 \\ 0.75 & 0.40 \end{pmatrix}$$

Этап 2. Выбор робастного решения (Агент-Судья)

Для выбора решения в условиях неопределенности (точные вероятности p_1, p_2 неизвестны, известно лишь $p_1 \geq p_2$) применяется математический аппарат, описанный в 3-й главе (формула 3.21 и 3.22 соответственно). Так

оптимальное распределение вероятностей P^* ищется в вершинах многогранника допустимых решений:

$$P^{(k)} = \{\underbrace{\frac{1}{k}, \dots, \frac{1}{k}}_{\check{k}}, 0, \dots, 0\}, k = 1, \dots, n$$

Система вычисляет набор оценок эффективности V_{ik} для каждого сценария d_i по формуле:

$$V_{ik} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k a_{ij}$$

Расчет для сценария d_1 :

— $k = 1$ (Гипотеза: только s_1):

$$V_{1,1} = a_{11} = 0.92$$

— $k = 2$ (Гипотеза: s_1 и s_2 равновероятны):

$$V_{1,2} = \frac{0.92 + 0.85}{2} = 0.885$$

— Итоговая оценка сценария d_1 :

$$V_1 = \max(0.92, 0.885) = \mathbf{0.92}$$

Расчет для сценария d_2 :

— $k = 1$ (Гипотеза: только s_1):

$$V_{2,1} = a_{21} = 0.75$$

— $k = 2$ (Гипотеза: s_1 и s_2 равновероятны):

$$V_{2,2} = \frac{0.75 + 0.40}{2} = 0.575$$

— Итоговая оценка сценария d_2 :

$$V_2 = \max(0.75, 0.575) = 0.75$$

Принятие решения: на основании критерия оптимальности:

$$d^* = \operatorname{argmax}_{d_i \in D^*} V_i$$

система выбирает сценарий d_1 (**Truck_KAMAZ_01**), так как $V_1(0.92) > V_2(0.75)$.

Данный выбор обоснован более высокой эффективностью в штатном режиме и, что особенно важно, высокой устойчивостью к ухудшению погодных условий (разница в оценках при s_2 составляет 0.85 против 0.40).

Этап 3. Генерация управляющего воздействия

После математического подтверждения оптимальности, Агент-Судья утверждает сценарий d_1 . Система инициирует генерацию управляющих воздействий (обратный поток данных). Онтологическое решение конвертируется в набор императивных команд:

1. **Для системы мониторинга (Wialon/ГЛОНАСС):** Через API отправляется маршрутное задание в формате JSON для бортового терминала водителя Truck_KAMAZ_01.

2. **Для учетной системы (ERP):** Генерируется транзакция на создание документа «Распоряжение на отгрузку» с привязкой к конкретному полю и комбайну.

По итогу работы стенда были получены следующие сообщение с рекомендацией (Листинг 4.8):

Листинг 4.8 – Сообщение с рекомендацией из логов стенда

```
{ "decision":
  { "scenario_id": "scenario_kamaz_01_direct",
    "resource_id": "Kamaz_Test_01",
    "strategy_name": "Прямой рейс",
    "reasoning": "Грузовик имеет достаточную грузоподъемность (10.0 т) для перевозки всего
объема (8.5 т) за один рейс. Находится в гараже, готов к отправке, расстояние до поля 25
км.", "estimated_time": 55.0,
    "transport_cost": 1125,
    "route_distance": 25,
    "validation_note": "Все числовые критерии выполнены. Расчетная скорость (27.27 км/ч) <
90 км/ч. Время (55.0 мин) > 0. Стоимость (1125) > 0. Критерий 'Тип кузова соответствует
грузу' не может быть проверен из-за отсутствия данных о типе груза и кузова в
предоставленных ВХОДНЫХ ДАННЫХ.",
    "final_score": 0.9615,
    "human_report": "1. РЕКОМЕНДАЦИЯ: Назначить Kamaz_Test_01 (ID:
scenario_kamaz_01_direct) на задачу по перевозке урожая с поля \"Северное-1\" на
\"Elevator_Main\".\n2. ПАРАМЕТРЫ: Расчетное время 55.0 мин, Стоимость 1125.\n3.
```

ОБОСНОВАНИЕ: Сценарий scenario_kamaz_01_direct (идентично со scenario_kamaz_02_direct) имеет наивысший показатель эффективности (Score: 0.9615) среди всех предложенных вариантов. Он предлагает оптимальное сочетание времени и стоимости для выполнения задачи по транспортировке 8.5 единиц объема с поля "Северное-1" на "Elevator_Main" в целевой слот 60, что соответствует высокому приоритету задачи. Выбор Kamaz_Test_01 является рациональным, так как его параметры полностью совпадают с другим наилучшим вариантом, обеспечивая эффективное выполнение поставленной задачи." },
 "status": "Approved" }

Проведенный демонстрационный эксперимент подтверждает работоспособность предложенной архитектуры и математического аппарата. Система успешно:

1. Интерпретировала неструктурированное событие (запрос с поля).
2. Сформировала альтернативные сценарии с учетом онтологических ограничений.
3. Произвела количественную оценку эффективности с учетом многокритериальности (ЛТ, стоимость).
4. Выбрала робастное решение, устойчивое к факторам неопределенности (риск дождя), используя метод районирования.

Полученные результаты демонстрационного эксперимента показывают, что предложенная ИСППР **функционально приближается** к реализации основных функций 5PL-оператора в части интеллектуальной диспетчеризации и координации логистических процессов, обеспечивая автоматизированное принятие обоснованных решений в рамках замкнутого кибернетического контура управления [7-8].

4.2.4. Экспериментальное исследование обучаемости и робастности адаптивного контура управления

Предшествующие этапы апробации подтвердили работоспособность нейросимволической архитектуры на уровне единичного управленческого цикла. Настоящий подраздел посвящен оценке эффективности системы при длительной эксплуатации, а именно - исследованию способности блока адаптивной калибровки (регулятора с обратной связью, формулы 3.27–3.30)

уточнять стохастическую модель внешней среды по мере накопления телематических данных и сохранять качество маршрутизации в нестационарных условиях логистики АПК.

В основу эксперимента положена следующая научная гипотеза. Классические критерии принятия решений в условиях неопределенности (критерий Лапласа, базовый метод районирования со статическим иерархической приоритизацией) оперируют фиксированным распределением вероятностей состояний транспортной сети и не подлежат корректировке. Блок адаптивной калибровки, напротив, агрегирует статистику фактически реализовавшихся состояний (время простоя, скорость движения) и непрерывно уточняет вероятностную оценку. Предполагается, что подобная алгоритмическая обратная связь обеспечивает системе более высокую точность выбора парето-оптимальных сценариев и робастность к структурным сдвигам внешней среды [94].

Методика вычислительного эксперимента

Оценка эффективности стратегий на единичном потоке заявок подвержена влиянию случайных флуктуаций и не позволяет выявить систематические закономерности. Для обеспечения достоверности результатов применен метод статистического моделирования (Монте-Карло). Каждая стратегия тестировалась на 200 независимых прогонах, включающих по 300 циклов диспетчеризации. Полученные показатели усреднялись, статистическая значимость различий оценивалась посредством построения 95-процентных доверительных интервалов.

Состав множества состояний среды определён исходя из классификации факторов, нарушающих плановый ход транспортного процесса при вывозе урожая. Каждому состоянию поставлен в соответствие класс транспортных рисков, различающихся источником возмущения и характером воздействия на параметры транспортного цикла (таблица 4.4).

Таблица 4.4 - Соответствие состояний среды классам транспортных рисков

Состояние среды	Класс риска	Источник возмущения	Параметр транспортного цикла, подверженный воздействию
Штатный режим	-	Отсутствует	Расчётные значения соответствуют нормативным
Снижение несущей способности грунтовых дорог	Климатический	Атмосферные осадки	Техническая скорость V_T на грунтовых участках
Падение пропускной способности элеватора	Инфраструктурный	Отказ приёмного устройства, пиковая нагрузка	Время ожидания $t_{ож}$ в очереди на разгрузку
Резкое изменение потребности в вывозе	Организационный	Смена очередности уборки, изменение плана отгрузок	Структура и приоритетность заявок
Критический отказ	Комбинированный	Наложение климатического и инфраструктурного факторов	Одновременно V_T и $t_{ож}$

Выделенные состояния образуют полную группу несовместных событий: в каждый момент планирования транспортная система находится ровно в одном из них, а их объединение исчерпывает пространство рассматриваемых ситуаций. Выполнение этого условия необходимо для корректности матрицы эффективности, поскольку столбцы матрицы должны соответствовать взаимоисключающим вариантам развития обстановки, а сумма вероятностей состояний обращаться в единицу.

Принятая иерархия вероятностей отражает эмпирически наблюдаемую частотность: штатный режим преобладает, тогда как комбинированные отказы носят единичный характер. Существенно, что система располагает лишь порядком следования состояний по убыванию вероятности, но не их числовыми значениями, что соответствует реальным условиям оперативного планирования.

Пространство состояний транспортной среды сформировано пятью факторами неопределенности: штатный режим, снижение несущей

способности грунтовых дорог (осадки), падение пропускной способности элеватора (затор), резкое изменение потребности в вывозе и критический отказ техники. Истинное распределение вероятностей данных состояний задается вектором

$$P_{\text{ист}} = \{0.46; 0.26; 0.14; 0.08; 0.06\}$$

. В процессе генерации данных этот вектор остается скрытым от алгоритмов управления: система располагает лишь первичной иерархией состояний по убыванию вероятности, что имитирует реальные условия эксплуатации с неполной информацией.

В каждом цикле блок генерации транспортных сценариев формирует матрицу эффективности альтернативных маршрутов. Критерием качества работы системы выступает доля решений, совпавших с апостериорно-оптимальным действием (максимизирующим математическое ожидание эффективности при истинном распределении $P_{\text{ист}}$).

Сопоставительный анализ проводился для трех стратегий:

1. Статический критерий Лапласа (допущение о равновероятности всех состояний).
2. Модифицированный метод районирования со статическим иерархическим приором.
3. Адаптивный метод районирования (интегрированный с блоком калибровки), осуществляющий динамическую переоценку распределения по накопленным наблюдениям.

Анализ точности принятия управленческих решений

Динамика точности выбора оптимального варианта закрепления подвижного состава за заявкой по мере накопления системой опыта представлена на рисунке 4.6. Применение статического критерия Лапласа стабилизирует точность на уровне 65 %: равновероятная модель среды систематически расходится с фактической дорожно-климатической обстановкой, генерируя устойчивую долю ошибочных назначений подвижного состава. Статический метод районирования, учитывающий иерархию

состояний, повышает показатель до 85 %, подтверждая обоснованность использования иерархического приора.

Наивысшую эффективность демонстрирует адаптивный контур. Стартуя с базовых значений статического районирования, алгоритм по мере обработки телематических логов повышает долю корректных назначений ездов до 95 %. Неперекрывающиеся доверительные интервалы подтверждают статистическую значимость зафиксированного превосходства. Преимущество адаптивной стратегии обеспечивается замыканием контура обратной связи: система отказывается от априорных допущений и переходит к модели, откалиброванной по фактическим параметрам транспортного процесса. Детальные данные представлены в приложение А в таблице А.1.

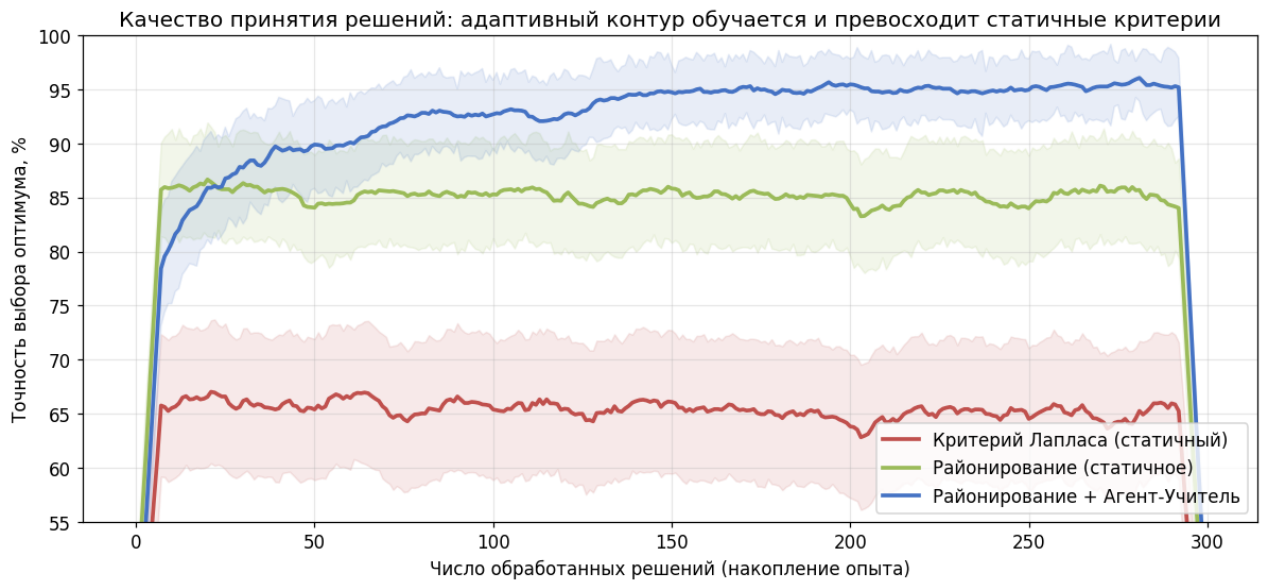


Рисунок 4.6 - Динамика точности выбора оптимального решения при накоплении опыта

Сходимость вероятностных оценок

Механизм повышения точности исследован через анализ сходимости оценки вероятностей. На рисунке 4.7 отражена динамика ошибки оценивания $\|\hat{P} - P_{\text{ист}}\|$, представляющей собой евклидово расстояние между текущей оценкой распределения, формируемой блоком калибровки, и истинным

распределением состояний среды. Детальные данные представлены в приложение А в таблице А.2.

