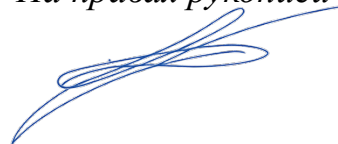


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ УПРАВЛЕНИЯ» (ГУУ)

На правах рукописи



Акиньшин Никита Сергеевич

**МЕТОДЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
НАЗЕМНОЙ ТЕХНИКИ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО
КОМПЛЕКСА**

Специальность: **2.9.9. «Логистические транспортные системы»**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Терентьев Алексей Вячеславович

Москва – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННОЙ ЛОГИСТИКИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРКА ТЕХНИКИ	12
1.1. Внутрихозяйственная логистика АПК как сложная динамическая система	12
1.2. Классификация и структурный анализ парка техники.....	20
1.2.1. Тягово-энергетические средства (ТЭС)	23
1.2.2. Самоходные технологические комплексы (СТК).....	30
1.2.3. Агрегатируемые машины и орудия (АМО).....	34
1.2.4. Роботизированные и беспилотные системы (РБС).....	38
1.3. Формализация параметров состояния технического парка и синтез матрицы технологической допустимости.....	42
1.4. Проблематика управления разнородным парком технических средств в условиях стохастической неопределенности	46
1.4.1. Влияние структурной разнородности и модификации парка на точность планирования	47
1.4.2. Стохастическая природа возмущающих воздействий	48
1.4.3. Ограниченность детерминированных методов в задачах адаптивного управления	50
1.5. Выводы по главе 1	51
2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРКОМ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.....	53
2.1. Теоретико-игровая формализация задачи оперативного управления транспортно-логистическими процессами	53
2.2. Развитие метода районирования для задач многокритериальной оптимизации в логистике АПК.....	55
2.3. Учет априорной информации и экспертных предпочтений: Оценки Фишберна и Энтропия	59
2.4. Алгоритм выбора оптимальной стратегии управления парком на основе синтеза критериев.....	61
2.5. Выводы по главе 2.....	68
3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	70

3.1. Формирование обучающей выборки и признакового пространства	70
3.2. Архитектура математически-обоснованной модели	75
3.3. Алгоритмы предиктивной аналитики: прогнозирование доступности техники и рабочих окон	83
3.4. Выводы по главе 3	85
ГЛАВА 4. АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ	
ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С МОДУЛЕМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ...	88
4.1. Общая архитектура гибридной СППР: схема взаимодействия модулей	88
4.2. Разработка модуля объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) на базе больших языковых моделей	93
4.3. Программная реализация и интеграция компонентов системы	97
4.4. Стратегия развертывания интеллектуальной системы управления на агропромышленном предприятии	100
4.5 Выводы по главе	106
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА И ОЦЕНКА	
ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОЛОГИИ	108
5.1. Цели, задачи и методика проведения экспериментальных исследований.	108
5.2. Объект моделирования и исходные данные вычислительного эксперимента	112
5.3. Модель порождения исходных данных вычислительного эксперимента..	119
5.4. Описание экспериментального программного комплекса и проверка корректности реализации	126
5.5. Верификация математического ядра и результаты сопоставления стратегий управления	131
5.6. Когнитивная интерпретация решений и оценка экономической эффективности	142
5.7. Выводы по главе 5	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	152
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	156
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	158
ПРИЛОЖЕНИЯ	173
Приложение А. Структурно-параметрическая модель парка техники и матрица технологической допустимости	174

Приложение Б. Развёрнутый расчёт денежных потоков проекта	177
Приложение В. Апробация работы	179
Приложение Г. Документы, подтверждающие практическую значимость исследования.....	181

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В условиях реализации национальных целей развития Российской Федерации и ведомственного проекта «Цифровое сельское хозяйство», критическим фактором повышения маржинальности агропромышленного комплекса (АПК) становится эффективность функционирования внутрихозяйственных транспортно-логистических систем (ВТЛС). Современная логистика АПК характеризуется эксплуатацией разнородного парка техники - тягово-энергетических средств, самоходных технологических комплексов и агрегируемых орудий, работающих в едином технологическом контуре.

Специфика транспортно-логистических процессов в АПК заключается в высокой стохастичности внешней среды (метеоусловия, состояние агрофона) и внутренней неопределенности (техническая надежность парка). Существующие методы оперативного планирования, опирающиеся на детерминированные алгоритмы и жесткие нормативы, теряют устойчивость при возникновении нештатных ситуаций. Это приводит к рассинхронизации звеньев логистической цепи, простоям высокопроизводительной техники и срыву агротехнических сроков, что в конечном итоге снижает общую рентабельность производства.

Переход к интеллектуальному управлению транспортными ресурсами ограничен «эффектом черного ящика» современных прогностических моделей. Для диспетчерского аппарата недостаточно получения расчетных команд; требуется математически обоснованное подтверждение устойчивости предлагаемых сценариев и их смысловая интерпретация. Таким образом, разработка научно-методического аппарата, интегрирующего методы классической теории принятия решений в условиях неопределенности и современные нейросетевые технологии, способные учитывать риски и предоставлять объяснимые рекомендации, является актуальной научной задачей.

Степень разработанности проблемы. Фундаментальные основы организации грузопотоков и специфики логистики АПК заложены в трудах

Глаголева С.Н., Карелиной М.Ю., Блудяна Н.О., Линника В.Ю., Степанова А.А. и др. Вопросы кибернетического подхода и моделирования транспортных процессов в стохастической среде нашли отражение в работах Курганова В.М., Грязнова М.В., Рассохи В.И. Развитию интеллектуальных систем поддержки принятия решений (СППР) и интеграции методов ИИ в логистику посвящены исследования Терентьева А.В., Аксенова К.А., Савиной М.В. и зарубежных специалистов (Ian J. Goodfellow, Linardatos, P., Namou K.B). Однако вопросы синтеза предиктивных моделей с риск-ориентированными функциями потерь и методами объяснимого ИИ (XAI) для управления наземной техникой АПК остаются недостаточно проработанными.

Цель исследования: разработка научно-методического аппарата оперативного управления внутрихозяйственными транспортно-логистическими системами АПК, обеспечивающего структурную оптимальность и метрическую устойчивость планов распределения разнородного парка техники в условиях стохастической неопределенности.

Задачи исследования:

1. Провести системный анализ ВТЛС АПК и идентифицировать стохастические параметры, лимитирующие пропускную способность логистических цепей.
2. Разработать параметрическую классификацию разнородного парка техники и сформировать матрицу технологической допустимости для формализации взаимодействия ресурсов.
3. Разработать аналитический метод выбора логистических стратегий на базе метода районирования в симплексе вероятностей для определения зон устойчивости решений.
4. Спроектировать архитектуру предиктивного модуля на основе математически-интегрированного машинного обучения с внедрением функции штрафа за риск в целевую функцию.

5. Разработать инструментарий объяснимого ИИ на базе профилированных больших языковых моделей (LLM) для трансляции результатов моделирования в интерпретируемые рекомендации.

6. Реализовать программный прототип системы и выполнить методами имитационного моделирования статистически обоснованную количественную и экономическую оценку эффективности разработанных алгоритмов.

Объект исследования: внутрихозяйственная транспортно-логистическая система агропромышленного предприятия.

Предмет исследования: аналитические методы и интеллектуальные модели принятия решений по распределению разнородного парка техники в условиях неполной информации.

Рабочая гипотеза: Повышение эффективности функционирования транспортно-логистических систем АПК возможно за счет трансформации реактивной диспетчеризации в адаптивное предиктивное управление. Предполагается, что интеграция методов машинного обучения с разработанной функцией потерь, учитывающей экономические риски, и аппарата теории принятия решений позволит обеспечить устойчивость логистических планов к стохастическим возмущениям среды.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы теории транспортной логистики, системного анализа, теории игр (игры с природой), теории информации (энтропия Шеннона), машинного обучения (рекуррентные нейронные сети) и методы обработки естественного языка (NLP), методы имитационного статистического моделирования (марковские цепи, метод Монте-Карло), математической статистики (непараметрические парные критерии, бутстреп-оценка доверительных интервалов, поправка на множественность сравнений) и оценки экономической эффективности инвестиций (чистый дисконтированный доход).

Область исследования соответствует паспорту специальности 2.9.9. «Логистические транспортные системы»:

- п. 6. Информационные системы управления элементами... включая цифровые и интеллектуальные технологии, телематику.
- п. 9. Организационно-технологические решения в области интеллектуализации и цифровизации транспортно-логистических процессов.
- п. 12. Надежность, безопасность реализации цепей в логистических транспортных системах и управление рисками.

Научная новизна исследования:

1. Структурно-параметрическая модель разнородного парка техники, представленная в виде Матрицы технологической допустимости, которая, в отличие от существующих классификаторов, формализует взаимосвязь эксплуатационных характеристик машин и логистических операций для автоматизированного формирования МТА.

2. Аналитический метод оценки устойчивости управленческих решений, основанный на развитии метода районирования в симплексе вероятностей, позволяющий количественно определять устойчивость логистических планов к погрешностям прогноза и экспериментально подтверждённый как прогностически информативный.

3. Архитектура математически-информированной модели машинного обучения, отличающаяся использованием гибридной функции потерь, которая интегрирует в процесс обучения нейросети дифференцируемый штраф за экономические последствия принятия субоптимальных решений.

4. Концептуальная архитектура интеллектуальной СППР, реализующая принцип функционального разделения между математическим ядром и модулем объяснимого ИИ (XAI) на базе LLM, обеспечивающая прозрачность и обоснованность рекомендаций для диспетчерского персонала.

Теоретическая значимость заключается в научном обосновании гибридного подхода к управлению логистикой, объединяющего прогностические возможности нейронных сетей со строгими критериями теории принятия решений. Разработанные модели расширяют инструментарий

исследования операций в части управления ресурсами в условиях высокой энтропии.