Зафиксировано монотонное убывание ошибки с 0.330 до 0.045 (снижение в 7.4 раза на заданном горизонте планирования). Узкий доверительный коридор свидетельствует о высокой воспроизводимости сходимости независимо от конкретной реализации стохастического потока событий [93-94]. Приближение ошибки к нулевым значениям доказывает корректность заложенной математической процедуры: блок адаптивной калибровки успешно восстанавливает скрытую статистическую структуру логистической среды по наблюдаемым исходам.

Содержательная интерпретация результатов калибровки представляет самостоятельный практический интерес. Вектор весов, сошедшийся к значениям (0,50; 0,33; 0,10; 0,08), демонстрирует перераспределение приоритетов в пользу затратного критерия при сохранении высокой значимости временного. Смещение отражает объективную структуру издержек на коротком плече вывоза: при расстояниях 18–33 км и высокой оборачиваемости подвижного состава именно затратная составляющая определяет удельную себестоимость тонно-километра, тогда как снижение весов качественного и рискованного критериев объясняется тем, что в условиях соблюдения временных окон потери качества зерна остаются в допустимых пределах и не выступают лимитирующим фактором. Полученное распределение согласуется с практикой планирования вывоза урожая и может рассматриваться как результат автоматического выявления системой действительной структуры приоритетов, не заданной априорно.

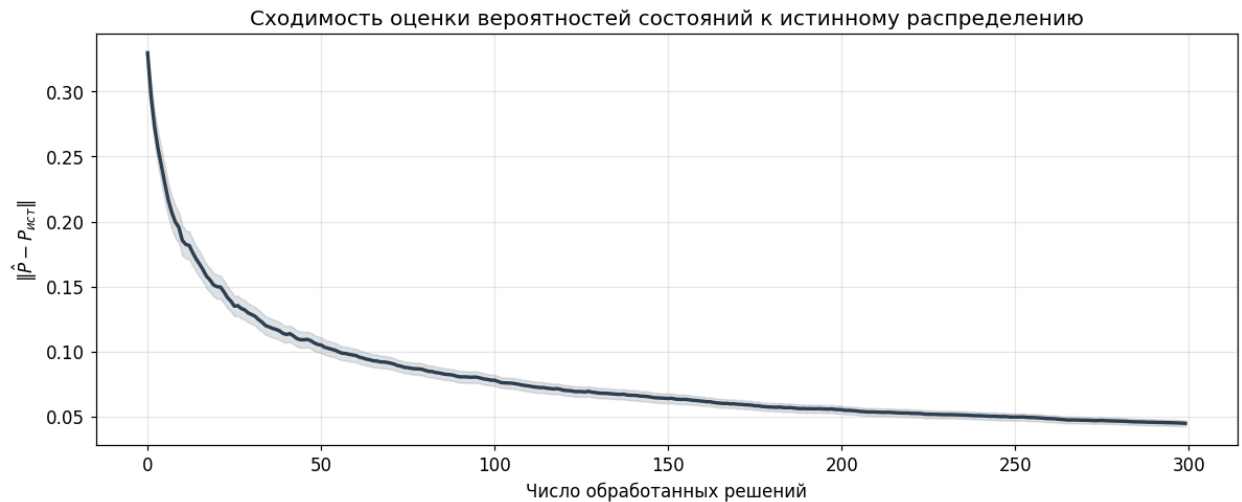


Рисунок 4.7 - Сходимость оценки распределения состояний природы к истинному распределению

Оценка робастности системы при структурных сдвигах внешней среды

Практическая эксплуатация логистических систем АПК сопряжена с резкими сменами статистических режимов (сезонная распутица, пиковые нагрузки на терминалы в период массовой уборки). Для верификации устойчивости системы смоделирован эксперимент с внезапным структурным сдвигом: на 200-й итерации истинное распределение состояний скачкообразно изменялось с

$$P_A = \{0.46; 0.26; 0.14; 0.08; 0.06\}$$

на

$$P_B = \{0.12; 0.30; 0.28; 0.10; 0.20\}$$

Сдвиг имитирует наступление неблагоприятного периода с кратным возрастанием доли погодных и инфраструктурных отказов. Для обеспечения реактивности адаптивный контур был дополнен функцией экспоненциального сглаживания (забывания устаревших наблюдений).

Результаты эксперимента (рисунок 4.8) показывают, что до момента сдвига адаптивный контур удерживает точность маршрутизации на уровне 92 %. Скачкообразное изменение среды провоцирует кратковременное падение

показателя до 66 %, так как накопленная историческая база перестает соответствовать новым реалиям. Однако механизм адаптации обеспечивает быструю переоценку весовых коэффициентов, восстанавливая точность до 90 %. В то же время статический метод районирования, лишенный функции переобучения, после сдвига деградирует до 70 % и переходит в состояние стагнации, поскольку его жесткий приор вступает в непреодолимое противоречие с изменившимся режимом среды. Подробные численные данные представлены в приложение А в таблице А.3.

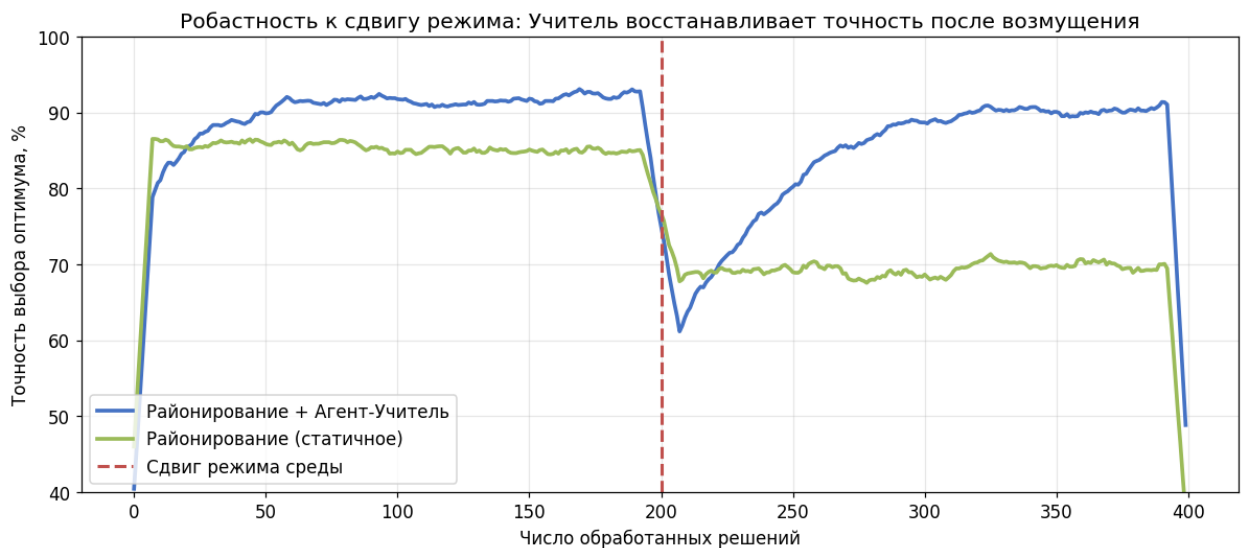


Рисунок 4.8 - Реакция стратегий на сдвиг режима среды

Выводы по результатам эксперимента

Проведенное вычислительное моделирование подтвердило эксплуатационные характеристики разработанного адаптивного контура:

1. Интеграция блока адаптивной калибровки обеспечивает точность выбора оптимального варианта аллокации подвижного состава на уровне 95 %, что статистически значительно превосходит результаты статического метода районирования (85 %) и критерия Лапласа (65 %).

2. Экспериментально подтверждена сходимость формируемой оценки состояний транспортной сети к истинному распределению (снижение ошибки в 7,4 раза), что раскрывает внутренний механизм повышения качества

диспетчеризации. Теоретическим основанием наблюдаемой сходимости служит состоятельность частотной оценки вероятности, вытекающая из закона больших чисел.

3. Подтверждена робастность интеллектуальной системы: при скачкообразном изменении условий функционирования (структурном сдвиге) адаптивный контур способен автономно восстанавливать точность назначений до 90 %, исключая необратимую деградацию, свойственную детерминированным алгоритмам.

Полученные данные доказывают, что научно-практическая ценность предложенной архитектуры заключается не в разовом повышении эффективности отдельного рейса, а в формировании устойчивого, самонастраивающегося механизма управления транспортными потоками в условиях перманентной нестационарности агропромышленного комплекса.

4.2.5. Параметрический анализ пропускной способности пункта приёма

Раздел 3.3 содержит описание узлового элемента инфраструктуры как многоканальной системы массового обслуживания. Практическая ценность такого описания определяется тем, позволяет ли оно заблаговременно установить границу, за которой пункт приёма становится лимитирующим звеном логистической цепи. Настоящий подраздел посвящён параметрическому анализу этой границы и демонстрации процедуры калибровки модели, выполняемой Агентом-Учителем.

Пункт приёма Elevator_Main оборудован двумя приёмными линиями, что соответствует двухканальной системе с ожиданием. Паспортная производительность линии принята равной шести автомобилям в час, откуда нормативная интенсивность обслуживания составляет $\mu_{\text{норм}} = 6,0 \text{ ч}^{-1}$, а предельная пропускная способность узла - $c\mu = 12,0 \text{ авт./ч}$.

Расчёт характеристик выполнен по стационарным соотношениям (3.25)–(3.27) для последовательности значений интенсивности входящего потока. Результаты приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Характеристики пункта приёма при различной интенсивности входящего потока ($\mu = 6,0 \text{ ч}^{-1}$, $c = 2$)

Интенсивность потока λ , авт./ч	Коэффициент загрузки ρ	Вероятность простоя ρ_0	Средняя длина очереди $L_{\text{оч}}$, авт.	Время ожидания $W_{\text{оч}}$, мин	Время пребывания T_{sys} , мин
1,2	0,10	0,818	0,00	0,1	10,1
3,0	0,25	0,600	0,03	0,7	10,7
6,0	0,50	0,333	0,33	3,3	13,3
9,0	0,75	0,143	1,93	12,9	22,9
10,8	0,90	0,053	7,67	42,6	52,6
11,4	0,95	0,026	17,59	92,6	102,6

Первая строка таблицы соответствует режиму, зафиксированному на экспериментальном стенде: при сложившейся организации вывоза интенсивность прибытия на пункт приёма составляет около 1,2 автомобиля в час, коэффициент загрузки не превышает 0,10, а время ожидания в очереди пренебрежимо мало относительно времени разгрузки. Иными словами, в текущем режиме эксплуатации элеватор не является узким местом, и весь резерв сокращения оборота подвижного состава сосредоточен в транспортной, а не в терминальной составляющей цикла.

Принципиально иная картина складывается при росте интенсивности потока. Зависимость времени пребывания от загрузки носит существенно нелинейный характер: при удвоении интенсивности с 3,0 до 6,0 авт./ч время пребывания возрастает на 24 %, тогда как переход от 9,0 к 10,8 авт./ч, то есть увеличение потока лишь на одну пятую, приводит к росту времени пребывания в 2,3 раза. Ожидание в очереди при этом впервые превышает длительность самой разгрузки, и терминальная составляющая начинает доминировать в структуре оборота. Указанное обстоятельство определяет практическую границу планирования: наращивание интенсивности вывоза выше значения ρ

$\approx 0,75$ без расширения приёмного фронта приводит к переносу издержек из сферы перевозки в сферу ожидания.

Полученная зависимость непосредственно используется в контуре принятия решений. Величина времени ожидания $t_{ож}$, входящая в выражение продолжительности оборота (3.10), перестаёт быть нормативной константой и рассчитывается по текущей загрузке узла, вследствие чего сценарии, предполагающие направление транспортных средств на перегруженный пункт приёма, получают пониженную оценку по временному критерию k_2 ещё на этапе формирования матрицы эффективности.

Вторая задача, решаемая на данном этапе, состоит в калибровке модели по фактическим данным. Восстановление действительной интенсивности обслуживания выполняется как величина, обратная среднему наблюдаемому времени разгрузки:

$$\hat{\mu}_{\text{факт}} = \frac{1}{\bar{t}_{\text{обсл}}}$$

где $\bar{t}_{\text{обсл}}$ - выборочное среднее длительности операции по накопленной телеметрии.

Подстановка полученной оценки в соотношения (3.25)–(3.27) составляет содержание обратной задачи теории массового обслуживания - восстановления скрытого параметра системы по наблюдаемой статистике потока.

По данным наблюдения восстановленное значение составило $\hat{\mu}_{\text{факт}} = 5,4$ ч⁻¹, что на 10 % ниже паспортного. Последствия такого отклонения для пропускной способности узла приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Влияние снижения интенсивности обслуживания на характеристики пункта приёма

Интенсивность потока λ , авт./ч	T_{sys} при $\mu = 6,0 \text{ ч}^{-1}$, мин	T_{sys} при $\mu = 5,4 \text{ ч}^{-1}$, мин	Прирост времени пребывания, %
1,2	10,1	11,2	11,4
3,0	10,7	12,0	12,9
6,0	13,3	16,1	20,5
9,0	22,9	36,4	59,1

Сопоставление показывает, что снижение производительности приёмного устройства на 10 % при низкой загрузке практически не сказывается на времени оборота, однако по мере приближения к проектной интенсивности эффект нарастает опережающим темпом и достигает 59 %. Одновременно предельная пропускная способность узла сокращается с 12,0 до 10,8 авт./ч, то есть теряется более одного автомобиля в час - величина, сопоставимая с производительностью отдельной единицы подвижного состава при плече вывоза 25 км.

Именно эта нелинейность обосновывает необходимость непрерывной калибровки. Отклонение, незаметное в межсезонье, в период массовой уборки приводит к лавинообразному росту очередей. Обнаружив систематическое превышение фактического времени пребывания над расчётным, Агент-Учитель формирует управляющее воздействие на обновление атрибута `intakeRate` в Графе Знаний, после чего плановые расчёты времени оборота выполняются с откалиброванным значением, а пороговые значения интенсивности, при которых узел переходит в режим насыщения, пересматриваются автоматически.

Графическая интерпретация полученных зависимостей приведена на рисунке 4.9. По оси абсцисс отложена интенсивность входящего потока транспортных средств, по оси ординат - среднее время пребывания единицы подвижного состава на пункте приёма, включающее ожидание в очереди и собственно разгрузку. Синяя кривая соответствует паспортной интенсивности обслуживания, красная - фактической, восстановленной Агентом-Учителем по данным телеметрии.

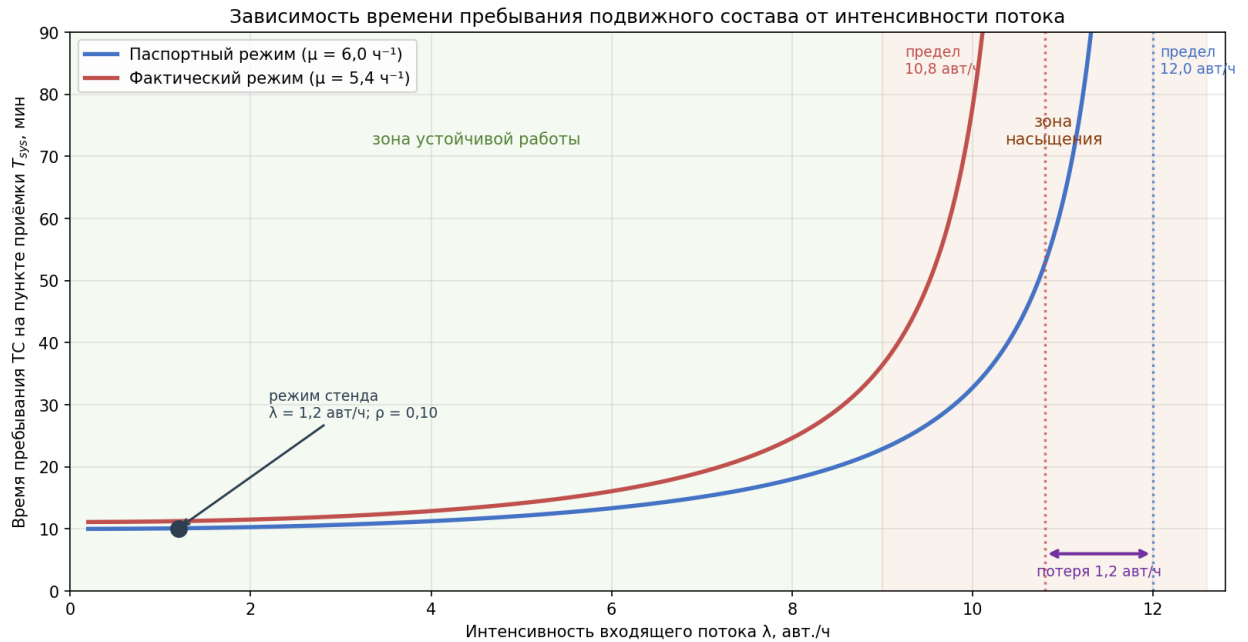


Рисунок 4.9 - Зависимость времени пребывания подвижного состава на пункте приёмки от интенсивности входящего потока при паспортной и фактической интенсивности обслуживания

Характер обеих кривых позволяет выделить на плоскости три качественно различные области, каждой из которых отвечает собственный режим функционирования узла и собственная стратегия управления вывозом.

Область линейного отклика охватывает диапазон интенсивности до 6 авт./ч, где коэффициент загрузки не превышает 0,5. Время пребывания здесь практически совпадает с длительностью разгрузки, а доля ожидания в структуре оборота не превышает четверти. Очередь если и образуется, то рассасывается в пределах одного такта обслуживания. Именно в этой области находится режим, зафиксированный на экспериментальном стенде: при интенсивности 1,2 авт./ч и загрузке 0,10 среднее ожидание составляет доли минуты, что на графике отмечено точкой на пологом участке синей кривой. Практический смысл этого положения состоит в том, что при сложившейся организации вывоза пункт приёмки узким местом не является, и резервы сокращения оборота подвижного состава следует искать в транспортной

составляющей цикла - сокращении порожних перегонов и повышении коэффициента использования грузоподъёмности.

Область нарастающего отклика располагается между 6 и 9 авт./ч, чему соответствует загрузка от 0,5 до 0,75. Здесь кривые заметно отклоняются от горизонтали: рост интенсивности на 50 % увеличивает время пребывания на 72 %. Ожидание в очереди впервые становится сопоставимым с временем разгрузки, а терминальная составляющая начинает определять продолжительность оборота наравне с транспортной. Управленческое значение этой области состоит в том, что она служит зоной раннего предупреждения: узел ещё справляется с потоком, но запас устойчивости исчерпывается, и дальнейшее наращивание вывоза без расширения приёмного фронта уже нецелесообразно.

Область насыщения начинается за отметкой 9 авт./ч и на рисунке выделена заливкой. Кривые здесь приобретают почти вертикальный характер: увеличение потока всего на одну пятую, с 9,0 до 10,8 авт./ч, влечёт рост времени пребывания в 2,3 раза, а при дальнейшем приближении к пределу время нарастает неограниченно. Физически это означает образование устойчивой очереди, которая не рассасывается в течение смены, блокирование подвижного состава на подъездах к элеватору и, как следствие, остановку уборочных работ из-за отсутствия транспорта под выгрузку бункеров. Вертикальные асимптоты обозначают предельную пропускную способность узла, равную произведению числа каналов на интенсивность обслуживания.

Сопоставление двух кривых раскрывает основной результат проведённого анализа. Снижение фактической интенсивности обслуживания на 10 % относительно паспортной смещает всю характеристику вверх и влево, причём величина смещения неодинакова в разных областях. В области линейного отклика кривые почти сливаются, и расхождение в 1,1 минуты остаётся практически незаметным для диспетчера. В области насыщения то же самое отклонение приводит к расхождению в десятки минут, а предельная пропускная способность сокращается с 12,0 до 10,8 авт./ч - потеря 1,2

автомобиля в час, отмеченная на рисунке двусторонней стрелкой. Указанная величина сопоставима с производительностью отдельной единицы подвижного состава на коротком плече вывоза, вследствие чего скрытое снижение производительности приёмного устройства ведёт к сокращению провозных возможностей всей обслуживаемой группы транспортных средств.

Отсюда следует вывод, определяющий преимущество предлагаемого решения перед традиционной практикой планирования. Диспетчер, оперирующий паспортными нормативами, ориентируется на синюю кривую и считает допустимой интенсивность до 12 авт./ч, тогда как система в действительности работает по красной характеристике и теряет устойчивость уже при 10,8 авт./ч. Разрыв между расчётной и фактической границей не обнаруживается в межсезонье, когда обе кривые дают близкие значения, и проявляется внезапно в период массовой уборки - в момент, когда возможности для манёвра ресурсами исчерпаны. Предлагаемый контур адаптации устраняет это расхождение: восстанавливая фактическую интенсивность обслуживания по накопленной телеметрии, Агент-Учитель переводит расчёт на действительную характеристику узла, вследствие чего пороговые значения интенсивности, при которых пункт приёмки переходит в режим насыщения, становятся известны заблаговременно, а сценарии, ведущие к перегрузке терминала, отсекаются на этапе формирования матрицы эффективности.

Тем самым модель пропускной способности инфраструктуры перестаёт быть средством постфактумного объяснения задержек и приобретает прогностическую функцию, позволяя управлять распределением грузопотоков между пунктами приёмки до наступления критического режима, а не после его наступления.

Проведённый анализ замыкает математический аппарат раздела 3.3 на практику эксплуатации: модель пропускной способности инфраструктуры и модель работы подвижного состава оказываются связанными через величину $t_{\text{ож}}$ в едином расчётном контуре, а предельные режимы работы узла определяются заблаговременно, до наступления пиковых нагрузок.

4.2.6. Оценка эффективности системы в технико-эксплуатационных показателях

Разделы 4.2.4 и 4.2.5 подтвердили обучаемость адаптивного контура и корректность модели пропускной способности узловых элементов инфраструктуры, однако точность выбора управленческих решений и характеристики очередей представляют собой промежуточные показатели, которые доказывают работоспособность математического аппарата. Настоящий подраздел посвящён количественной оценке эффекта от применения разработанной системы в технико-эксплуатационных показателях, введённых в разделе 3.1.

Постановка вычислительного эксперимента

Сопоставлялись две стратегии управления вывозом урожая, работающие на одном и том же потоке заявок. Базовая стратегия воспроизводит сложившуюся практику ручной диспетчеризации: заявка закрепляется за ближайшим свободным транспортным средством с направлением на ближайший пункт приёма, при этом текущая загрузка терминала и полнота использования грузоподъёмности во внимание не принимаются. Предлагаемая стратегия реализует многокритериальный выбор с учётом удельной себестоимости рейса, соблюдения временного окна, коэффициентов использования пробега и грузоподъёмности, а также прогнозируемого времени ожидания на пункте приёма, рассчитываемого по модели теории массового обслуживания раздела 3.3.

Моделировался уборочный период продолжительностью двадцать суток при обслуживании четырёх производственных участков двумя пунктами приёма. Парк включал пять единиц подвижного состава трёх типов грузоподъёмностью 6, 10 и 15 т, что позволило оценить способность стратегий работать с гетерогенным составом транспортных средств. Интенсивность поступления заявок задавалась пуассоновским потоком, объём партии в бункере комбайна варьировался в диапазоне от 4 до 14 т. Погодные условия моделировались как случайное событие на уровне суток с вероятностью

осадков 0,3; при осадках техническая скорость движения снижалась в соответствии с погодным коэффициентом проходимости, принятым в таблице 3.1. Интенсивности обслуживания на пунктах приёмки соответствуют значениям, откалиброванным по результатам раздела 4.2.5.

Затратные параметры приняты по типовым отраслевым ориентирам для автомобилей-зерновозов: переменные затраты 38 руб. на километр пробега, постоянные 520 руб. на час работы. Указанные величины носят модельный характер и служат для сопоставления стратегий в единых условиях, а не для расчёта абсолютных экономических показателей конкретного предприятия.

Для исключения влияния случайных флуктуаций каждая стратегия исследовалась на шестидесяти независимых реализациях периода, после чего показатели усреднялись с построением 95-процентных доверительных интервалов.

Результаты сопоставления

Сводные результаты приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Техничко-эксплуатационные показатели работы подвижного состава при различных стратегиях управления

Показатель	Базовая диспетчеризация	Разработанная система	Изменение, %
Коэффициент использования пробега β	$0,504 \pm 0,001$	$0,545 \pm 0,001$	+8,3
Коэффициент использования грузоподъёмности γ	$0,720 \pm 0,008$	$0,768 \pm 0,002$	+6,6
Среднее время оборота, мин	$97,6 \pm 1,2$	$98,6 \pm 1,0$	+1,0
Среднее ожидание на пункте приёмки, мин	$10,6 \pm 0,9$	$3,3 \pm 0,1$	-68,8
Удельная себестоимость, руб./т·км	$12,59 \pm 0,08$	$11,13 \pm 0,06$	-11,6
Суточная выработка, т·км/(ТС·сут)	562 ± 8	707 ± 10	+25,6
Доставки в заданном окне, %	$31,3 \pm 0,8$	$43,2 \pm 0,9$	+38,1
Среднее опоздание, мин	$18,2 \pm 1,7$	$4,1 \pm 0,4$	-77,3

Снижение удельной себестоимости на 11,6 % достигнуто не за счёт сокращения тарифных ставок или интенсификации работы водителей, а

вследствие более полного использования провозных возможностей парка. Рост коэффициента использования грузоподъёмности означает, что система подбирает транспортное средство, соответствующее объёму партии, избегая направления автомобиля большой грузоподъёмности под малый лот и обратной ситуации, когда груз приходится дробить на несколько рейсов. Увеличение коэффициента использования пробега отражает сокращение доли порожних перегонов при выборе пункта приёмки. Совместное действие этих факторов повысило суточную выработку единицы подвижного состава на четверть при практически неизменной продолжительности оборота.