Практическая значимость состоит в разработке программного комплекса, позволяющего агропредприятиям автоматизировать диспетчеризацию, снизить риски аварийных простоев и сократить транспортно-логистические издержки за счет предиктивного анализа «погодных окон» и состояния техники.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурно-параметрическая модель и классификация разнородного парка техники во внутрихозяйственной логистической системе АПК.
2. Математическая модель на основе метода районирования для оценки устойчивости стратегий управления в условиях неопределенности.
3. Архитектура предиктивного модуля на базе математически-информированного машинного обучения с гибридной функцией потерь.
4. Алгоритмы программного обеспечения для автоматизации процесса выбора устойчивых стратегий управления парком техники.
5. Результаты экспериментальной проверки применимости метода, подтверждающие повышение операционной надежности и эффективности логистических процессов в АПК.

Апробация результатов. Основные положения и результаты исследования докладывались:

- на конференциях:

X Международная научно-практическая конференция, приуроченной к 95-летию основания ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, 04 декабря 2025 года.;

VII Всероссийская научно-практическая конференция, Москва, 24 апреля 2025 года.;

6 Международная научная конференция и 10 Всероссийский молодежный научный форум, Саратов, 23–26 сентября 2025 года.;

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.

- на заседаниях кафедры:

Кафедра управления транспортными комплексами Института отраслевого менеджмента ФГБОУ ВО ГУУ.

Результаты работы отмечены специальным призом II Конкурса для молодых учёных (Москва, 2025 год) в номинации «Искусственный интеллект и квантовые технологии», доложены в финале конкурса научно-исследовательских работ форума «Наука будущего - наука молодых» (Саратов, 2025 год) и подтверждены сертификатами участия в научно-практических конференциях, копии которых приведены в приложении В.

Реализация результатов работы. Значимость результатов диссертационного исследования определяется следующим:

Практическая значимость исследования подтверждается документами о внедрении его результатов, представленными в приложении Г. В транспортную компанию ООО «Координационный совет по логистике» внедрён разработанный научно-методический аппарат оперативного управления транспортно-логистической системой, объединяющий теоретико-игровой метод выбора стратегий в условиях неполной информации, предиктивные модели машинного обучения с экономически обусловленной функцией потерь и модуль интерпретации формируемых решений, что обеспечило переход от реактивной диспетчеризации к предиктивному управлению разнородным парком с количественной оценкой устойчивости принимаемых решений в периоды сезонной неравномерности перевозок. В ООО «КНОДЛЬ» результаты исследования использованы при разработке и внедрении систем искусственного интеллекта для предприятий реального сектора экономики на полном цикле создания прикладного решения, от постановки задачи до промышленной эксплуатации, включая функционально-ориентированную модель описания

разнородного парка, метод районирования пространства вероятностей состояний среды с метрикой устойчивости, архитектуру математически-информированного машинного обучения с гибридной функцией потерь, модуль объяснимого искусственного интеллекта и двухфазную стратегию развёртывания. В учебный процесс ФГБОУ ВО «Государственный университет управления» внедрены основные положения и методические разработки диссертации, использованные при преподавании дисциплин «Управление логистическими системами в условиях цифровой экономики» и «Информационные системы в логистике» по направлению подготовки 38.03.02 «Менеджмент».

Разработанные в диссертации методы, алгоритмы, подходы применены в рамках крупного научного проекта «Обеспечение продовольственной безопасности страны на основе создания программно-аппаратных комплексов и интеллектуальных платформенных цифровых решений в сфере развития агропромышленных технологий полного жизненного цикла» (№124052400025-5 государственного учета НИОКТР) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2024-542.

Публикации и патенты. Основные положения и результаты диссертационного исследования были опубликованы в 12 печатных работах, в том числе в 4 научных статьях в журналах, рецензируемых ВАК РФ по научной специальности 2.9.9 «Логистические транспортные системы»:

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 102 наименований и приложений. Общий объем работы составляет 185 страниц.

1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННОЙ ЛОГИСТИКИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРКА ТЕХНИКИ

1.1. Внутрихозяйственная логистика АПК как сложная динамическая система

Современное агропромышленное производство представляет собой многоуровневую организационно-техническую систему, эффективность которой определяется качеством управления материальными, информационными и финансовыми потоками. В контексте специальности 2.9.9 «Логистические транспортные системы» внутрихозяйственная логистика сельскохозяйственного предприятия рассматривается как микрологистическая система производственного типа, характеризующаяся высокой степенью неопределенности внешней среды и жесткой зависимостью от биологических циклов [1-3].

В формализованном виде внутрихозяйственная логистическая система может быть представлена как:

$$S = \langle R, P, F, U, E \rangle, \quad (1.1)$$

где: $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ - множество технических ресурсов (парк техники);

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ - множество логистических процессов;

F - множество материальных потоков;

U - множество управляющих воздействий, определяющих распределение ресурсов и режимы их функционирования;

E - множество стохастических факторов внешней и внутренней среды.

Представленная формализация обеспечивает переход от описательного анализа к строгой постановке задачи управления внутрихозяйственной логистикой как проблемы оптимального распределения ограниченных ресурсов в условиях неопределенности [4].

Объектом управления в данной системе выступает сквозной материальный поток, проходящий стадии снабжения (поставка семян, удобрений, ГСМ), основного производства (полевые работы) и сбыта (транспортировка урожая на

элеваторы или перерабатывающие мощности). Специфика аграрного производства накладывает на структуру материального потока ряд ограничений, отличающих его от промышленных аналогов:

1. **Сезонность и цикличность.** Генерирование материальных потоков носит дискретный характер, обусловленный агротехническими сроками. Пиковые нагрузки на транспортно-логистическую систему возникают в узкие временные окна (посевная, уборочная кампании), что требует формирования резервных мощностей парка техники [5].

2. **Пространственная рассредоточенность.** Производственные участки (поля) удалены от центров базирования техники и мест хранения продукции на значительные расстояния. Транспортная работа, выраженная в тонно-километрах, становится доминирующей составляющей в себестоимости конечной продукции.

3. **Динамическое изменение физико-механических свойств груза.** В процессе движения материальный поток трансформируется (семена превращаются в зеленую массу, затем в зерно), меняя требования к средствам механизации и условиям транспортировки.

С позиций теории производственной логистики, процесс возделывания сельскохозяйственных культур интерпретируется как операционный цикл (T_{op}), включающий технологические операции (T_{tech}), естественные процессы (T_{nat}), транспортные операции (T_{trans}) и межоперационные перерывы (T_{wait}). Формально длительность цикла описывается выражением:

$$T_{op} = \sum_{i=1}^n T_{tech_i} + T_{nat} + \sum_{j=1}^m T_{trans_j} + \sum_{k=1}^l T_{wait_k}, \quad (1.2)$$

где n, m, l - количество соответствующих операций.

Представленное выражение (1.2) определяет длительность производственного цикла как функционал от параметров системы и управляющих воздействий U . Задача управления внутрихозяйственной логистической системой может быть сформулирована как задача оптимизации:

$$\min_U T_{op}(U, \Xi), \quad (1.3)$$

где T_{op} зависит как от принимаемых управленческих решений U , так и от реализации стохастических факторов Ξ .

Поскольку время естественных процессов T_{nat} является слабо управляемой величиной, основной резерв повышения эффективности системы связан с минимизацией времени транспортных операций и межоперационных простоев [6]. В этой связи целевая функция может быть уточнена в виде:

$$\min_U E[T_{wait}], \quad (1.4)$$

что соответствует задаче минимизации простоев техники и рассинхронизации звеньев логистической цепи.

В отличие от промышленного конвейера, где T_{nat} стремится к нулю, в растениеводстве время естественных процессов (вегетация) является детерминированной величиной, не поддающейся сокращению логистическими методами. Следовательно, резервом повышения эффективности системы выступает минимизация транспортных издержек (T_{trans}) и времени ожидания (T_{wait}). Последнее возникает вследствие рассинхронизации работы звеньев логистической цепи: простоя комбайнов в ожидании выгрузки (дефицит транспортных средств) или простоя грузовиков в очереди на элеваторе (ограничение пропускной способности приемного пункта) [3, 7].

Внутрихозяйственная логистическая система АПК функционирует в условиях стохастической неопределенности, которая формализуется посредством введения случайных величин и процессов. Пусть $\xi(t) \in \Xi$ - вектор случайных факторов, включающий метеорологические условия, параметры агрофона и показатели технической надежности. Тогда отдельные параметры системы могут быть представлены в виде случайных величин:

$$Y \sim P_Y, \quad T_{tech} = T_{tech}(\xi), \quad T_{trans} = T_{trans}(\xi), \quad (1.5)$$

где: Y - урожайность;

T_{tech} и T_{trans} - длительности технологических и транспортных операций соответственно, зависящие от реализации случайных факторов.

Введение стохастической компоненты переводит задачу управления из класса детерминированных задач календарного планирования в класс задач принятия решений в условиях неопределенности [8, 9].

Структурно логистическая система агропредприятия декомпозируется на три функциональных контура, взаимодействие которых обеспечивается разнородным парком техники [10 -12]:

1. **Контур обеспечения ресурсов.** Включает доставку семенного материала, удобрений и средств защиты растений (СЗР) к агрегатам, работающим в поле. Критическим параметром здесь выступает синхронизация подвоза с темпом расхода материалов посевными комплексами и опрыскивателями. Нарушение ритмичности поставок приводит к простоем высокопроизводительных полевых агрегатов.

2. **Контур технологического обслуживания.** Охватывает процессы заправки техники топливом, технического обслуживания и ремонта в полевых условиях.

3. **Контур эвакуации продукции.** Наиболее сложный динамический процесс, связывающий работу уборочных агрегатов (источников потока) и транспортных средств (каналов потока).

В рамках рассматриваемой методологии управление данными контурами реализуется через взаимодействие трех классов технических средств, которые в дальнейшем будут обозначены как M1, M2 и M3:

– **M2** (Первичные активные ресурсы): самоходные технологические комплексы (уборочная техника), выступающие в качестве генераторов материального потока. В терминах теории массового обслуживания данный класс детерминирует интенсивность поступления заявок (λ). Фактическая производительность ресурсов M2 представляет собой стохастическую величину, функционально зависящую от урожайности и физико-механических характеристик агрофона.