Отдельного внимания заслуживает сокращение времени ожидания на пунктах приёмки почти на семьдесят процентов. Учёт прогнозируемой длины очереди позволяет перенаправлять часть потока на резервный терминал до того, как на основном образуется затор. Наибольший эффект зафиксирован именно на резервном пункте приёмки, располагающем одной приёмной линией и потому более чувствительном к неравномерности потока: удельная себестоимость здесь снизилась на 16,6 % против 5,5 % на основном терминале.

Динамика удельной себестоимости по суткам периода представлена на рисунке 4.10.

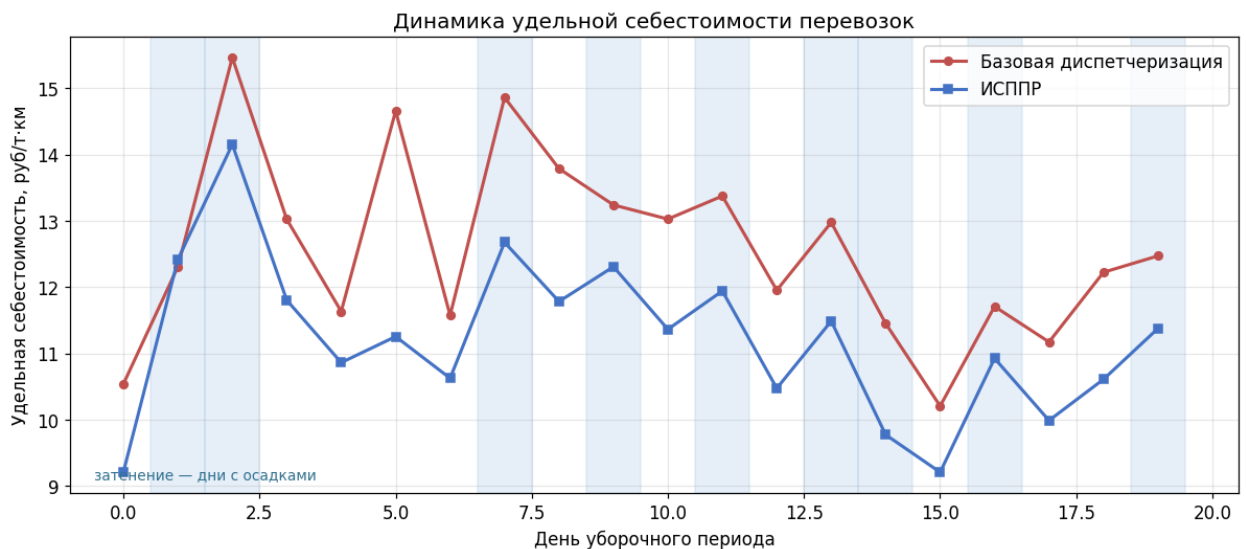


Рисунок 4.10 - Динамика удельной себестоимости перевозок в течение уборочного периода (затенением обозначены сутки с осадками)

Обе кривые обнаруживают выраженную суточную изменчивость, обусловленную вариацией числа заявок, распределением объёмов партий по участкам и погодными условиями. В сутки с осадками себестоимость возрастает у обеих стратегий вследствие снижения технической скорости, однако предлагаемая система сохраняет преимущество на всём горизонте наблюдения. Величина этого преимущества неодинакова: при благоприятных условиях снижение себестоимости достигает 12,8 %, тогда как в период осадков составляет 9,6 %. Сокращение разницы объясняется тем, что при ухудшении дорожных условий возрастает доля времени движения в структуре оборота, а эта составляющая менее управляема средствами диспетчеризации, нежели простой и недогруз.

Сопоставление показателей, характеризующих использование парка, приведено на рисунке 4.11.

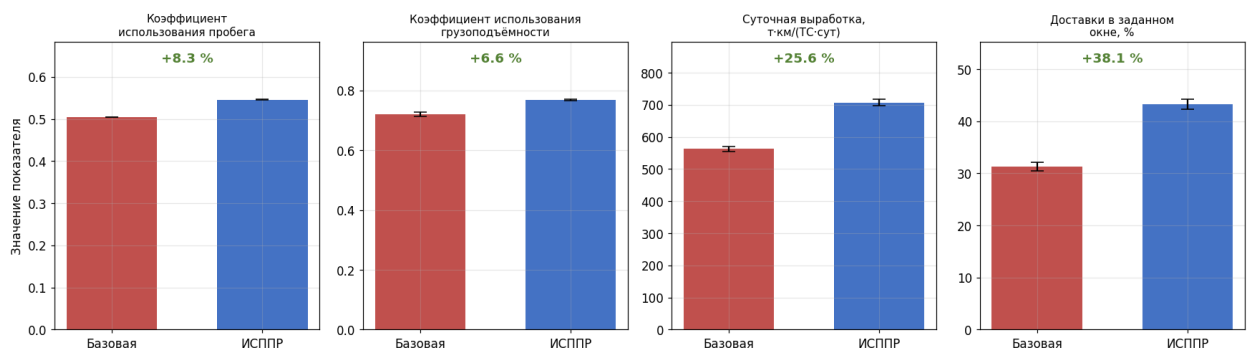


Рисунок 4.11 - Сопоставление технико-эксплуатационных показателей при различных стратегиях управления (усреднение по 60 реализациям, 95-процентные доверительные интервалы)

Анализ распределения транспортной работы между единицами подвижного состава выявил дополнительный эффект, не отражённый в интегральных показателях. При базовой стратегии правило выбора ближайшего свободного автомобиля приводит к устойчивой концентрации нагрузки на трёх единицах парка из пяти, тогда как два транспортных средства, базирующиеся на удалённых участках, оказываются практически невостребованными. Разработанная система вовлекает в транспортный

процесс весь наличный парк: коэффициент вариации числа выполненных рейсов снижается с 0,931 до 0,362, а коэффициент концентрации - с 0,510 до 0,195. Равномерное распределение нагрузки снижает интенсивность износа наиболее эксплуатируемых автомобилей и уменьшает риск срыва вывоза при отказе отдельной единицы техники.

Детализированные результаты эксперимента, включая посуточный протокол, распределение транспортной работы по единицам подвижного состава и показатели в разрезе погодных условий и пунктов приёмки, приведены в Приложении А, в таблицах А.4, А.5 (для рисунка 4.10) и А.6 (для рисунка 4.11 соответственно).

Ограничения полученных оценок

Приведённые количественные результаты получены на имитационной модели и характеризуют потенциал предложенных решений при принятых допущениях, а не гарантированный эффект от промышленного внедрения. При эксплуатации в реальных производственных условиях величина выигрыша с высокой вероятностью окажется меньше по ряду объективных причин.

Модель предполагает полноту и своевременность поступления телеметрических данных, тогда как в практике эксплуатации возможны перерывы связи в зонах неустойчивого покрытия, задержки передачи и ошибки бортового оборудования, снижающие качество исходной информации для принятия решений. Организационные ограничения, не учтённые в модели, также сужают пространство допустимых назначений: закрепление отдельных автомобилей за конкретными бригадами, режим труда и отдыха водителей, необходимость согласования изменений маршрута с диспетчерской службой. Часть выигрыша по коэффициенту использования грузоподъёмности достижима лишь при готовности хозяйства перераспределять технику между участками, что предполагает соответствующую организационную дисциплину. Наконец, погодные условия в модели заданы упрощённо, на уровне суток, тогда как реальная динамика состояния грунтовых дорог носит

более сложный характер и может вызывать отклонения, не компенсируемые средствами диспетчеризации.

С учётом перечисленных обстоятельств полученные значения следует рассматривать как верхнюю оценку достижимого эффекта. Вместе с тем направленность изменений всех рассмотренных показателей устойчива и подтверждена на независимых реализациях, что позволяет считать выявленные закономерности достоверными по существу.

Перспективы применения при роботизации парка

Результаты эксперимента позволяют высказать предположение относительно области, обозначенной в разделе 1.2 в связи с внедрением высокоавтоматизированных транспортных средств. Значительная часть выявленного эффекта связана с вовлечением в работу простаивающих единиц парка и с точностью соблюдения временных окон - то есть с факторами, которые при традиционной организации ограничены режимом труда водителей и скоростью реакции диспетчера на изменение обстановки. Применительно к парку, включающему транспортные средства с высоким уровнем автоматизации, указанные ограничения ослабевают, поскольку управляющее воздействие передаётся непосредственно бортовой системе, а продолжительность смены определяется техническими, а не физиологическими факторами.

Предлагаемая архитектура принципиально совместима с таким сценарием: формируемое системой решение представляет собой структурированное задание, включающее идентификатор транспортного средства, пункт назначения и целевое время прибытия, что не требует человека-исполнителя для интерпретации. Данное соображение, однако, следует рассматривать как гипотезу, требующую самостоятельной проверки. Эксперимент проводился на модели парка с традиционным управлением, и перенос полученных количественных оценок на роботизированные транспортные средства был бы некорректен: такой переход порождает собственный класс задач, включающий обеспечение безопасности движения в

смешанном потоке, резервирование каналов управления, ответственность за принимаемые решения и нормативно-правовое регулирование допуска подобной техники на дороги общего пользования. Оценка эффективности разработанных алгоритмов применительно к роботизированным парковым решениям составляет отдельное направление дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационное исследование посвящено решению актуальной научной проблемы повышения эффективности функционирования транспортно-логистических систем агропромышленного комплекса в условиях высокой стохастичности внешней среды и перехода к моделям платформенной экономики. Разработанная гибридная интеллектуальная система поддержки принятия решений обеспечивает автоматизацию процессов оперативного управления грузопотоками, минимизацию логистических издержек и соблюдение жестких временных ограничений доставки. Выполненный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил получить следующие основные научные и практические результаты.

Доказана методологическая ограниченность традиционных организационно-управленческих структур уровня 3PL и 4PL при управлении цепями поставок скоропортящейся продукции. Установлено, что детерминированные алгоритмы диспетчеризации не способны обеспечить требуемую скорость отклика на динамические возмущения (климатические аномалии, отказы техники), что приводит к нарушению концепции Just-In-Time и порче груза. Обоснована необходимость перехода к модели виртуального логистического оператора (5PL) на базе нейросимволического подхода, компенсирующего математически доказанную низкую точность изолированных генеративных языковых моделей в задачах маршрутизации и распределения ресурсов.

Разработана двухуровневая процедура принятия решений, в которой стратегический уровень обеспечивает робастное закрепление подвижного состава за заявками в условиях неполной информации о вероятностях состояний среды, а тактический уровень определяет порядок объезда пунктов с учётом временных окон. Экспериментальное подтверждение получено для стратегического уровня; развитие тактического контура применительно к гетерогенному парку составляет предмет дальнейших исследований.

Построена доменная онтологическая модель транспортной логистики агропромышленного комплекса, базирующаяся на стандартах верхнего уровня BFO [18]. Модель формирует единое семантическое пространство для производственного, транспортного и складского доменов, обеспечивая интероперабельность гетерогенных данных телематических систем и учетных платформ. В рамках онтологии формализована система событийных триггеров, маркеров состояния и показателей эффективности. Трансформация физико-логистических ограничений (температурный интеграл, влажность, пропускная способность инфраструктуры) в машиночитаемые правила позволила исключить генерацию технологически нереализуемых сценариев транспортировки на ранних этапах планирования.

Спроектирована и программно реализована каскадная архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений, включающая пять специализированных агентов (Парсер, Анализатор, Валидатор, Судья, Учитель). Функционирование данного комплекса характеризуется следующими научно-практическими достижениями:

- Применение технологии *Ontology-Grounded Retrieval-Augmented Generation* ограничило пространство поиска решений исключительно верифицированными фактами предметной области.
- Внедрение двойного контура контроля, состоящего из оценки неопределённости генерации (Агент-Валидатор) и семантического арбитража (Агент-Судья), обеспечило отсеивание технологически нереализуемых сценариев до этапа расчёта эффективности.
- Декомпозиция когнитивных функций позволила свести трудоёмкость цикла принятия решения к линейной зависимости от числа рассматриваемых сценариев, вследствие чего время выработки решения составляет единицы миллисекунд при характерном интервале между событиями в контуре оперативного управления, измеряемом десятками минут.
- Сформировано детерминированное математическое ядро системы, интегрирующее методы многокритериальной оптимизации и теорию игр

с природой. Вычислительный аппарат системы опирается на следующие разработанные алгоритмы:

- Адаптация метода районирования позволила алгоритмизировать выбор парето-оптимальных сценариев транспортировки в условиях неполной информации о вероятностях состояний внешней среды.
- Разработан алгоритм динамической маршрутизации, минимизирующий функцию потерь, зависящую от отклонений расчетного времени прибытия от забронированных слотов.
- Создан кибернетический контур обратной связи на базе марковских моделей теории массового обслуживания, обеспечивающий автономную адаптацию системы к изменениям пропускной способности инфраструктурных узлов путем корректировки весовых коэффициентов целевой функции.

Экспериментальная апробация разработанного программного комплекса подтвердила работоспособность предложенной архитектуры и позволила получить количественные оценки её эффективности в технико-эксплуатационных показателях работы подвижного состава. По результатам статистического моделирования уборочного периода продолжительностью двадцать суток на выборке из шестидесяти независимых реализаций применение разработанных алгоритмов обеспечило снижение удельной себестоимости перевозок с 12,59 до 11,13 руб./т·км, то есть на 11,6 %. Коэффициент использования пробега возрос с 0,504 до 0,545, коэффициент использования грузоподъёмности - с 0,720 до 0,768, вследствие чего суточная выработка единицы подвижного состава увеличилась на 25,6 %, с 562 до 707 т·км. Учёт прогнозируемой загрузки узлов инфраструктуры позволил сократить среднее время ожидания на пункте приёмки с 10,6 до 3,3 мин, повысить долю доставок в заданное временное окно с 31,3 до 43,2 % и снизить среднее опоздание с 18,2 до 4,1 мин.

Применение разработанных алгоритмов обеспечило также существенно более равномерное использование гетерогенного парка: коэффициент

вариации числа выполненных рейсов по единицам подвижного состава снизился с 0,931 до 0,362, а в транспортный процесс были вовлечены все наличные транспортные средства против трёх из пяти при базовой диспетчеризации. Тем самым достигнутый эффект обусловлен не интенсификацией работы отдельных автомобилей, а более полным использованием провозных возможностей парка в целом.

Исследование адаптивного контура показало, что интеграция блока калибровки обеспечивает точность выбора варианта закрепления подвижного состава за заявками на уровне 95 % против 85 % у статического метода районирования и 65 % у критерия Лапласа при статистической значимости различий, подтверждённой непересекающимися доверительными интервалами. Ошибка оценки распределения состояний транспортной среды снизилась в 7,4 раза, с 0,330 до 0,045. При скачкообразном изменении режима внешней среды точность управления после кратковременного снижения автономно восстанавливалась до 90 %, тогда как статические критерии стабилизировались на уровне 70 % без признаков восстановления.

Верификация модели пропускной способности узловых элементов инфраструктуры установила, что снижение фактической интенсивности обслуживания на пункте приёма на 10 % относительно паспортной сокращает предельную пропускную способность узла с 12,0 до 10,8 автомобилей в час, увеличивая время пребывания подвижного состава от 11,4 % при низкой загрузке до 59,1 % при интенсивности, близкой к проектной. Выявленный нелинейный характер зависимости обосновывает практическую значимость непрерывной калибровки параметров модели, поскольку отклонение, не обнаруживаемое в межсезонье, в период массовой уборки приводит к лавинообразному росту очередей.

Полученные значения характеризуют потенциал предложенных решений при принятых модельных допущениях. В промышленной эксплуатации выигрыш может оказаться ниже: сказываются неполнота телеметрических данных, организационные ограничения на

перераспределение техники между участками и более сложная динамика состояния дорожной сети. Устойчивость же самого эффекта сомнений не вызывает - знак изменений сохраняется во всех реализациях эксперимента.

Предложенный нейросимволический подход формирует научно-методологический фундамент для создания автономных систем управления логистикой пятого поколения (5PL), способствующих решению задачи обеспечения технологического суверенитета в сфере цифровизации транспортной отрасли. Архитектура системы принципиально совместима с управлением парком, включающим высокоавтоматизированные транспортные средства, поскольку формируемое решение представляет собой структурированное задание, не требующее интерпретации человеком-исполнителем; оценка эффективности разработанных алгоритмов применительно к роботизированным парковым решениям составляет самостоятельное направление дальнейших исследований. Полученные результаты создают основу для масштабирования разработанных принципов на смежные сегменты интермодальных грузовых перевозок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении Концепции научно-технологического развития транспортного комплекса Российской Федерации на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 декабря 2025 г. № 3871-р. — Москва, 2025.
2. Трошин А. С., Новиков И. А., Блудян Н. О., Линник В. Ю. Особенности региональных интегрированных логистических систем (на примере АПК Белгородской области) // Транспорт Урала. — 2024. — № 4 (83). — С. 61–68.
3. Глаголев С. Н., Новиков И. А., Линник Ю. Н., Акулов А. А. Государственная поддержка работы грузовой транспортно-логистической системы // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 2. — С. 119–131.
4. Полунина Н. Ю. Основные тенденции развития логистики АПК в условиях геополитической трансформации // Наука и образование: актуальные вопросы теории и практики : материалы IV Международной научно-методической конференции, Оренбург, 26–27 марта 2024 г. — Самара ; Оренбург : Самарский государственный университет путей сообщения, 2024. — С. 191–194.
5. Карелина М. Ю., Ризаева Ю. Н., Баев В. В., Пупышев М. В., Карагодин В. И., Дидманидзе О. Н. Повышение эффективности работы транспортно-технологической системы // Transport Business in Russia. — 2024. — № 2. — С. 192–196.
6. Чечнев В. Б. Использование систем поддержки принятия решений в автоматизации процессов принятия решений // Электронные библиотеки. — 2025. — Т. 28, № 1. — С. 163–183.
7. Блудян Н. О., Линник Ю. Н., Степанов А. А., Линник В. Ю. Организационно-технологические и управленческие структуры в логистических транспортных системах // Transport Business in Russia. — 2024. — № 5. — С. 167–168.

8. Ризаева Ю. Н., Аккерман Д. А., Филиппов Е. О. Эксплуатация беспилотного транспорта на автомобильных дорогах // Перспективы развития, инновации и информационные технологии на транспорте : материалы Международной молодёжной научно-практической конференции. — 2024. — С. 19–23.
9. Курганов В. М., Грязнов М. В., Дорофеев А. Н. Обратные связи в управлении транспортной системой // Логистические системы в глобальной экономике. — 2021. — № 11. — С. 189–193. — EDN CPBMRN.
10. Курганов В. М., Рассоха В. И., Грязнов М. В., Дорофеев А. Н. Бережливое мышление и ситуационное управление в оценке потерь провозной способности автомобильного парка // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2024. — № 2. — С. 56–65.
11. Weller O., Boratko M., Naim I., Lee J. On the Theoretical Limitations of Embedding-Based Retrieval // arXiv preprint. — 2025. — arXiv:2508.21038. — 24 p.
12. Акиншин Н. С., Кутков В. Д. Гибридная система поддержки принятия решений на базе интеграции ML-каскада и LLM в логистике // Цифровая трансформация управления: проблемы и решения : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. — Москва : Государственный университет управления, 2025. — С. 3–6.
13. Мехдиева И. И., Степанов А. А. Применение информационных технологий в логистическом секторе // Транспорт и логистика: актуальные вопросы, проектные решения и инновационные достижения : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 22 октября 2021 г. — Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнёва, 2021. — С. 65–67.
14. Терентьев А. В., Кутков В. Д., Акиншин Н. С., Плетнев М. Г. Многоуровневая классификация информационных систем для транспортной отрасли // Транспортное дело России. — 2025. — № 7. — С. 119–123. — EDN LFKOUN.

15. Kutkov V. D., Yudina V. A., Terentyev A. V., Yudin D. A. Implementing an AI Agent to Make Decisions on Optimizing Labor Costs in the Agro-Industrial Complex // 2025 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). — New York : IEEE, 2025. — Art. 11220586.
16. Тод Н. А. Особенности управления потоками в логистике АПК // Научно-практические аспекты развития АПК : материалы национальной научной конференции, Красноярск, 12 ноября 2020 г. — Ч. 2. — Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2020. — С. 106–109. — EDN VTUHOI.
17. ГОСТ Р 59798-2021. Информационные технологии. Онтологии высшего уровня (TLO). Часть 2. Базисная формальная онтология (BFO). — Введ. 2022-04-01. — Москва : Российский институт стандартизации, 2021. — 24 с.
18. Халтурин Р. А., Акулов А. А., Кутков В. Д. Управление состоянием эффективности в сложных транспортных системах // Транспортное дело России. — 2025. — № 3. — С. 107–111. — EDN HYMDNI.
19. Glagolev S. N., Novikov I. A., Troshin A. S. Technological Solutions in the Field of Transport Logistics // BRICS Transport. — 2024. — Vol. 3, iss. 4. — P. 1–6.
20. Курганов В. М., Грязнов М. В., Дорофеев А. Н. Исследование онтологии логистики историко-генетическим методом // Мир транспорта. — 2023. — Т. 21, № 3 (106). — С. 124–132.
21. Sharma K., Kumar P., Li Y. OG-RAG: Ontology-Grounded Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models // arXiv preprint. — 2024. — arXiv:2412.15235. — URL: <https://arxiv.org/abs/2412.15235> (дата обращения: 25.03.2026). — Текст : электронный.
22. Спицина И. А., Аксенов К. А. Метод поддержки принятия решений при разработке информационных систем на основе мультиагентного подхода :

монография. — Москва : Издательский дом Академии Естествознания, 2023. — 180 с.

23. Коновалов В. Б., Курбанов А. Х., Ворушили Л. В. ИмPLICITное таргетирование логистических маркеров как способ повышения эффективности доставки материальных средств военным потребителям // Актуальные проблемы экономики и вопросы организации материально-технического обеспечения : сборник научных трудов. — Санкт-Петербург : ВА МТО, 2024. — С. 1–11.

24. Федотов А. В. Роль искусственного интеллекта в повышении эффективности обеспечения и распределения ресурсов // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения. — 2024. — № 4 (40). — С. 48–53.

25. Karelina M. Yu., Makarov V. S., Kutkov V. D., Yudina V. A. Software for Automated Generation and Versioning of Multimodal Datasets for Labor Cost Estimation in Manufacturing // T-Comm. — 2025. — Vol. 19, no. 10. — P. 54–60.

26. Карелина М. Ю., Чекусов М. С., Сердечный Д. В. [и др.]. Оценка эффективности эксплуатации парка сельскохозяйственной техники современного предприятия агропромышленного комплекса // Управление. — 2025. — Т. 13, № 3. — С. 36–51. — DOI 10.26425/2309-3633-2025-13-3-36-51. — EDN JHZA AA.

27. Козин М. Н., Федотов А. Б. Влияние развития интеллектуальных транспортных систем на обеспечение военно-экономической эффективности материального обеспечения войск (сил) // Актуальные проблемы экономики и вопросы организации материально-технического обеспечения : сборник научных трудов. — Санкт-Петербург : ВА МТО, 2023. — С. 1–5.

28. Sokolović V. S., Marković G. B. Internet of Things in Military Applications // Vojnotehnički glasnik / Military Technical Courier. — 2023. — Vol. 71, iss. 4. — P. 1148–1171.

29. Карелина М. Ю., Слуцков Д. Н., Стефановский Д. В., Кутков В. Д. Архитектура децентрализованной цифровой платформы для

интеллектуального управления агропроизводством с учётом специфики горных территорий // Устойчивое развитие горных территорий. — 2025. — Т. 17, № 2 (64). — С. 713–724. — DOI 10.21177/1998-4502-2025-17-2-713-724. — EDN KFLSHB.

30. Халтурин Р. А., Каштанов И. Ю., Кутков В. Д., Акинъшин Н. С. Модель структуры системы распределения ресурсов, основанной на функционально-сетевом принципе представления показателей // International Journal of Advanced Studies. — 2025. — Т. 15, № 1. — С. 234–251. — DOI 10.12731/2227-930X-2025-15-1-357. — EDN STTJXT.

31. Кутков В. Д., Колотушкин Н. А., Поляков Ю. Р. Интеллектуализация транспорта: синтез международного опыта и цифровых стратегий в Российской Федерации // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : сборник материалов X Международной научно-практической конференции, Омск, 4 декабря 2025 г. — Омск : СиБАДИ, 2026. — С. 680–686. — EDN NBXFXU.

32. Рыбин М. В., Степанов А. А., Савина М. В. К теории управления эффективностью цифровой трансформации // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2022. — Т. 2, № 6. — С. 32–38.

33. Глаголев С. Н., Блудян Н. О., Трошин А. С., Новиков И. А. Применение принципов устойчивого развития в логистической отрасли: создание экологических решений для бизнеса и общества // Transport Business in Russia. — 2024. — № 4. — С. 174–178.

34. Блудян Н. О., Линник Ю. Н., Степанов А. А., Линник В. Ю. Анализ организации обеспечения интегрированных цепей грузопотоков транспортно-логистических систем во внутреннем и международном сообщениях // Transport Business in Russia. — 2024. — № 5. — С. 164–166.

35. Степанов А. А., Игнатова Я. С., Меренков А. О., Ласточкина Г. А., Малькова А. В. Инженерно-управленческий подход в сфере транспорта и логистики // Вестник университета. — 2024. — № 3. — С. 69–77.

36. Интеллектуальная система управления внутривозовским автотранспортом / Ю. Н. Ризаева, В. Э. Клявин, М. В. Пупышев, Ю. В. Саввин // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : материалы мультиконференции. В 4 т., Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. Том 4. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 180-184. – EDN FPXXSX.

37. Печатнова Е. В., Кирюшин И. И., Егорова Н. С. Интеллектуальная транспортная система как средство снижения аварийности // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. — 2024. — № 4 (8). — С. 99–106.

38. Информационные технологии и инновации на транспорте : материалы 5-й Международной научно-практической конференции, Орёл, 22–23 мая 2019 г. / под общ. ред. А. Н. Новикова. — Орёл : Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, 2020. — 373 с. — ISBN 978-5-9929-0832-9. — EDN YILGMT.

39. Ризаева Ю. Н. Государственная политика в области развития беспилотных систем // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 5. — С. 11–19.

40. Gao R. X., Krüger J., Merklein M., Möhring H.-C., Váncza J. Artificial Intelligence in Manufacturing: State-of-the-Art, Perspectives, and Research Directions // CIRP Annals. — 2024. — Vol. 73, no. 2. — P. 677–700. — DOI 10.1016/j.cirp.2024.04.101.