– **M1** (Зависимые транспортные ресурсы): грузовой транспорт и бункеры-перегрузчики, обеспечивающие эвакуацию сельскохозяйственной

продукции. Указанные единицы техники функционируют как каналы обслуживания, пропускная способность которых (μ) требует строгой синхронизации с генераторами потока (M2). Управление ресурсами M1 формализуется через решение динамической задачи маршрутизации, целевой функцией которой выступает минимизация математического ожидания времени простоя первичных активных ресурсов под выгрузкой [13].

– **M3** (Вспомогательные и ресурсные средства): агрегатируемые машины и тягово-энергетические средства, задействованные в операциях обработки почвы, посева и внесения удобрений. В логистической модели они классифицируются как агенты обеспечения технологических условий производственного цикла. Распределение ресурсов M3 осуществляется либо по остаточному принципу (приоритет диспетчеризации отдается связке M2-M1), либо в условиях жесткой привязки к директивным агротехническим окнам.

С учетом введенной классификации парк техники представляется как объединение подмножеств:

$$R = R^{(M1)} \cup R^{(M2)} \cup R^{(M3)}, \quad (1.6)$$

где: $R^{(M1)}$ - множество транспортных средств;

$R^{(M2)}$ - множество самоходных технологических комплексов;

$R^{(M3)}$ - множество вспомогательных и ресурсных технических средств.

Каждый элемент множества ресурсов описывается вектором эксплуатационных характеристик:

$$v_i = (N_e, F_{кр}, B_p, V_b, G_T, \dots), \quad (1.7)$$

где параметры отражают мощностные, технологические и логистические свойства техники и в дальнейшем используются при формализации ограничений и целевой функции.

Для формализации задачи управления и последующего математического моделирования необходимо произвести декомпозицию производственного цикла на дискретные логистические процессы. Каждый процесс характеризуется спецификой материального потока, задействованными техническими средствами и набором стохастических ограничений. Систематизация данных

процессов, выполненная на основе анализа технологических карт возделывания сельскохозяйственных культур и принципов производственной логистики, представлена в Таблице 1.1. Данная таблица позволяет идентифицировать критические точки бифуркации материального потока, в которых возникают риски потери производительности системы, и определить требования к функционалу интеллектуальной системы управления [12, 14 - 18].

Таблица 1.1 - Структурно-функциональная характеристика логистических процессов во внутрихозяйственной системе АПК

Функциональная область логистики	Логистический процесс / Операция	Характеристика материального потока (МП)	Задействованные классы техники	Стохастические ограничения и факторы риска
Логистика снабжения	Подвоз посевного материала и удобрений	Дискретный входящий поток. Грузы: твердые (семена, гранулы) или жидкие (КАС). Требуется точной синхронизации с расходом.	М1 (Грузовой транспорт, загрузчики семян), М3 (Тракторы с разбрасывателями/сеялками)	Нарушение графика подвоза (простой посевных комплексов). Изменение норм внесения в зависимости от агрофона.
	Топливообеспечение	Распределенный поток ГСМ. Доставка «к борту» работающей техники.	М1 (Топливозаправщики), М2 , М3 (Потребители)	Динамическое изменение расхода топлива в зависимости от нагрузки на двигатель и рельефа. Риск «обсыхания» техники в поле.
Производственная логистика	Основная и предпосевная обработка почвы	Технологическое перемещение орудия. МП отсутствует в явном виде (изменение состояния среды), но расходуется ресурс техники.	М3 (ТЭС высоких тяговых классов + АМО: плуги, культиваторы)	Состояние почвы (влажность, твердость). Погодные окна. Техническая готовность парка [14].
	Посев и посадка	Трансформация запаса (семена) в биологический актив. Высокая скорость истощения бункеров.	М3 (Посевные комплексы)	Агротехнические сроки (жесткие временные рамки). Неравномерность выработки из-за конфигурации полей.
	Уход за посевами (Защита растений)	Внесение СЗР. Критичность к метеословиям (ветер, осадки, температура).	М3 (Самоходные опрыскиватели)	Узкие «погодные окна». Риск сноса препарата. Необходимость частой дозаправки рабочей жидкостью.
Логистика распределения	Уборка урожая (Генерация потока)	Преобразование биологической массы в грузопоток. Высокая интенсивность,	М2 (Зерноуборочные/кормоуборочные комбайны)	Влажность культуры. Полегание хлебов. Отказы техники.

		зависимость от урожайности.		Ограничение емкости бункера.
	Транспортировка «Поле - Ток»	Вывоз продукции от комбайнов. Задача динамической маршрутизации (VRP).	М1 (Зерновозы, бункеры-перегрузчики)	Удаленность полей (плечо подвоза). Состояние полевых дорог. Очереди на разгрузке.
	Первичная обработка и хранение	Входящий поток на элеватор/ток. Очистка, сушка, закладка на хранение.	Стационарное оборудование + М1	Пропускная способность весовых и сушильных комплексов. Дефицит складских емкостей.
Логистика возвратов	Управление пожнивными остатками	Уборка соломы, внесение органики. Подготовка к следующему циклу.	М3 (Тракторы с пресс-подборщиками)	Пожарная безопасность. Влажность биомассы.

Таблица 1.1 демонстрирует, что каждый этап производственного цикла характеризуется специфическим набором управляемых параметров и неуправляемых возмущений. Эффективность системы зависит от способности алгоритмов управления динамически перераспределять ресурсы (технику классов М1, М2, М3) между процессами в ответ на изменение стохастических факторов.

На основании проведенной декомпозиции процессов можно сформировать обобщенную структурно-логическую схему функционирования внутрихозяйственной логистической системы АПК. Схема, представленная на рисунке 1.1, иллюстрирует циклический характер преобразования материального потока и роль разнородного парка техники в обеспечении непрерывности производственного цикла.

Ключевой особенностью представленной модели является наличие двух контуров:

1. Материальный контур (сплошные линии): отражает физическое движение и трансформацию ресурсов (от семян и удобрений до готовой продукции) через последовательность технологических и транспортных операций [12, 19].

2. Информационный контур (пунктирные линии): обеспечивает передачу данных о состоянии системы (статус техники, погодные условия,

влажность культуры) в контур управления для принятия оперативных решений [19, 20].

На схеме выделены зоны ответственности различных классов техники (M1, M2, M3), что подчеркивает разнородную структуру парка и необходимость синхронизации их работы. Возмущающие воздействия внешней среды (погодные факторы) рассматриваются как стохастические входные параметры, требующие адаптивной реакции системы управления.

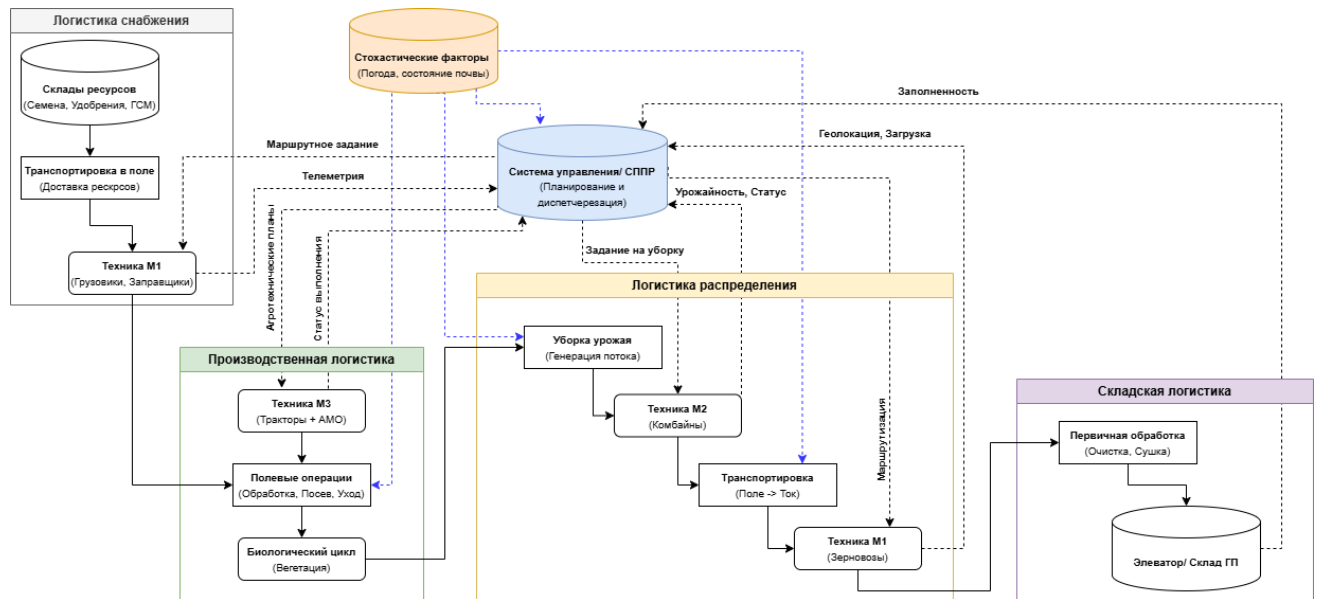


Рисунок 1.1 - Структурно-логическая схема цикла внутрихозяйственных логистических операций АПК

Фундаментальной задачей управления материальными потоками во внутрихозяйственной логистике АПК выступает разрешение системного противоречия между толкающими и тянущими принципами организации логистических процессов. В период посевной кампании функционирует толкающая макросистема: интенсивность логистических процессов детерминирована агротехническими сроками и метеорологическими прогнозами, при этом целевой функцией выступает максимизация обработанной площади в единицу времени. Материальные ресурсы директивно распределяются со складов на производственные участки. В период уборочной кампании логистическая архитектура трансформируется в комбинированную (тянуще-толкающую) систему. Биологическая зрелость культуры инициирует

генерацию входящего материального потока (толкающий принцип), тогда как жесткие ограничения пропускной способности приемных пунктов и элеваторов лимитируют интенсивность уборки, формируя потребность в синхронизации звеньев по тянущему принципу [20, 21].