41. Liu J., Jiang X., Shi M., Yang Y. The Impact of Artificial Intelligence on the Global Manufacturing Value Chain // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, no. 3. — Art. 1341. — DOI 10.3390/su16031341.

42. Akhtar Z. B. Artificial Intelligence (AI) within Manufacturing: An Investigative Exploration for Opportunities, Challenges, Future Directions // Metaverse. — 2024. — Vol. 5, no. 2. — Art. 2731. — DOI 10.54517/m.v5i2.2731.

43. Wan H., Zhang J., Chen Y., Xu W., Feng F. Exploring Gen-AI Applications in Building Research and Industry: A Review // Building Simulation. — 2025. — Vol. 18. — P. 1251–1273. — DOI 10.1007/s12273-025-1279-x.

44. Adebayo E., Udoh P., Kamudyariva K. B., Osobajo O. A. Artificial Intelligence in Construction Project Management: A Structured Literature Review on Its Evolution, Application Domain, and Future Trends // Digital. — 2025. — Vol. 5, no. 3. — P. 520–547. — DOI 10.3390/digital5030026.

45. Вологодина Е. С. Интеллектуальные транспортные системы в сфере автомобильного транспорта государств — членов Евразийского экономического союза // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2020. — Т. 26, № 2. — С. 175–180.

46. Intelligent Transportation System (ITS) Market Size, Share & Trends Analysis Report / Grand View Research. — 2024. — URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/intelligent-transportation-system-its-market> (дата обращения: 13.10.2025). — Текст : электронный.

47. Черкасов Д. А., Парфенов К. В. Проблема дублирования функций разноуровневых информационных систем в государственном управлении (на примере Министерства транспорта и дорожной инфраструктуры Московской области) // Экономика: вчера, сегодня, завтра. — 2022. — Т. 12, № 10-1. — С. 580–592. — DOI 10.34670/AR.2022.21.87.056. — EDN VIUMYE.

48. Королева Е. А., Сурнина А. С., Филатова Е. В. Цифровизация системы контейнерных перевозок // Транспортное дело России. — 2020. — № 1. — С. 152–155.

49. Саматов Р., Саматов У., Исмоилов Т. Закономерности факторов, определяющих эксплуатационные качества автотранспортной системы // Транспорт Шёлкового Пути. — 2020. — № 2. — С. 2–12.

50. Didast F. Z., Nassih R., Elbachir I. Artificial Intelligence and Logistics: Recent Trends and Development // Preprints.org. — 2024. — DOI 10.20944/preprints202410.2141.v1. — URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202410.2141/v1> (дата обращения: 13.10.2025). — Текст : электронный.

51. Халтурин Р. А., Судоргин Р. О., Акиншин Н. С. Теоретическое обоснование модели поиска оптимальных решений в сложных системах управления ресурсами // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies. — 2025. — Т. 15, № 1. — С. 214–233. — DOI 10.12731/2227-930X-2025-15-1-356.

52. Гвоздева П. Д., Сорокина Э. М., Малышев М. И. Технологическая база и перспективы интеграции цифровых технологий в управление предприятиями и комплексными транспортными системами // Технологии информационного общества : сборник трудов XIX Международной отраслевой научно-технической конференции, Москва, 11–13 марта 2025 г. — Москва : МТУСИ, 2025. — С. 295–297. — EDN MXFZEQ.

53. Азаров В. Н., Гудков Ю. И., Кабанов А. С. Проблемы и перспективы обеспечения безопасности в транспортной сфере и транспортной инфраструктуре // Качество. Инновации. Образование. — 2020. — № 3 (167). — С. 88–100. — DOI 10.31145/1999-513x-2020-3-88-100. — EDN YIPVSL.

54. Малыгин И. Г., Цыганов В. В., Савушкин С. А., Лемешкова А. В. Концепция интеллектуального каталога мультимодальных транспортных услуг // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 1-1 (47). — С. 155–165. — DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.018. — EDN YZKGGM.

55. Щербаков В. В., Силкина Г. Ю., Шевченко С. Ю. От бизнес-модели к бизнес-процессам: методология постановки менеджмента в цифровой среде // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. — 2021. — № 2. — С. 29–34. — EDN QXELAA.

56. Ампилогова Д. Д., Васянина И. К., Полбицына Л. Г. Проблемы развития современной логистики в России // Приоритетные направления экономического, социального и политического развития информационного общества (ПН-2023) : материалы Международной научно-практической конференции, Тюмень, 5 декабря 2023 г. — Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2024. — С. 6–12. — EDN GVODJI.

57. Горбунов Р. А., Хоботова С. Н. Преимущества внедрения технологий машинного обучения для повышения эффективности бизнес-процессов в логистике // Финансовые аспекты структурных преобразований экономики. — 2023. — № 9. — С. 8–19. — EDN FTWXSU.

58. Лукичев П. М., Чекмарев О. П. Экономика искусственного интеллекта: перспективы и риски. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. — 188 с. — ISBN 978-5-7422-8373-7. — EDN WCMLQY.

59. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. — Cambridge : MIT Press, 2016. — 800 p. — ISBN 0-262-03561-8.

60. Свяцкая А. И. Планирование, учёт и анализ логистических издержек на предприятии // Развитие финансового рынка и предпринимательских структур в современных условиях : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Волгоград, 1 декабря 2023 г. — Курск : Университетская книга, 2024. — С. 407–410. — EDN LHOZEX.

61. Pisareva O., Stefanovskiy D. Software Agent for Organizing Calculations in Large-Scale Control Systems // Proceedings of the 2024 17th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD). — IEEE, 2024. — P. 1–3.

62. Hamou K. A. B., Jarir Z., Quafafou M., Elfirdoussi S. Decision Support Systems Based on Artificial Intelligence for Supply Chain Management: A Literature Review // Advances in Intelligent System and Smart Technologies : Proceedings of I2ST 2023. — Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 826. — Springer, 2024. — P. 179–188.

63. Карелина М. Ю., Сердечный Д. В., Мелеховец А. Ю. [и др.]. Подходы к разработке адаптированной сельскохозяйственной техники для труднодоступных территорий России // Известия Дагестанского ГАУ. — 2025. — № 3 (27). — С. 153–158. — DOI 10.52671/26867591_2025_3_153. — EDN VOKREZ.

64. Сердечная Ю. Н., Сердечный Д. В., Корчагин С. А., Андриянов Н. А. Разработка эффективной системы мониторинга и анализа современных технологий развития агропромышленного комплекса в горных территориях // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16, № 2 (60). — С. 770–779. — EDN DABCSS.

65. Быковская Е. Н., Кафиятуллина Ю. Н., Харчилава Г. П. Риски инновационного развития корпораций в эпоху цифровой революции // Общество. Доверие. Риски: Доверие к миграционным процессам. Риски нового общества : материалы Международного форума, Москва, 2 октября 2019 г. / под общ. ред. П. В. Терелянского. — Вып. 2. — Москва : Государственный университет управления, 2019. — С. 118–120.

66. Raynolds M. K., Walker D. A., Ambrosius K. J. [et al.]. Cumulative Geoeological Effects of 62 Years of Infrastructure and Climate Change in Ice-Rich Permafrost Landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska // Global Change Biology. — 2014. — Vol. 20, no. 4. — P. 1211–1224. — DOI 10.1111/gcb.12500. — EDN QORSXO.

67. Воронкова О. В. Макроэкономические вопросы поддержки производителей вездеходной техники в Арктике // Компоненты научно-технического прогресса. — 2022. — № 10 (76). — С. 34–36. — EDN WCPHFT.

68. Кушляев В. Ф., Степанов С. Э., Попов К. С. Машины повышенной проходимости для Арктической зоны Российской Федерации // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22 апреля 2021 г. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2021. — С. 237–244.

69. Кушляев В. Ф., Аграновский А. А., Кушляев Д. В. Транспортно-технологические машины для условий Арктической зоны Российской Федерации // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2021. — № 2 (50). — С. 139–163.

70. Белокопытов С. В., Деревсков Н. Ю. Анализ готовности двигателей автомобильной техники к эксплуатации в условиях арктического региона // Современная школа России. Вопросы модернизации. — 2022. — № 2-1 (39). — С. 142–144.

71. Шеховцова В. Г., Жигadlo А. П. Транспортно-технологические средства для освоения Арктики и особенности их эксплуатации // Архитектура, строительство, транспорт : материалы Международной научно-практической конференции (к 85-летию СибАДИ), Омск, 2–3 декабря 2015 г. — Омск : СибАДИ, 2015. — С. 949–955.

72. Савельев Н. Г., Покутний В. В., Розновская Л. С. Система обеспечения готовности образцов военной автомобильной техники к применению по назначению в арктической климатической зоне // Военная мысль. — 2022. — № 2. — С. 104–116. — EDN YUPCWY.

73. Милова И. А., Неснова М. В. Транспортно-логистическая система российской Арктики // Современные проблемы инновационной экономики. — 2021. — № 8. — С. 160–165. — DOI 10.52899/978-5-88303-634-6_160.

74. Малихина О. В., Терентьев А. В. Методология управления эксплуатацией автомобилей в условиях недостаточности информации. — Санкт-Петербург : Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦПРАЗВИТИЕ», 2025. — 132 с. — DOI 10.37539/M241217.2024.53.32.001. — ISBN 978-5-00213-426-7.

75. Карелина М. Ю., Акулов А. А., Магомедов М. Ш. М., Юдин Д. А. Статистический анализ отказов автомобильных систем, вызванных трением // Транспортная доступность Арктики: сети и системы : материалы III Международной конференции, Санкт-Петербург, 13–14 июня 2024 г. — Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2025. — С. 121–131.

76. Носков А. А., Терентьев А. В., Сидлецкая Д. Д., Царев Д. А. Адаптация математической модели управления качеством решений в системах грузовых перевозок в условиях неопределённости // Вестник гражданских

инженеров. — 2024. — № 1 (102). — С. 104–111. — DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-1-104-111. — EDN DABXDD.

77. Замота Т. Н., Замота О. Н., Турушина Е. В. Методика расчета экономической эффективности эксплуатации автомобиля при внедрении интеллектуальной системы ТО и Р // Мир транспорта и технологических машин. — 2024. — № 3-1 (86). — С. 123–130. — DOI 10.33979/2073-7432-2024-3-1(86)-123-130. — EDN PDQIDA.

78. Каталевич А. П., Демьянов А. А., Аншаков Е. М. Особенности организации технического обслуживания и ремонта транспортных средств в Арктической зоне Российской Федерации // Актуальные вопросы перспективных направлений применения автомобильной и специальной техники : материалы IV Межведомственной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13 мая 2022 г. — Санкт-Петербург : Медиапапир, 2022. — С. 101–105.

79. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025616031 Российская Федерация. Программное обеспечение «Математическая модель оценки рисков ожиданий в логистических перевозках» : заявл. 12.03.2025 : опубл. 12.03.2025 / Н. В. Соловьев, А. В. Терентьев, М. Ю. Карелина, Р. О. Судоргин ; заявитель ФГБОУ ВО «Государственный университет управления».

80. Кушляев В. Ф., Гурьев А. Т., Деменкова Е. А., Васендина И. С. Структурное моделирование процессов жизненного цикла транспортно-технологических машин для чрезвычайных ситуаций // Надёжность и долговечность машин и механизмов : сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 16 апреля 2020 г. — Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. — С. 222–229. — ISBN 978-5-6042853-4-3.

81. Makarova, I., Mavlyautdinova, G., Gabsalikhova, L., Mavrin, V., & Buyvol, P. (2024). Improvement of the Transport System Environmental Safety of the Arctic Region. In: Wen, F., & Zhu, J. (Eds.), *Frontiers of Energy and*

Environmental Engineering (pp. 557-566). CFEEE 2023 2023. Environmental Science and Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0372-2_53

82. Васин В. А., Невелев В. А. Системный анализ экономической эффективности управления жизненным циклом российских беспилотных автомобилей // Современные проблемы управления конкурентоспособностью и инновационным развитием России на основе цифровых технологий : материалы VII Международной научно-практической конференции, Москва, 11 декабря 2018 г. — Москва : Московский политех, 2019. — С. 163–167.

83. Вазетдинов Р. Р., Гильманов М. М., Гильманов И. М. Экономическая оценка конкуренции между российскими КАМАЗами и китайскими грузовиками на рынке транспортных средств // Актуальные проблемы и перспективы реализации национальных проектов в Российской Федерации : Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Павлово, 21 декабря 2023 года. — Павлово: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2024. — 243-247 стр. — EDN MAGOCH.

84. Суслин И. Н., Хамитов Р. Н., Деревсков Н. Ю., Гаев К. Е. Особенности эксплуатации военной автомобильной техники в Арктике // Наука и военная безопасность. — 2024. — № 1 (36). — С. 41–50.

85. Алексеенко Е. В., Артамонова Л. С., Бочков С. П. [и др.]. Финансы автотранспортной и дорожной отраслей в условиях цифровизации экономики. — Москва : Русайнс, 2020. — 342 с. — EDN BCCAYN.

86. Булатова Н. Н., Дугина Е. Л., Доржиева Е. В. Цифровое развитие региональной транспортно-логистической инфраструктуры // π-Economy. — 2024. — Т. 17, № 1. — С. 41–54. — DOI 10.31133/2658-7307-2024-1-41-54.