Несоответствие пропускной способности звеньев цепи «Поле - Транспорт - Склад» приводит к возникновению системных противоречий. Наращивание производительности уборочного звена (класс M2) без пропорционального масштабирования транспортного звена (класс M1) обуславливает нелинейный рост времени ожидания T_{wait} для комбайнов. Избыточная концентрация транспортных средств при ограниченной мощности весовых и сушильных комплексов трансформирует мобильные запасы в непроизводительные простои транспортного парка.

Следовательно, внутрихозяйственная логистика АПК представляет собой сложную динамическую систему с обратной связью, в которой вектор состояния S_{t+1} в дискретный момент времени $t + 1$ является функцией управляющих воздействий U_t , и стохастических возмущений среды ξ_t . Традиционные алгоритмы диспетчеризации, базирующиеся на статическом закреплении техники и эвристических решениях оператора, не гарантируют достижение оптимума целевой функции в условиях высокой энтропии. Указанное обстоятельство строго обосновывает необходимость перехода к интеллектуальным парадигмам управления, интегрирующим математическое моделирование стохастических процессов и предиктивную аналитику эксплуатационных состояний парка техники [22].

1.2. Классификация и структурный анализ парка техники

Несмотря на традиционное разделение сельскохозяйственной техники по конструктивно-технологическим признакам, для задач управления внутрихозяйственными логистическими системами принципиальное значение имеет тип технического средства и его функциональная роль в формировании и обслуживании материальных потоков.

В рамках настоящего исследования используется двухуровневый подход к классификации:

- на первом уровне техника структурируется по типам (ТЭС, СТК, АМО, РБС);
- на втором уровне определяется функциональная роль в логистической системе, описываемая через классы М1, М2 и М3.

При этом один и тот же тип техники в зависимости от технологического контекста может выполнять различные функции в системе, что требует учета как конструктивных, так и функциональных характеристик при построении моделей управления.

Техническое оснащение современного агропромышленного предприятия представляет собой сложную систему, включающую сотни единиц машин и оборудования с различными кинематическими схемами, энергетическими характеристиками и функциональным назначением. В контексте управления транспортно-логистическими системами парк техники следует рассматривать не как совокупность инвентарных единиц, а как единый комплекс производственных ресурсов, обладающих определенной производительностью, надежностью и стоимостью эксплуатации. Эффективность функционирования внутрихозяйственной логистики, описанной в разделе 1.1, находится в прямой зависимости от сбалансированности состава данного парка и степени его готовности к выполнению технологических операций в условиях стохастического спроса [23-24].

Проблема управления парком техники в АПК осложняется высокой степенью его неоднородности. В едином производственном цикле одновременно задействуются мобильные энергетические средства, прицепные агрегаты, самоходные уборочные комплексы и грузовой транспорт [25]. Разнородность технических средств порождает вариативность эксплуатационных параметров (скорость движения, грузоподъемность, пропускная способность), что создает существенные трудности при решении задач маршрутизации и диспетчеризации. Традиционные нормативные справочники (в частности, Общероссийский

классификатор ОКПД 2 [26]) ориентированы преимущественно на задачи бухгалтерского учета и товароведения. Указанные номенклатуры не отражают функциональную роль технических средств в логистической цепи, что исключает возможность их применения при синтезе математических моделей оптимизации.

Для целей системного анализа и последующего построения математической модели управления предлагается функционально-ориентированная классификация, базирующаяся на принципах энергетической автономии и технологической специализации. Данный подход обеспечивает дифференциацию технических средств по их роли в преобразовании материального потока, классифицируя каждый объект как источник энергии, инструмент воздействия на предмет труда, интегрированный комплекс или автономный агент [27,28].

На основании предложенного критерия структура парка техники декомпозируется на четыре функциональные категории, каждая из которых обладает уникальным набором эксплуатационных характеристик и требует специфических алгоритмов управления:

1. **Тягово-энергетические средства (ТЭС):** Мобильные источники энергии (тракторы), обеспечивающие тяговое усилие и привод рабочих органов для пассивных агрегатов. В логистической модели они выступают как универсальный ресурс, распределяемый между различными операциями.

2. **Самоходные технологические комплексы (СТК):** Специализированные машины (комбайны), объединяющие функции энергетического средства, технологического модуля и первичного накопителя продукции. СТК являются генераторами материального потока в системе.

3. **Агрегатируемые машины и орудия (АМО):** Прицепные и навесные устройства, не имеющие собственной энергетической установки, но определяющие тип выполняемой технологической операции и качественные параметры обработки материального потока.

4. Роботизированные и беспилотные системы (РБС): Автономные технические средства, характеризующиеся отсутствием оператора на борту и способностью генерировать расширенный набор телематических данных для контура управления.

Представленная таксономия позволяет формализовать задачу управления парком как задачу распределения разнородных ресурсов с учетом ограничений совместимости (агрегатируемости) и взаимозаменяемости. Далее будет проведен детальный анализ эксплуатационных характеристик каждой выделенной группы.

1.2.1. Тягово-энергетические средства (ТЭС)

Тягово-энергетические средства (ТЭС) представляют собой класс мобильных технических устройств, функциональное назначение которых заключается в генерации механической энергии и ее трансформации в тяговое усилие для перемещения рабочих орудий, а также в передаче крутящего момента или гидравлической мощности активным рабочим органам агрегируемых машин. В структуре внутрихозяйственной логистической системы ТЭС выступают в роли универсальных энергетических модулей, формирующих в сцепке с агрегируемыми машинами и орудиями (АМО) машинно-тракторные агрегаты (МТА).

Для визуализации разнообразия парка ТЭС, используемого в современных агротехнологиях, на рисунке 1.2 приведены примеры характерных представителей различных эксплуатационных групп.



а)



б)



в)

Рисунок 1.2 - Типология тягово-энергетических средств по конструктивному исполнению и назначению

- а) ТЭС малого и среднего тягового класса (1.4–2.0 т.с.) для выполнения легких полевых и транспортных работ (МТЗ-82).
- б) Энергонасыщенное ТЭС высокого тягового класса (5.0–8.0 т.с.) для энергоемких операций почвообработки (Кировец К-7М).
- в) ТЭС на гусеничном ходу для работы на почвах с низкой несущей способностью (ДТ-75/Агромаш).

Системный анализ парка ТЭС предполагает их классификацию по ряду конструктивных и эксплуатационных признаков, определяющих границы применимости техники в различных логистических сценариях.

1. По типу движителя (ходовой части):

– Колесные ТЭС: наиболее распространенный тип, характеризующийся высокой транспортной мобильностью (скорость движения до 40–50 км/ч). Данное свойство позволяет оперативно перебазировать технику

между удаленными производственными участками (полями) по дорогам общего пользования, что критически важно для минимизации непроизводительных затрат времени (T_{trans}) в логистическом цикле. Однако применение колесных движителей сопряжено с повышенным удельным давлением на грунт (120–180 кПа) и зависимостью тягово-сцепных свойств от состояния опорной поверхности (риск буксования на переувлажненных почвах) [29].

– Гусеничные ТЭС: отличаются развитой опорной поверхностью, обеспечивающей низкое удельное давление на почву (40–50 кПа) и высокий тяговый коэффициент полезного действия (до 85–90% за счет снижения буксования). Использование гусеничных ТЭС целесообразно на ранних стадиях весенних полевых работ (закрытие влаги) и на энергоемких операциях основной обработки почвы. Ограничивающим фактором является низкая транспортная скорость и невозможность перемещения по асфальтированным дорогам без специальных накладок, что требует привлечения дополнительного транспорта (тралов) для их перебазировки.

2. По компоновочной схеме остова:

– Рамная (классическая) компоновка: Узлы и агрегаты монтируются на жесткой раме, передние колеса являются управляемыми, задние являются ведущими (или полный привод с колесами разного диаметра). Характерна для тракторов малого и среднего классов, используемых на пропашных работах, севе и внутрихозяйственных перевозках.

– Шарнирно-сочлененная компоновка: Остов состоит из двух полурам, соединенных шарнирным механизмом, обеспечивающим поворот за счет «излома» рамы. Данная схема применяется в энергонасыщенных тракторах (например, серии «Кировец», RSM), позволяя сочетать высокую массу и тяговое усилие с маневренностью. В логистических моделях такие машины рассматриваются как высокопроизводительные ресурсы для сплошной обработки больших массивов.

3. По тяговому классу:

Тяговый класс является фундаментальной характеристикой, определяющей номинальное тяговое усилие (F_{nom}), которое ТЭС способно развить на стерне средней плотности при нормальной влажности и допустимом буксовании. Согласно исследованиям Г.А. Иовлева [1], структура парка дифференцируется на следующие группы, определяющие совместимость с орудиями (АМО):

- **0,6–0,9 т.с.:** Малогабаритная техника для вспомогательных работ и садоводства.
- **1,4–2,0 т.с.:** Универсальные тракторы (массовый сегмент), используемые для сева, ухода за посевами, кормозаготовки и транспортных работ.
- **3,0–4,0 т.с.:** Тракторы общего назначения для пахоты, сплошной культивации и работы с широкозахватными посевными комплексами.
- **5,0–8,0 т.с. и выше:** Энергонасыщенные комплексы для глубокой обработки почвы и работы с комбинированными агрегатами.

Данная градация является базисом для решения задачи комплектования МТА: выбор ТЭС несоответствующего класса приводит либо к недостатку мощности (снижение скорости, перерасход топлива), либо к недогрузке двигателя (снижение экономической эффективности).

На рисунке 1.3 представлена схема классификации ТЭС.

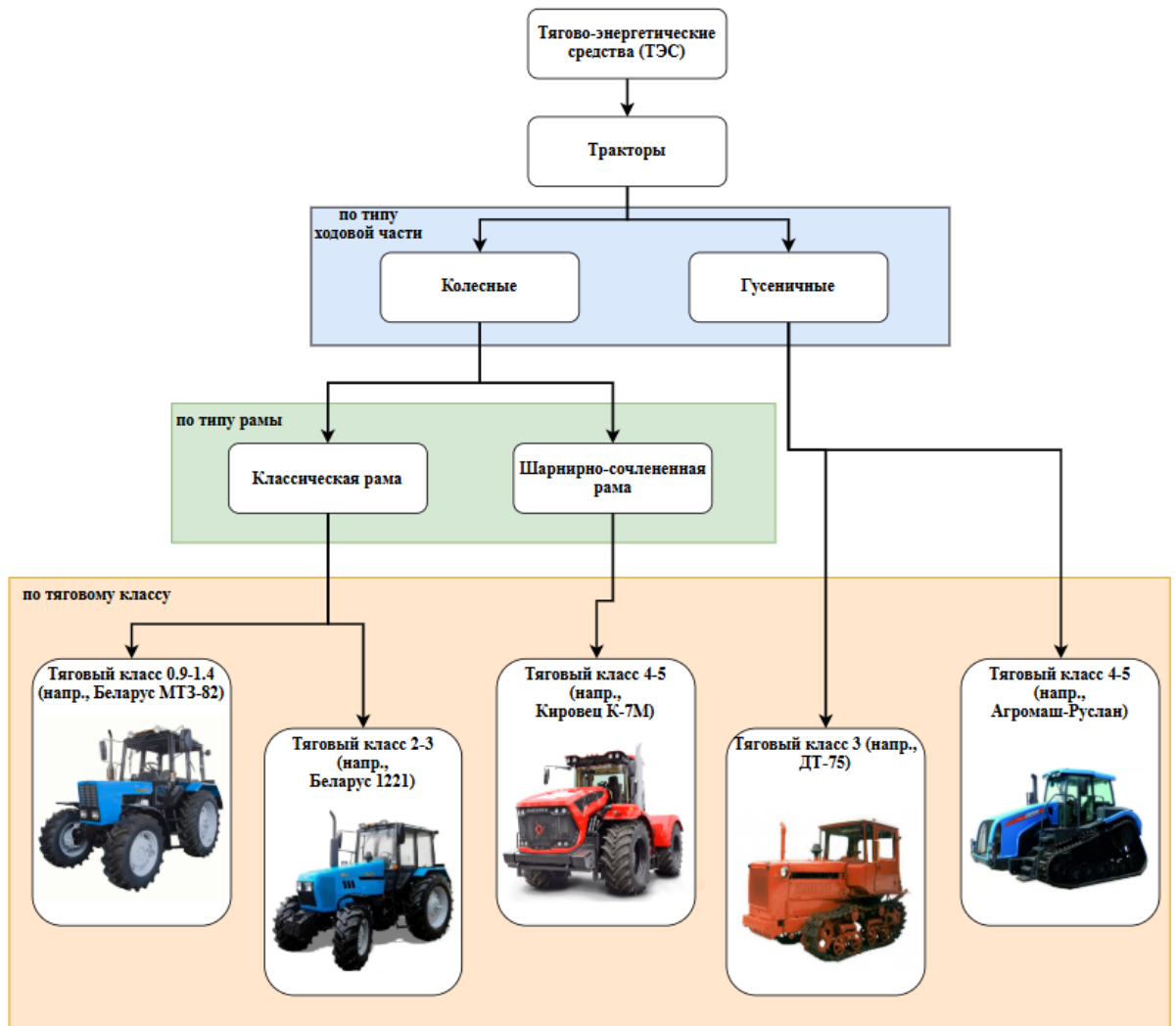


Рисунок 1.3 - Схема классификации ТЭС

Эффективность интеграции ТЭС в производственно-логистические цепочки определяется совокупностью технических параметров, которые в математических моделях управления выступают в качестве ограничений или переменных целевой функции.

1. Тягово-мощностные характеристики:

– Номинальное тяговое усилие (F_{kr}): Базовый параметр, определяющий способность ТЭС преодолевать тяговое сопротивление рабочих машин. Несоответствие F_{kr} сопротивлению агрегата ведет к работе двигателя в режиме перегрузки или, напротив, к недоиспользованию мощностного потенциала, что снижает общий КПД агрегата.

- Эксплуатационная мощность двигателя (N_e): Эффективная мощность дизельного двигателя (кВт), расходуемая на тягу, привод ВОМ, гидравлическую систему и преодоление сил сопротивления качению.

- Эксплуатационная масса (m_{op}): Масса полностью заправленного трактора с балластом. Отношение мощности к массе формирует показатель энерговооруженности, влияющий на динамику разгона и способность работать на повышенных скоростях (до 12–15 км/ч на основных операциях).

2. Топливо-экономические характеристики:

Данная группа параметров является критической для модуля оптимизации ресурсов в разрабатываемой системе СППР.

- Удельный эффективный расход топлива (g_e): Показатель совершенства рабочего процесса двигателя (г/кВт·ч).

- Часовой расход топлива (G_T): Фактическое потребление топлива в единицу времени (кг/ч). Данная величина является нелинейной функцией от загрузки двигателя и оборотов коленчатого вала, что требует применения методов машинного обучения для точного прогнозирования расхода в реальных условиях эксплуатации.

- Погектарный расход топлива (G_{ha}): Интегральный логистический показатель, характеризующий энергоемкость выполнения конкретной операции на единице площади. Как показано в исследованиях Г.А. Иовлева, использование ТЭС высоких тяговых классов на энергоемких операциях позволяет снизить G_{ha} за счет широкозахватности агрегатов и сокращения количества проходов.

3. Характеристики систем отбора мощности:

Возможность агрегатирования ТЭС со сложными посевными комплексами и уборочными машинами ограничивается параметрами вспомогательных систем:

- Вал отбора мощности (ВОМ): характеризуется частотой вращения и передаваемым крутящим моментом. Необходим для привода активных рабочих органов (фрезы, насосы опрыскивателей, высевающие аппараты).

– Гидравлическая система: определяется производительностью насоса (л/мин) и количеством гидровыходов. Современные посевные комплексы требуют высокого потока гидравлической жидкости для привода турбин пневмосистем, что делает невозможным их эксплуатацию со старыми моделями ТЭС, даже при достаточной тяговой мощности.

В парадигме «Цифрового сельского хозяйства» и проектируемой модели, Тягово-энергетические средства утрачивают функцию исключительно механических тягачей, трансформируясь в мобильные информационно-управляющие узлы.

1. Функция управления агрегатом:

Современные ТЭС выступают в роли «ведущего» элемента в архитектуре ISOBUS (стандарт ISO 11783). Бортовой компьютер трактора управляет режимами работы двигателя и трансмиссии, осуществляет контроль и регулирование параметров прицепного орудия (нормы высева, глубины обработки) через единый терминал. Это обеспечивает автоматизацию технологического процесса и минимизацию влияния человеческого фактора.

2. Функция генерации телематических данных:

ТЭС являются первичными источниками данных для Эксплуатационного ML-компонента системы. Поток данных формируется двумя основными каналами:

– Глобальное позиционирование (GNSS): Передача координат, вектора скорости и времени. Данные используются для решения задач маршрутизации (VRP), контроля обработки геозон и расчета фактической выработки.

– CAN-шина (Controller Area Network): Передача телеметрии от внутренних датчиков (обороты двигателя, температура охлаждающей жидкости, мгновенный расход топлива, коды ошибок DTC). Анализ временных рядов этих данных методами машинного обучения позволяет реализовать стратегию предиктивного обслуживания (PdM), выявляя аномалии в работе техники до наступления критического отказа.

Таким образом, ТЭС в структуре внутрихозяйственной логистики представляет собой сложный киберфизический объект. Его эффективное использование требует синхронизации механических параметров с агротехническими требованиями, а также непрерывного мониторинга цифрового двойника машины для предотвращения простоев и оптимизации эксплуатационных затрат.

Тягово-энергетические средства в зависимости от конфигурации агрегата и выполняемой операции могут относиться к различным функциональным классам. При использовании в составе транспортных звеньев они выполняют роль зависимых ресурсов (M1), обеспечивая перемещение материальных потоков. При работе в составе технологических агрегатов (с АМО) они формируют вспомогательный контур (M3), обеспечивая выполнение операций обработки почвы, внесения удобрений и иных подготовительных процессов [30].

1.2.2. Самоходные технологические комплексы (СТК)

В отличие от универсальных тягово-энергетических средств, рассмотренных ранее, самоходные технологические комплексы (СТК) представляют собой класс машин, конструктивно объединяющих энергетическую установку, ходовую часть и специализированное рабочее оборудование в единую кинематическую систему. Данная интеграция обусловлена необходимостью выполнения сложных многоэтапных технологических операций, требующих высокой энергоемкости и точной координации рабочих органов, что затруднительно реализовать в рамках классической схемы машинно-тракторного агрегата. В логистической модели СТК классифицируются как ресурс типа M2, выступая ключевыми генераторами материального потока (в случае уборочных машин) или инструментами высокоточной обработки (в случае самоходных опрыскивателей).

Визуализация основных типов СТК, применяемых в современном растениеводстве, представлена на рисунке 1.4.



а)



б)



в)

Рисунок 1.4 - Типология самоходных технологических комплексов

а) Зерноуборочный комбайн роторного типа - основной генератор грузопотока (RSM Torum 785).

б) Кормоуборочный комбайн для поточной заготовки зеленой массы (RSM F 2650).

в) Самоходный опрыскиватель для высокопроизводительной защиты растений (Туман-3).

Функциональная специализация СТК определяет их классификацию, которая базируется на назначении выполняемой операции и типе обрабатываемой культуры. Как показано на рисунке 1.5, доминирующую группу в данном классе составляют уборочные комплексы, которые, в свою очередь, дифференцируются по принципу действия молотильно-сепарирующих и измельчающих устройств.