87. Гашкова Л. В., Морозова О. Ю. Понятие и сущность цифровизации в транспортно-логистических процессах // Вестник Алтайской академии экономики и права. — 2022. — № 4-1. — С. 44–51.

88. Гребенкина С. А., Гребенкина И. А., Благодар А. Л. Интеллектуальные транспортные системы как фактор социально-экономического развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. — 2020. — № 2. — С. 317–329.

89. Пьянкова С. Г., Ергунова О. Т., Митрофанова И. В. Влияние транспортной инфраструктуры на устойчивое развитие территории в условиях нестабильности // Геополитика и экогеодинамика регионов. — 2023. — Т. 9, № 1. — С. 44–57. — DOI 10.18411/g-1-2023-44.

90. Рублева А. А., Рублева П. А. Цифровизация систем управления транспортными перевозками // Вопросы устойчивого развития общества. — 2020. — № 8. — С. 261–264.

91. Торопов Н. Ю., Федосеев Е. С. Развитие нормативной базы в области интеллектуальных транспортных систем // Дороги и мосты. — 2023. — № 2 (50). — С. 13–28.

92. Williamson O. Transaction Cost Economics: The Natural Progression // Journal of Retailing. — 2010. — Vol. 86, no. 3. — P. 215–226. — DOI 10.1016/j.jretai.2010.07.005.

93. Терентьев А. В., Судоргин Р. О., Акулов А. А. Модель снятия неопределённости в системе рейтингового оценивания эффективности транспортно-логистического производства // Транспортное дело России. — 2025. — № 4. — С. 122–126. — EDN KIVGBL.

94. Терентьев А. В., Судоргин Р. О. Модель определения весовых коэффициентов при оценке эффективности транспортного логистического производства, основанная на декомпозиции информационного пространства // Мир транспорта и технологических машин. — 2025. — № 2-1 (89). — С. 137–144. — DOI 10.33979/2073-7432-2025-2-1(89)-137-144. — EDN GUERPW.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Детализированные результаты вычислительного эксперимента

Таблица А.1 -Динамика точности выбора варианта закрепления подвижного состава за заявками по интервалам накопления опыта при различных стратегиях принятия решений

Интервал решений	Критерий Лапласа, %	Районирование статическое, %	Районирование + Учитель, %	Превышение над Лапласом, п.п.	Превышение над статическим, п.п.
1–25	66.3 ± 0.4	86.0 ± 0.3	81.1 ± 0.8	+14.9	-4.8
26–50	65.8 ± 0.4	85.6 ± 0.3	88.7 ± 0.4	+22.8	+3.1
51–75	66.0 ± 0.5	84.9 ± 0.4	90.7 ± 0.3	+24.7	+5.8
76–100	65.4 ± 0.4	85.1 ± 0.2	92.5 ± 0.2	+27.1	+7.3
101–125	65.8 ± 0.5	85.4 ± 0.4	92.7 ± 0.2	+26.8	+7.2
126–150	65.5 ± 0.4	85.3 ± 0.3	94.1 ± 0.2	+28.6	+8.9
151–175	65.4 ± 0.4	85.0 ± 0.3	95.0 ± 0.2	+29.6	+10.0
176–200	64.9 ± 0.4	85.5 ± 0.3	95.1 ± 0.2	+30.2	+9.6
201–225	64.3 ± 0.5	84.2 ± 0.4	94.9 ± 0.2	+30.6	+10.7
226–250	65.1 ± 0.4	84.9 ± 0.3	94.9 ± 0.2	+29.8	+10.1
251–275	65.2 ± 0.5	85.4 ± 0.3	95.2 ± 0.2	+29.9	+9.7
276–300	64.9 ± 0.4	84.8 ± 0.4	95.5 ± 0.2	+30.6	+10.7

Таблица А.2 - Сходимость покомпонентных оценок вероятностей состояний транспортной среды к истинному распределению

Состояние природы	Истинная вероятность	Иерархический приор	После 10 решений	После 25 решений	После 50 решений	После 100 решений	После 150 решений	После 200 решений	После 300 решений
Штатно	0,46	0,333	0,372	0,415	0,435	0,447	0,451	0,452	0,455
Погода	0,26	0,267	0,247	0,256	0,259	0,261	0,26	0,261	0,26
Авария элеватора	0,14	0,2	0,157	0,15	0,142	0,138	0,14	0,14	0,14
Эконом. скачок	0,08	0,133	0,119	0,095	0,089	0,085	0,083	0,082	0,081
Форс-мажор	0,06	0,067	0,106	0,083	0,074	0,069	0,066	0,065	0,063
Норма ошибки $ \hat{P} - P $	–	0,15	0,186	0,135	0,105	0,078	0,064	0,055	0,045

Таблица А.3 - Динамика точности управления при структурном сдвиге режима внешней среды по фазам вычислительного эксперимента

Фаза эксперимента	Адаптивный контур, %	Статическое районирование, %	Разность, п.п.
Устойчивый режим (реш. 101–200)	91.8 ± 0.3	85.0 ± 0.3	+6.8
Момент сдвига (201–230)	65.6 ± 0.8	68.6 ± 0.5	-3.0
Начало адаптации (231–270)	80.3 ± 0.6	69.5 ± 0.4	+10.8

Продолжение адаптации (271–320)	88.1 ± 0.3	68.6 ± 0.4	+19.5
Новое равновесие (321–400)	90.4 ± 0.3	69.9 ± 0.4	+20.5

Таблица А.4 - Посуточные значения технико-эксплуатационных показателей работы подвижного состава за моделируемый уборочный период

День	Условие	Рейсов	Транспортная работа, т·км	β базовая	β ИСПР	γ базовая	γ ИСПР	$C_{уд}$ базовая	$C_{уд}$ ИСПР, руб/т·	$\Delta C_{уд}, \%$	Ожидание базовая	Ожидание ИСПР,	В окне базовая, %	В окне ИСПР, %
1	ясно	10	2134	0,592	0,661	0,708	0,778	10,54	9,21	-12,6	4,9	0,9	40	40
2	осадки	7	1432	0,538	0,522	0,782	0,81	12,31	12,42	0,9	1,2	1,8	57,1	85,7
3	осадки	16	2579	0,5	0,551	0,582	0,688	15,46	14,15	-8,5	2,1	5,2	37,5	87,5
4	ясно	10	1743	0,5	0,548	0,632	0,706	13,02	11,8	-9,4	1,2	1,4	30	40
5	ясно	15	3095	0,5	0,526	0,66	0,764	11,63	10,86	-6,6	3,1	6,6	46,7	60
6	ясно	19	3958	0,5	0,536	0,697	0,79	14,65	11,25	-23,2	58,4	1,3	21,1	42,1
7	ясно	13	2702	0,5	0,54	0,677	0,746	11,57	10,63	-8,2	4,5	4,8	15,4	38,5
8	осадки	18	3312	0,5	0,557	0,67	0,748	14,86	12,68	-14,7	17,9	3,2	33,3	77,8
9	ясно	16	2843	0,5	0,54	0,7	0,757	13,79	11,78	-14,5	21	1	18,8	37,5
10	осадки	18	3637	0,5	0,532	0,621	0,779	13,24	12,31	-7	2	7,4	27,8	61,1
11	ясно	10	1905	0,5	0,545	0,686	0,769	13,03	11,36	-12,8	8,5	2,2	20	60
12	осадки	14	2771	0,5	0,551	0,654	0,763	13,37	11,94	-10,7	4,5	2	42,9	35,7
13	ясно	14	3212	0,5	0,536	0,675	0,797	11,95	10,48	-12,4	24,8	1,7	7,1	28,6
14	осадки	17	3785	0,5	0,537	0,709	0,761	12,97	11,49	-11,5	18	1,9	29,4	47,1
15	осадки	12	2709	0,5	0,575	0,76	0,812	11,45	9,78	-14,6	5,4	1,6	33,3	41,7
16	ясно	18	4302	0,5	0,548	0,731	0,779	10,21	9,21	-9,8	5,1	5,4	44,4	55,6
17	осадки	20	4637	0,5	0,537	0,724	0,792	11,71	10,93	-6,7	3,8	6,2	50	60

18	ясно	7	1645	0,5	0,551	0,681	0,77	11,17	9,99	-10,6	4,6	0,7	14,3	14,3
19	ясно	22	4778	0,5	0,521	0,664	0,751	12,22	10,61	-13,2	23,2	4	40,9	54,5
20	осадки	15	3306	0,5	0,538	0,686	0,786	12,47	11,38	-8,8	3	5,5	53,3	73,3

Таблица А.5 - Результаты сопоставления стратегий управления по отдельным реализациям вычислительного эксперимента

№	β базовая	β ИСППР	γ базовая	γ ИСППР	С_уд базовая	С_уд ИСППР	Δ С_уд, %	W_сут базовая	W_сут ИСППР	В окне базовая, %	В окне ИСППР, %	Ожидание базовая, мин	Ожидание ИСППР, мин
1	0,503	0,541	0,723	0,771	12,95	11,25	-13,1	534	671	29,2	39,4	17,5	2,8
2	0,504	0,541	0,736	0,769	12,53	11,35	-9,4	543	666	36,6	46,3	6,9	3,9
3	0,503	0,543	0,659	0,768	12,38	11,14	-10	522	652	35,5	42,7	4,4	3,6
4	0,503	0,552	0,748	0,764	12,1	10,57	-12,7	555	712	27,5	36,2	9	3
5	0,503	0,544	0,71	0,765	12,77	11,44	-10,4	558	704	39,7	43,6	6,1	2,9
6	0,504	0,544	0,67	0,767	12,54	11,09	-11,6	547	694	38,1	48,9	10,1	3,9
7	0,503	0,543	0,746	0,771	12,49	11,06	-11,5	626	773	30,4	42,5	13,6	3,3
8	0,504	0,544	0,736	0,777	12,79	11,35	-11,3	556	696	30,7	45	9,9	2,8
9	0,504	0,542	0,74	0,766	12,54	11,01	-12,2	525	660	29	47,8	13	2,6
10	0,503	0,548	0,746	0,768	12,37	10,91	-11,8	589	737	27,3	44,1	10,8	3,1
11	0,504	0,542	0,726	0,774	12,43	10,95	-11,9	594	739	33,3	38,9	14,2	3
12	0,504	0,542	0,673	0,75	12,27	11,02	-10,2	519	649	30,4	45,8	7,7	3
13	0,504	0,545	0,664	0,763	12,9	11,34	-12,1	540	676	33,3	45,2	11,7	3,3
14	0,504	0,549	0,749	0,77	12,23	10,96	-10,4	560	706	28,9	45,9	6,4	3
15	0,504	0,541	0,748	0,771	12,62	10,89	-13,7	610	777	29,6	39,1	18,2	2,9
16	0,504	0,546	0,735	0,771	12,36	11,08	-10,3	536	671	33,2	46,9	7,2	3,1
17	0,504	0,547	0,674	0,754	12,46	11,19	-10,2	588	731	31,3	41,5	6,9	3,6
18	0,503	0,542	0,721	0,763	12,98	11,4	-12,2	561	705	29,4	43	15	3,1

19	0,504	0,545	0,746	0,773	12,37	10,8	-12,6	518	649	27,9	46,6	13,7	3,6
20	0,504	0,543	0,72	0,765	12,28	11,05	-10	563	698	29,5	44,2	7,9	3,4
21	0,503	0,544	0,744	0,771	12,47	11,07	-11,2	603	752	28,3	41,7	9,9	3,3
22	0,503	0,546	0,647	0,743	13,93	12,14	-12,9	553	711	34,4	50,2	11,8	3,1
23	0,503	0,543	0,738	0,773	12,4	11,11	-10,4	584	724	32,5	44,8	8,5	3,6
24	0,503	0,545	0,678	0,764	12,61	11,16	-11,5	583	736	38	48,9	9,8	3,6
25	0,504	0,55	0,659	0,768	12,83	11,11	-13,5	568	718	31,8	45,6	14	3
26	0,504	0,545	0,68	0,771	12,06	10,85	-10	583	726	39,1	44,1	6,1	4,3
27	0,504	0,544	0,739	0,76	12,71	11,42	-10,1	532	655	29,7	48,5	8,9	3,9
28	0,504	0,547	0,737	0,776	12,8	11,39	-11,1	534	677	27	47,8	8,9	3,5
29	0,503	0,541	0,74	0,761	12,31	11,18	-9,2	546	677	31,8	42,3	5,5	3,8
30	0,504	0,542	0,757	0,765	12,59	10,96	-12,9	617	761	28,2	40,9	19,9	3,5
31	0,504	0,549	0,754	0,775	12,1	10,73	-11,3	622	788	30,2	43	8,1	3,5
32	0,504	0,549	0,744	0,754	12,57	11,23	-10,7	505	634	31,4	40,4	5,6	3,5
33	0,504	0,55	0,664	0,762	12,9	11,12	-13,8	561	710	29,5	41,3	14,1	3,1
34	0,503	0,545	0,742	0,765	12,66	11,21	-11,4	600	751	34,6	45,1	11	3,8
35	0,504	0,544	0,738	0,766	12,82	11,35	-11,5	517	642	29,6	43,6	12,3	3,2
36	0,504	0,546	0,677	0,779	12,58	10,82	-14	557	702	30,9	43,1	16,4	2,7
37	0,504	0,551	0,748	0,779	12,45	10,92	-12,3	594	765	26,8	38,1	10	3,9
38	0,504	0,544	0,728	0,759	12,57	11,03	-12,2	593	740	29,7	36	16,1	3
39	0,504	0,546	0,738	0,76	12,7	11,19	-11,8	569	732	27,5	45	9,8	4,1
40	0,503	0,544	0,737	0,775	12,24	10,92	-10,8	580	733	28,7	38,5	8,7	3,4
41	0,503	0,546	0,719	0,766	12,93	11,26	-12,9	650	820	34,6	54,6	14,9	3,4
42	0,503	0,548	0,702	0,766	12,35	11,06	-10,4	533	669	33,2	45,3	5,7	2,9
43	0,503	0,543	0,727	0,761	13,07	11,65	-10,9	555	695	29,8	44	10,1	3,9
44	0,504	0,547	0,747	0,767	12,86	11,23	-12,7	555	703	36	48,9	12	3,1
45	0,503	0,55	0,715	0,778	12,47	10,91	-12,4	554	703	33,3	42,1	10,1	2,8
46	0,503	0,546	0,737	0,769	13,13	11,5	-12,5	558	708	30,3	44	11,8	2,8