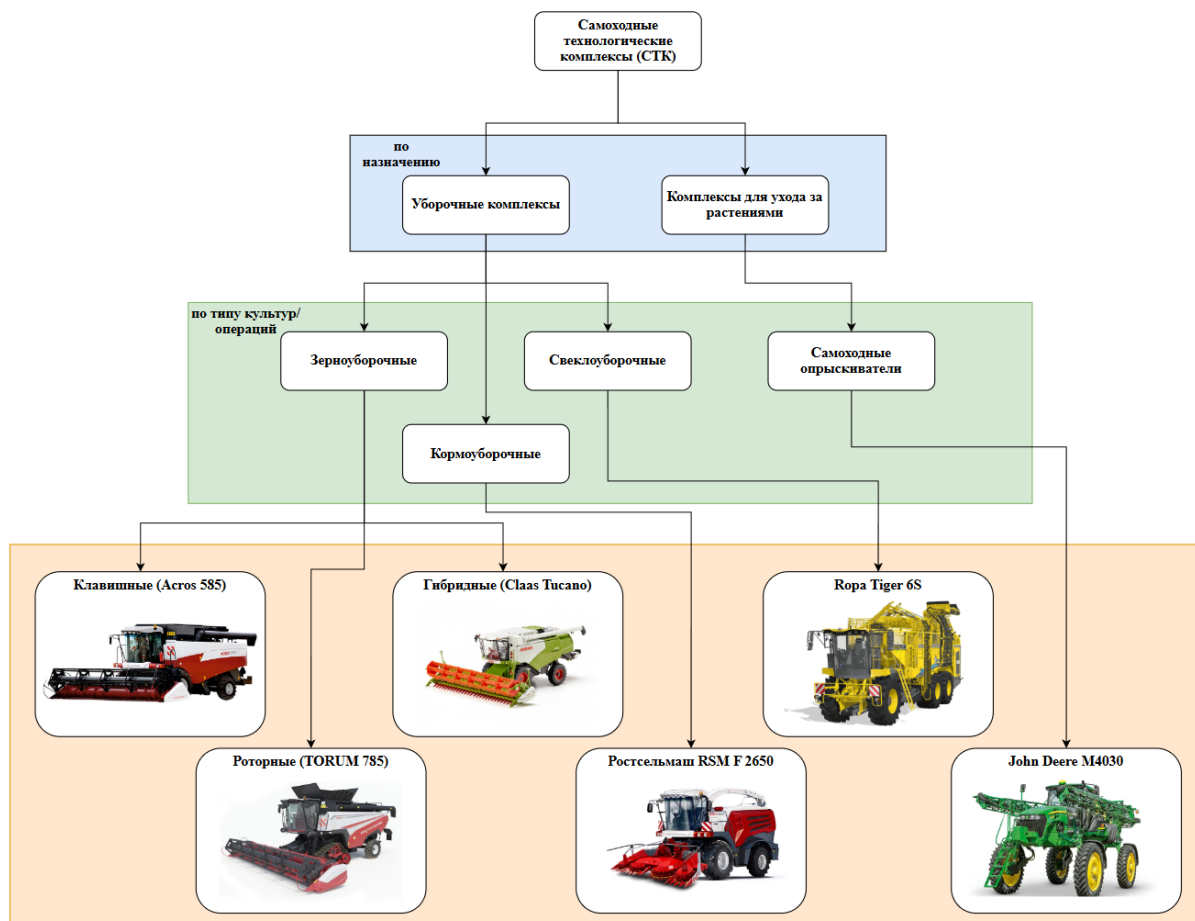


Рисунок 1.5 - Структурная классификация самоходных технологических комплексов (СТК)

Доминирующим фактором, формирующим параметры транспортно-логистической системы, выступает пропускная способность зерноуборочных комплексов. Их производительность, измеряемая пропускной способностью молотильно-сепарирующего устройства (кг/с), является фундаментальным параметром, определяющим интенсивность исходящего материального потока. В зависимости от архитектуры МСУ различают клавишные (для условий средней и высокой влажности, но с ограничением по производительности), роторные (для высокой урожайности и сухих условий) и гибридные машины. Выбор конкретного типа СТК при планировании операций определяет скорость уборки, требования к количеству и грузоподъемности транспортных средств (ТЭС класса М1), необходимых для бесперебойного вывоза продукции.

Фундаментальным эксплуатационным параметром СТК, отличающим их от тракторов, является наличие встроенного буфера-накопителя (бункера).

Емкость бункера (V_b) выступает демпфером, сглаживающим неравномерность подачи транспорта. В математических моделях управления процесс заполнения бункера описывается стохастической функцией, зависящей от урожайности на конкретном участке поля и ширины захвата жатки. Момент заполнения бункера является точкой бифуркации процесса: если к этому моменту транспортное средство не подано под загрузку, СТК вынужден остановить работу, что приводит к прямым экономическим потерям. Для кормоуборочных и свеклоуборочных комплексов, часто работающих по поточной технологии (без бункера или с бункером малого объема), требование к синхронизации с транспортом становится еще более жестким, так как любой разрыв в цепи «комбайн - грузовик» немедленно останавливает процесс уборки.

Помимо уборочной техники, к классу СТК относятся самоходные опрыскиватели и разбрасыватели удобрений. Их выделение в отдельную категорию обусловлено необходимостью работы на высоких скоростях (до 30–40 км/ч) с высоким клиренсом для обработки высокостебельных культур, что недостижимо для стандартных тракторов. В логистическом аспекте эти машины характеризуются обратным направлением потока (расход рабочей жидкости) и требуют организации подвоза воды и препаратов в поле, функционируя в цикличном режиме с дискретными интервалами технологической дозаправки.

В современной информационной экосистеме агропредприятия СТК трансформируются из исполнительных механизмов в мобильные лаборатории. Оснащение комбайнов системами картирования урожайности и датчиками влажности позволяет в реальном времени генерировать геопривязанные данные о продуктивности полей. Эти данные не только служат основой для взаиморасчетов и складского учета, но и формируют входящий поток для алгоритмов предиктивной аналитики, позволяя уточнять плановую потребность в транспорте на следующие периоды. Бортовые компьютеры СТК, интегрированные в сеть через телематические протоколы, передают в систему информацию о статусе наполнения бункера, скорости движения и расходе

топлива, что делает их центральными узлами в контуре оперативного управления уборочной кампанией.

Самоходные технологические комплексы в большинстве случаев выступают в роли первичных активных ресурсов (M2), так как именно они определяют интенсивность генерации или преобразования материального потока. В частности, зерноуборочные комбайны задают темп поступления продукции в транспортную систему, формируя требования к синхронизации работы зависимых ресурсов.

1.2.3. Агрегатируемые машины и орудия (АМО)

Наиболее многочисленный и номенклатурно разнообразный сегмент парка техники представлен классом агрегатируемых машин и орудий (АМО). Данные технические средства не обладают собственной энергетической установкой для передвижения и привода рабочих органов, выполняя технологические операции исключительно в составе машинно-тракторного агрегата (МТА) в сцепке с тягово-энергетическим средством. Если ТЭС в системе выступает источником мощности, то АМО является инструментом, непосредственно взаимодействующим с предметом труда (почвой, растениями) и определяющим качественные параметры выполнения агротехнической операции. Конструктивно АМО представляют собой несущую раму с установленными на ней рабочими органами, системами регулировки и сцепным устройством, тип которого (навесное, полунавесное или прицепное) определяет кинематику движения агрегата и требования к гидравлической системе трактора.

Для иллюстрации функционального разнообразия данного класса техники на рисунке 1.6 приведены характерные представители АМО, соответствующие основным этапам производственного цикла.



а)



б)



в)

Рисунок 1.6 - Типология агрегируемых машин и орудий по функциональному назначению

- а) Орудие для основной обработки почвы (потребляет только тяговую мощность) (LEMKEN).
- б) Посевной комплекс с бункером для семян и удобрений (требуется логистический подвоз) (Horsch).
- в) Агрегат для защиты растений (требуется подвоз воды и СЗР) (RSM TS-6200)

Систематизация данного класса техники базируется на технологическом цикле растениеводства. Как показано на рисунке 1.7, структура парка АМО декомпозируется на группы, соответствующие этапам подготовки среды, внесения ресурсов и ухода за посевами.

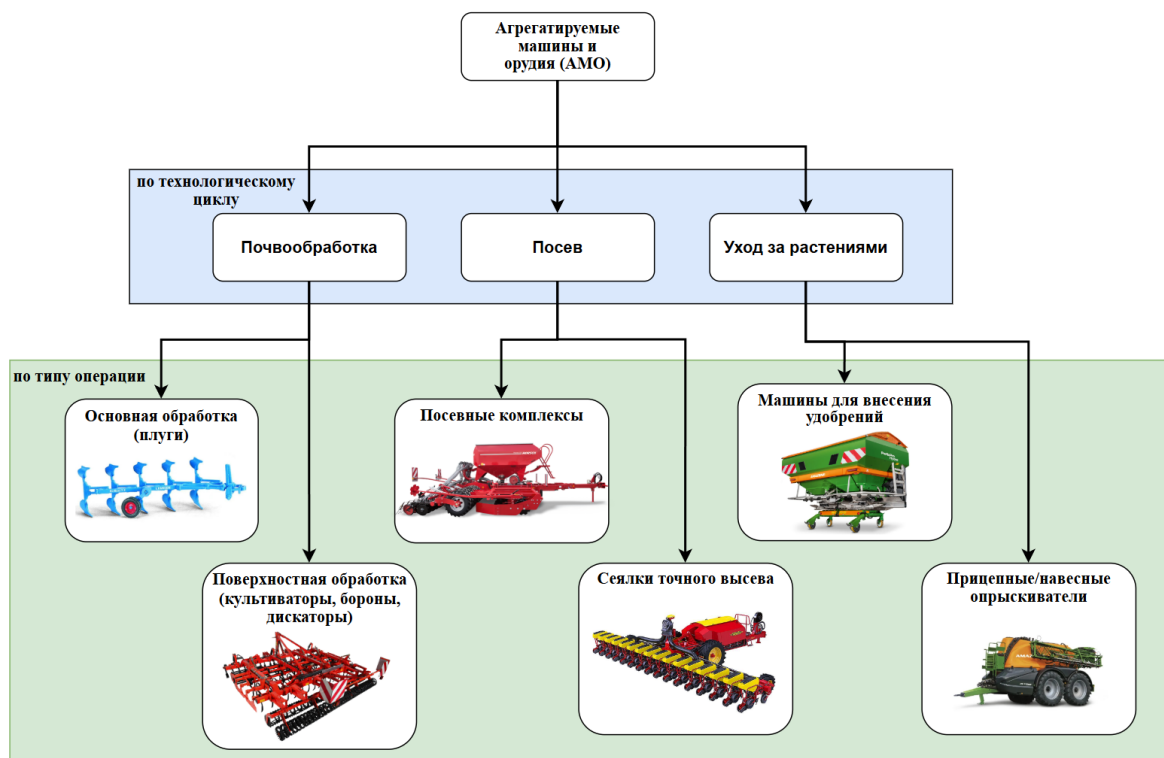


Рисунок 1.7 - Структурная классификация агрегатируемых машин и орудий (АМО)

Ключевой характеристикой АМО, влияющей на производительность логистической системы, является рабочая ширина захвата (B_p). Данный параметр находится в нелинейной зависимости от тягового сопротивления орудия (R_a) и тяговых возможностей ТЭС (F_{kr}). Оптимизация состава МТА сводится к подбору такой ширины захвата АМО, которая обеспечивает максимальную производительность при заданной агротехнической скорости и допустимом уровне буксования трактора. Ошибки в подборе АМО (например, агрегатирование широкозахватного посевного комплекса с ТЭС недостаточного тягового класса) приводят к снижению скорости движения, нарушению сроков посева и перерасходу топлива, что дестабилизирует работу всей логистической цепи.

В контексте управления материальными потоками АМО дифференцируются на две функциональные группы:

– Первая группа - почвообрабатывающие орудия (плуги, культиваторы, дискаторы), которые не несут на борту запаса технологического

материала. Их влияние на логистику ограничивается потреблением топлива ТЭС и временными затратами на развороты и переезды.

– Вторая группа - машины для посева и внесения удобрений (сеялки, разбрасыватели, опрыскиватели) оснащенные бункерами или резервуарами емкостью V_{hop} . Данные АМО выступают активными потребителями материального потока в контуре снабжения.

Наличие емкости для технологического материала вводит в задачу управления критический параметр - дискретность дозаправки. Время работы агрегата между заправками (T_{cycle}) определяется соотношением емкости бункера и нормы внесения материала (кг/га или л/га). Истощение запаса в бункере требует остановки агрегата и синхронизации с транспортным средством подвоза (ТЭС класса М1). Таким образом, характеристики АМО (емкость, норма высева) напрямую диктуют требования к интенсивности логистики снабжения: чем выше производительность посевного комплекса, тем жестче требования к ритмичности подвоза семян и удобрений для минимизации простоев.

Современный этап развития агротехники характеризуется интеллектуализацией АМО. Внедрение стандарта ISOBUS превращает прицепное орудие из пассивного механизма в источник данных. Интеллектуальные посевные комплексы и опрыскиватели способны не только передавать в СППР информацию о фактической норме внесения и обработанной площади, но и реализовывать технологии дифференцированного внесения (VRA - Variable Rate Application) по картам-заданиям. В этом случае АМО становится активным элементом цифрового контура, модулируя расход материальных ресурсов в зависимости от неоднородности поля и предоставляя обратную связь для корректировки планов снабжения в режиме реального времени.

Агрегатируемые машины и орудия не функционируют автономно и входят в состав технологических агрегатов совместно с ТЭС. В логистической системе они относятся к вспомогательным ресурсам (М3), так как их использование направлено на обеспечение выполнения технологических операций, не

связанных напрямую с транспортировкой материальных потоков, но оказывающих существенное влияние на условия их формирования.

1.2.4. Роботизированные и беспилотные системы (РБС)

Отдельную, динамично развивающуюся категорию технических средств в структуре парка составляют роботизированные и беспилотные системы (РБС). Это класс высокоавтономных аппаратно-программных комплексов, оснащенных развитой сенсорной периферией (лидары, мультиспектральные камеры, инерциальные навигационные системы) и предназначенных для выполнения специфических операций с минимальным участием или полным отсутствием человека-оператора. В отличие от традиционных ТЭС и СТК, где основной функцией является генерация тягового усилия или поточная обработка биомассы, функционал РБС смещен в сторону сбора данных (мониторинг) и высокоточного локального воздействия [31].

В текущей конфигурации транспортно-логистических систем АПК данный класс техники рассматривается как опциональный элемент. Это обусловлено отсутствием сформированной нормативно-правовой базы, регламентирующей эксплуатацию автономных машин на дорогах общего пользования и использование воздушного пространства (для БПЛА), а также высокой стоимостью внедрения. Тем не менее, интеграция РБС в контур управления позволяет существенно снизить стохастическую неопределенность производственных процессов.

Типология РБС, применяемых или проходящих апробацию в сельском хозяйстве, представлена на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 - Типология роботизированных и беспилотных систем
 а) Аэрофотосъемочный комплекс для оценки состояния посевов (NDVI) (Геоскан GEMINI).
 б) Тяжелый дрон для ультрамалообъемного внесения СЗР (DJI Agras).
 в) Автономная наземная платформа для механической прополки или скаутинга (Cognitive Pilot).

Классификация РБС осуществляется по критерию среды базирования и функциональному назначению. Структурная схема, отражающая данную иерархию, приведена на рисунке 1.9.

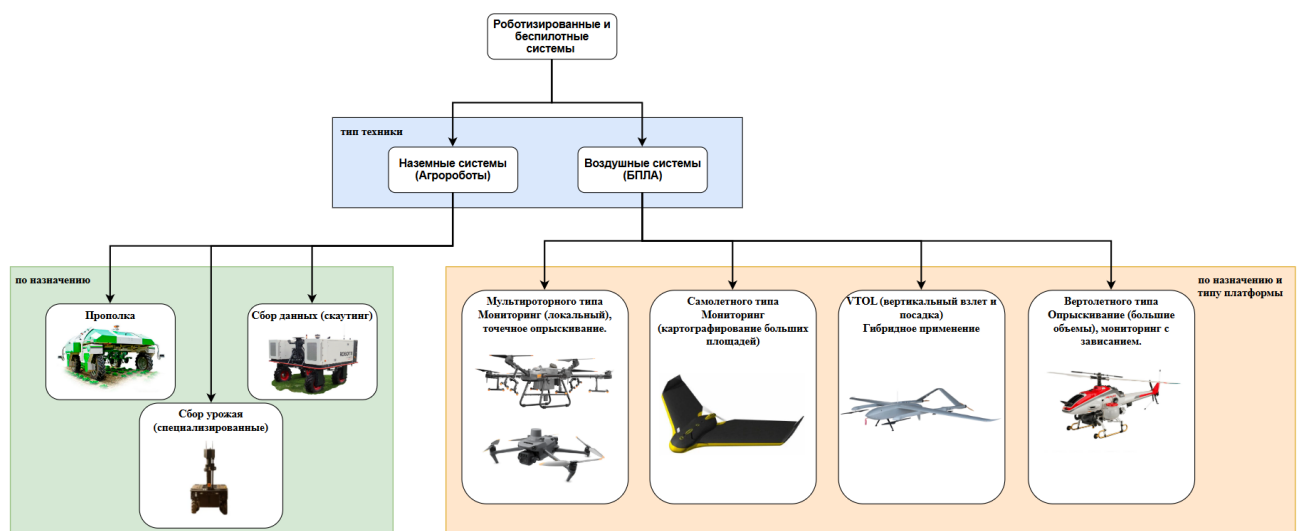


Рисунок 1.9 - Структурная классификация роботизированных и беспилотных систем (РБС)

Воздушные беспилотные авиационные системы (БАС) представляют собой наиболее технологически зрелый сегмент РБС. Их превалирующей логистической функцией выступает информационное обеспечение. Посредством мультиспектральной съемки БАС генерируют карты вегетационных индексов (NDVI), служащие входными данными для формирования карт-заданий дифференцированного внесения удобрений техникой класса МЗ. Эксплуатация дронов-опрыскивателей лимитируется их малой грузоподъемностью (до 30–50 л.) и ограниченным временем автономного полета. Указанные факторы детерминируют необходимость применения алгоритмов децентрализованной координации множественных агентов (роевого интеллекта) и высокой частоты логистических циклов обслуживания (замены элементов питания и пополнения баков), что определяет целесообразность их использования исключительно при локальной обработке очагов поражения или на участках со сложным рельефом, недоступных для наземных агрегатов.

Наземные робототехнические комплексы (НРТК) классифицируются как автономные платформы для выполнения операций механической прополки, точечного опрыскивания и фенотипирования (скаутинга). С позиций логистики интеграция НРТК трансформирует структуру парка: эксплуатация единичного энергонасыщенного тягового средства (ТЭС) с широкозахватным орудием замещается функционированием группы малогабаритных автономных модулей. Данный подход минимизирует уплотнение почвы, однако существенно усложняет алгоритмы диспетчеризации и технического обслуживания.

В проектируемой системе РБС выполняют функцию генераторов верифицированных пространственных данных. В отличие от традиционной техники, транслирующей телеметрию собственного состояния (расход топлива, скорость), автономные комплексы поставляют объективную метрику состояния среды (всхожесть, засоренность, влажность). Указанное информационное обогащение обеспечивает базис для перехода логистического управления от реактивной парадигмы к предиктивной. Вместе с тем, ввиду текущего дефицита

нормативно-правовой базы, регламентирующей эксплуатацию высокоавтономных машин на дорогах общего пользования, а также недостаточной технической стандартизации протоколов обмена данными, РБС на данном этапе исследования не включаются в прямой контур автоматизированного управления материальными потоками.

Следовательно, математическая модель управления синтезируется с учетом условия инвариантности к наличию или отсутствию потока данных от РБС. Архитектура системы предусматривает функционирование в двух режимах:

- **Расширенный режим:** при интеграции РБС применяются высокоточные цифровые карты полей для оптимизации маршрутов и норм внесения.

- **Базовый режим:** при отсутствии РБС расчеты опираются на нормативно-статистические базы данных и формализованные экспертные оценки агрономической службы.