47	0,504	0,548	0,752	0,775	12,18	10,83	-11,1	541	692	34,3	42,3	7,3	3,7
48	0,503	0,543	0,734	0,774	12,62	11,19	-11,4	562	713	33,3	40,9	10,3	3,5
49	0,504	0,54	0,655	0,772	13,14	11,6	-11,8	559	697	29,4	44,4	13,1	3,6
50	0,504	0,553	0,721	0,769	12,75	11,18	-12,4	487	633	36,1	42,2	6,9	2,6
51	0,504	0,543	0,684	0,772	12,54	10,99	-12,4	591	739	31,2	43,1	13,9	3,6
52	0,504	0,545	0,741	0,785	13,02	11,33	-13	557	691	27,9	40,2	16,3	3,2
53	0,503	0,545	0,752	0,763	12,42	10,88	-12,4	563	700	27,6	36,4	14,3	2,7
54	0,503	0,542	0,744	0,762	12,31	11,01	-10,6	602	733	28,1	37	12,1	3,9
55	0,503	0,547	0,75	0,773	12,66	11,19	-11,6	552	694	27	41,6	9,2	3,5
56	0,503	0,545	0,667	0,766	12,92	11,26	-12,8	535	678	34,7	43,9	12,8	3,1
57	0,503	0,544	0,752	0,766	12,41	11,07	-10,8	592	741	31,7	43,3	8,3	3,6
58	0,504	0,542	0,754	0,78	12,3	11,09	-9,8	563	704	28,4	39,3	6,4	3,4
59	0,503	0,55	0,666	0,76	12,47	11,02	-11,6	535	673	27,5	36,2	8,8	3
60	0,504	0,552	0,722	0,767	12,38	10,99	-11,3	551	703	33,2	41,6	5,9	2,7

Таблица А.6 - Описательная статистика технико-эксплуатационных показателей по совокупности реализаций
вычислительного эксперимента

Показатель	Среднее базовая	Среднее ИСПР	СКО базовая	СКО ИСПР	Минимум базовая	Минимум ИСПР	Медиана базовая	Медиана ИСПР	Максимум базовая	Максимум ИСПР	Коэф. вариации базовая	Коэф. вариации ИСПР	Изменение среднего, %
Коэффициент использования пробега β	0,504	0,545	0	0,003	0,503	0,54	0,504	0,545	0,504	0,553	0,001	0,006	8,3
Коэффициент использования грузоподъёмности γ	0,72	0,768	0,032	0,007	0,647	0,743	0,736	0,767	0,757	0,785	0,045	0,01	6,6
Среднее время оборота, мин	97,611	98,577	4,841	3,84	87,941	89,521	96,832	98,197	109,25	107,93	0,05	0,039	1
Среднее ожидание на пункте приёмки, мин	10,599	3,309	3,555	0,409	4,425	2,559	10,034	3,301	19,931	4,306	0,335	0,124	-68,8
Удельная себестоимость, руб/т·км	12,593	11,133	0,317	0,247	12,056	10,571	12,544	11,098	13,926	12,137	0,025	0,022	-11,6
Суточная выработка, т·км/(ТС·сут)	562,332	706,513	31,352	38,652	486,94	632,525	558,339	703,489	649,691	819,652	0,056	0,055	25,6
Доставки в заданном окне, %	31,308	43,23	3,265	3,702	26,756	36,014	30,435	43,234	39,716	54,603	0,104	0,086	38,1
Среднее опоздание, мин	18,245	4,135	6,567	1,739	7,414	1,034	17,145	3,759	33,227	8,053	0,36	0,421	-77,3

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Документы, подтверждающие практическую значимость исследования

АКТ внедрения

результатов диссертационного исследования

Куткова Владимира Дмитриевича

на тему: «Интеллектуальная система поддержки принятия решений для логистики АПК»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.9.9. «Логистические транспортные системы»

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационного исследования Куткова Владимира Дмитриевича использованы ООО «КНОДЛЬ» при разработке программных продуктов и выполнении проектов по созданию систем искусственного интеллекта для предприятий реального сектора экономики, в первую очередь для решения прикладных задач управления перевозками и транспортно-логистического обслуживания грузовладельцев.

Основанием для использования результатов послужило соответствие предложенного автором нейросимволического подхода технологической линии Компании, ориентированной на построение знание-ориентированных архитектур, в которых генеративные модели работают не автономно, а в связке с формализованным описанием предметной области. Практика выполнения транспортных проектов показывает, что применение больших языковых моделей без такого связывания приводит к формированию технологически неисполнимых маршрутных заданий, и именно эта проблема получила в работе законченное инженерное решение.

К внедрению приняты следующие результаты диссертационного исследования.

Первое. Метод семантического моделирования транспортной предметной области на основе технологии Ontology-Grounded RAG, предусматривающий трансформацию неструктурированных данных в формализованные утверждения графа знаний и генерацию сценариев исключительно посредством навигации по этому графу. Метод положен в основу типового решения Компании по интеграции разнородных источников данных транспортного предприятия - телематики подвижного состава, учетных систем, справочников инфраструктуры и внешних сервисов - в единое смысловое пространство. Принципиальное значение для промышленной эксплуатации имеет заложенное в методе свойство проверяемости: каждая выданная системой рекомендация возводится к конкретным фактам графа, что делает ее объяснимой для диспетчерского персонала заказчика.

Второе. Принцип каскадной декомпозиции рассуждений и распределения функций между специализированными агентами - семантической трансляции входного потока, генерации вариантов перевозки, фильтрации недостоверных решений, логического арбитража по жестким технологическим ограничениям и адаптивной калибровки. Указанный принцип использован Компанией как референсная архитектура при проектировании интеллектуальных модулей транспортного назначения. Вынесение проверки ограничений в отдельный детерминированный контур, отделенный от генеративной части, позволило обеспечить требуемый уровень надежности выходных решений без ограничения гибкости обработки неструктурированной информации.

Третье. Способ формализации технологических ограничений транспортного процесса средствами онтологии - совместимость типа подвижного состава и приемного устройства,

габаритно-массовые и осевые ограничения, допустимость участков маршрута по состоянию дорожного покрытия, режимные требования к условиям перевозки. Формализованные ограничения реализованы в виде переиспользуемой библиотеки правил, применяемой при отсеке заведомо невыполнимых вариантов до запуска оптимизационных расчетов, что заметно сокращает вычислительную нагрузку и время отклика системы при большой размерности задачи маршрутизации.

Четвертое. Схема контура адаптации, обеспечивающая ретроспективный анализ расхождений планового и фактического исполнения рейса и автоматическую корректировку весовых коэффициентов критериев выбора. Схема применена Компанией при построении механизмов дообучения прикладных моделей на эксплуатационных данных заказчика, включая уточнение нормативов времени оборота подвижного состава и прогноз ожидания под грузовыми операциями. Существенным для промышленного применения является продемонстрированное автором свойство восстановления качества управления после структурного изменения условий работы транспортной системы, тогда как статические процедуры выбора в аналогичных условиях деградируют необратимо.

Опыт микросервисной реализации системы на локально развернутых языковых моделях, графовой базе данных и открытом оптимизационном инструментарии учтен при формировании требований к архитектуре решений Компании, поставляемых транспортным и логистическим заказчикам в контуре ограниченного доступа к внешним сервисам. Такая конфигурация отвечает требованиям заказчиков к сохранению коммерческой тайны перевозочной деятельности и обеспечивает технологическую независимость поставляемых решений.

Использование перечисленных результатов позволило Компании сократить трудоемкость проектирования интеллектуальных транспортных модулей за счет применения готовой архитектурной схемы и библиотеки формализованных ограничений, повысить предсказуемость поведения генеративных компонентов в задачах планирования перевозок и предложить заказчикам решения, сочетающие обработку неструктурированных данных со строгой проверкой исполнимости транспортных решений.

Результаты диссертационного исследования Куткова Владимира Дмитриевича признаются обладающими научной и практической ценностью, применимыми в промышленной разработке систем искусственного интеллекта транспортного назначения и внедренными в производственную деятельность ООО «КНОДЛЬ».

Советник по технологическому развитию

ООО «КНОДЛЬ»

/Поспелов Д.Ю./



АКТ внедрения

результатов диссертационного исследования

Куткова Владимира Дмитриевича

на тему: «Интеллектуальная система поддержки принятия решений для логистики АПК»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.9.9. «Логистические транспортные системы»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационного исследования Куткова Владимира Дмитриевича внедрены в практическую деятельность ООО «Координационный совет по логистике». В диссертационной работе разработана гибридная интеллектуальная система поддержки принятия решений по оперативному управлению транспортно-логистическими процессами, основанная на онтологическом моделировании предметной области, каскадном взаимодействии специализированных программных агентов, методах многокритериальной векторной оптимизации и аппарате теории массового обслуживания, что позволило сформировать научно обоснованный подход к диспетчеризации и маршрутизации подвижного состава в условиях стохастической внешней среды и жестких требований к соблюдению временных окон доставки.

Результаты исследования были применены при решении задач оперативного планирования, распределения провозных возможностей парка и организации перевозок грузов, чувствительных к срокам и условиям транспортировки, выполняемых по проектам оптимизации нашей организация. Разработанная доменная онтология обеспечила формализованное описание парка подвижного состава с учетом габаритно-массовых параметров, осевых нагрузок, типа кузова и способа выгрузки, а также описание грузовых фронтов пунктов погрузки и выгрузки как многоканальных систем обслуживания с ограниченной пропускной способностью, что в позволило автоматически отсекал технологически невыполнимые варианты подачи транспортного средства до этапа расчетов и исключить непроизводительные рейсы, обусловленные несовместимостью технических характеристик транспортного средства и приемного устройства грузополучателя.

Практическую ценность для компании представляет реализованный в работе переход от периодического планирования к событийному управлению. Поступающие телематические данные, сведения о состоянии грузовых фронтов и внешние метеорологические сведения интерпретируются системой как триггеры пересчета плана, вследствие чего перепланирование маршрута или смена точки назначения выполняются без участия диспетчера. Предложенный математический аппарат многокритериального выбора сценария перевозки, учитывающий одновременно транспортные издержки, отклонение от согласованного временного окна, риск невыполнения рейса и сохранность потребительских свойств груза, дал возможность ранжировать альтернативные варианты, что соответствует реальной практике работы разнородными требованиями грузовладельцев.

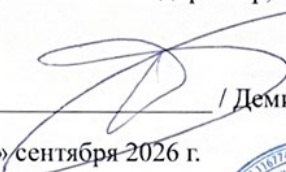
Предложенные научные решения использованы в ходе развития информационных систем ООО «Координационный совет по логистике» и внедрены в прикладные информационно-аналитические платформы, обеспечивающие оперативное управление перевозками. Практическая значимость работы подтверждается применением разработанных методов при организации управления транспортными потоками, что

способствует росту качества предоставляемых услуг, сокращению времени доставки, снижению доли рейсов, выполненных с нарушением согласованных сроков, и повышению устойчивости функционирования транспортной системы Общества в целом.

Подводя итог, можно констатировать, что результаты диссертационного исследования Куткова Владимира Дмитриевича имеют высокую научную и практическую ценность, направлены на совершенствование управления транспортно-логистическими процессами и успешно внедрены в деятельность ООО «Координационный совет по логистике», обеспечив формирование эффективных управленческих решений в рамках цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации.

Доктор технических наук, доцент,

Исполнительный директор, ООО «Координационный совет по логистике»

 / Демин В.А.
«14» сентября 2026 г.



Проректор федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения выс-
шего образования «Государственный
университет управления», к.э.н., доцент

« 15 » апреля 2026 г.  Д.Ю. Брюханов



**СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ
результатов диссертационного исследования
в учебный процесс**

Основные положения и методические разработки диссертационного исследования Куткова Владимира Дмитриевича на тему «Интеллектуальная система поддержки принятия решений для логистики АПК», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.9.9. - Логистические транспортные системы, внедрены в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет управления».

Результаты диссертационной работы были использованы при преподавании дисциплин «Управление логистическими системами в условиях цифровой экономики», «Информационные системы в логистике» (направление подготовки 38.03.02 «Менеджмент», образовательная программа «Логистика и управление цепями поставок»).

Д.э.н., профессор кафедры
логистики и транспортно-технологических систем



А.А. Степанов