Таким образом, роботизированные и беспилотные системы позиционируются как перспективный инструмент минимизации информационной энтропии, но не выступают лимитирующим узлом, блокирующим работоспособность логистической системы. В контексте разрабатываемой модели РБС преимущественно относятся к вспомогательному классу (МЗ), обеспечивая информационную поддержку и повышая адаптивность контура управления к стохастическим флуктуациям внешней среды.

Резюмируя вышеизложенное, предложенная классификация парка техники базируется на синтезе двух взаимодополняющих подходов: конструктивно-технологического (ТЭС, СТК, АМО, РБС) и функционально-логистического (М1, М2, М3). Первый подход обеспечивает учет физико-механических характеристик и эксплуатационных ограничений, тогда как второй формализует роль технического средства в процессах генерации и обслуживания материальных потоков. Совместное применение указанных классификаторов формирует строгий аналитический фундамент для построения математических

моделей распределения ресурсов и оценки эффективности их взаимодействия во внутрихозяйственной логистической системе, что выступает необходимым условием синтеза алгоритмов оптимального управления.

1.3. Формализация параметров состояния технического парка и синтез матрицы технологической допустимости

Функционирование разнородного парка техники в условиях вариативности логистических процессов обуславливает необходимость строгой количественной оценки технологической допустимости и эффективности задействования конкретных технических средств. Традиционные подходы, базирующиеся на нормативных или эвристических оценках, не обеспечивают требуемого уровня формализации, что исключает их применение в алгоритмах оптимального распределения ресурсов [32].

В этой связи возникает необходимость разработки формализованного инструмента, позволяющего количественно оценивать соответствие характеристик техники требованиям логистических процессов [33].

Системный анализ внутрихозяйственной логистики (глава 1.1) и структурная декомпозиция парка техники (глава 1.2) позволяют перейти к этапу синтеза единого информационного пространства управления. Для реализации алгоритмов оптимизации и обучения нейросетевых моделей необходимо трансформировать физические характеристики разнородных технических средств (ТЭС, СТК, АМО, РБС) в унифицированный набор цифровых параметров, а именно в вектор состояния системы.

Управление парком техники в условиях стохастичности требует отказа от статических нормативов выработки в пользу динамических эксплуатационных моделей. Каждая i -я единица техники формализуется в виде динамического вектора состояния $v(t)_i$, компоненты которого детерминируют ее способность выполнить заданную логистическую операцию в момент времени t .

Дополнительно следует отметить, что представление технического ресурса в виде вектора состояния позволяет перейти от статической инвентарной модели к динамической модели доступной производственной мощности. В этом случае

каждый ресурс характеризуется не только набором параметров, но и текущей способностью участвовать в выполнении логистических операций, что является принципиально важным для задач оперативного управления [34, 35].

Предлагаемая методология формализации базируется на разделении параметров на три группы:

1. **Конструктивные инварианты:** неизменные характеристики, определенные заводом-изготовителем (тяговый класс, номинальная мощность двигателя, емкость бункера, ширина захвата). Эти данные формируют базис для проверки физической совместимости агрегатов (например, соответствие мощности ТЭС и энергоемкости АМО).

2. **Эксплуатационные переменные:** параметры, изменяющиеся в процессе работы и зависящие от внешних условий (текущая наработка, коэффициент технической готовности, остаточный ресурс узлов). Именно здесь интегрируются данные систем предиктивного обслуживания (PdM), позволяющие корректировать плановую производительность с учетом износа [36, 37].

3. **Ситуационные параметры:** характеристики, зависящие от текущего состояния среды (проходимость движителя в зависимости от влажности почвы, снижение тягового КПД на склонах).

Выделение указанных групп параметров обеспечивает возможность комплексной оценки состояния технического ресурса с учетом как его конструктивных ограничений, так и текущих эксплуатационных и внешних условий. Это, в свою очередь, создает основу для количественной оценки пригодности ресурса к выполнению конкретных логистических операций.

Центральным элементом предлагаемой методологии является Матрица технологической допустимости. Формально матрица технологической допустимости может быть представлена в виде $K = \{K_{ij}\}$, где элемент K_{ij} отражает степень эффективности использования ресурса M_i при выполнении логистической операции j . Значения коэффициента нормируются в диапазоне $[0,1]$, где нулевое значение соответствует невозможности или

нецелесообразности использования ресурса, а значение, близкое к единице, - его наибольшей эффективности в заданных условиях.

Данная матрица представляет собой n -мерную структуру, связывающую множество доступных технических ресурсов (строки) с множеством логистических операций (столбцы). На пересечении векторов формируется значение, характеризующее не просто возможность выполнения операции (бинарная логика «да/нет»), а коэффициент эффективности использования конкретной единицы техники для данной задачи (K_{eff}).

Значение коэффициента определяется на основе совокупности параметров ресурса, характеристик логистической операции и текущих условий функционирования системы. При этом учитываются:

- соответствие технических характеристик требованиям операции;
- производительность и пропускная способность;
- влияние ресурса на синхронизацию смежных процессов;
- устойчивость функционирования в условиях стохастических воздействий.

Формирование матрицы базируется на принципе энергетического и технологического соответствия. Например, для операции «Основная обработка почвы» (энергоемкий процесс) допустимыми являются ТЭС тяговых классов 5.0–8.0. Использование ТЭС класса 1.4 для этой задачи является технологически недопустимым (значение в матрице = 0), а использование ТЭС класса 3.0 может быть допустимым, но с понижающим коэффициентом эффективности из-за низкой скорости обработки.

Специфическим элементом в рассматриваемой методологии выступают агрегатируемые машины (АМО). В отличие от самоходных технологических комплексов (СТК), их изолированное описание нецелесообразно. Для их формализации вводится понятие виртуальной сцепки, представляющей собой временный объект управления, формируемый на базе ТЭС и АМО. Эксплуатационные характеристики виртуальной сцепки (производительность,

расход топлива) вычисляются как нелинейная функция от параметров тягача и агрегатируемого орудия.

Интеграция всех классов техники (ТЭС, СТК, АМО, РБС) в единую систему координат обеспечивает переход от разрозненного управления инвентарными единицами к управлению совокупными производственными мощностями. В указанной парадигме отказ энергонасыщенного трактора (ТЭС 8-го тягового класса) интерпретируется системой не как отказ отдельной машины, а как потеря заданного процента суточной производительности на конкретном фронте работ. Данное событие инициирует автоматический перерасчет матрицы и перераспределение ресурсов (например, эквивалентную замену на два трактора 5-го тягового класса).

При формировании матрицы технологической допустимости K_{ij} дополнительно учитывается функциональная роль ресурса в логистической системе. Влияние функционального класса на целевые критерии оптимизации и интерпретацию отказов систематизировано в Таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Влияние функциональной роли ресурса на параметры матрицы технологической допустимости

Класс ресурса	Целевой критерий в матрице K_{ij}	Логистическая интерпретация отказа (потери мощности)
М2 (Первичные активные)	Обеспечение устойчивой и максимальной интенсивности генерации материального потока.	Снижение общего объема выработки, риск срыва директивных агротехнических сроков.
М1 (Зависимые транспортные)	Минимизация времени ожидания и обеспечение синхронизации с активными ресурсами (М2).	Возникновение «узкого горлышка», блокировка работы генераторов потока (комбайнов).
М3 (Вспомогательные)	Выполнение операций строго в рамках заданных технологических и временных ограничений.	Нарушение технологического цикла подготовки среды (например, задержка внесения удобрений).

Учет функциональной роли детерминирует корректную интерпретацию значений коэффициентов K_{ij} и обосновывает их применение в задачах оптимального распределения ресурсов.

Формирование матрицы технологической допустимости реализует переход от качественного описания взаимодействия технических средств к строгой количественной оценке эффективности их эксплуатации. На базе полученной матрицы генерируются допустимые варианты распределения ресурсов, а также формируется математическая основа для конструирования целевых функций в задачах оптимизации и последующего обучения нейросетевых моделей [38].

Полная структурная схема параметров, связывающая классы техники, их эксплуатационные характеристики и логистические операции в единую матрицу, вынесена в Приложение А. Представленная схема выступает концептуальной основой для конструирования признакового пространства при разработке предиктивного модуля в Главе 3.

1.4. Проблематика управления разнородным парком технических средств в условиях стохастической неопределенности

Функционирование внутрихозяйственных транспортно-логистических систем АПК происходит в условиях жесткого антагонизма между необходимостью соблюдения строгих агротехнических сроков и высокой степенью неопределенности факторов, влияющих на выполнение операций. Проведенный в предыдущих подразделах анализ выявил, что ключевым источником энтропии в системе управления является структурная и эксплуатационная неоднородность парка техники, усугубляемая стохастическим характером внешней среды и ограниченностью применяемых математических методов.

Введенная в подразделе 1.3 матрица технологической допустимости K_{ij} , формализующая соответствие ресурсов логистическим операциям, в условиях стохастической неопределенности перестает быть статической характеристикой и должна рассматриваться как динамическая функция состояния системы. Это означает, что значения коэффициентов эффективности подвержены изменениям во времени под воздействием как деградации технического состояния ресурсов, так и вариативности внешней среды.

1.4.1. Влияние структурной разнородности и модификации парка на точность планирования

Современные агропромышленные предприятия эксплуатируют парк технических средств, представляющий собой конгломерат машин различных технологических укладов и поколений. В едином производственном цикле могут быть задействованы как высокоавтоматизированные комплексы (СТК с системами телеметрии и автопилотирования), так и физически изношенные тягово-энергетические средства (ТЭС) предыдущих поколений. Подобная технологическая многовариантность порождает проблему несопоставимости данных: для части парка доступны потоковые данные о состоянии в реальном времени, тогда как для другой части информация поступает с задержкой или носит дискретный характер.

Ситуация осложняется распространенной практикой модификации техники в процессе эксплуатации. Изменения конструкции, такие как модификация двигателей для повышения мощности, установка систем сдвоенных колес для снижения давления на почву или модернизация гидравлических систем для работы с современными посевными комплексами, приводят к существенному отклонению фактических эксплуатационных характеристик от паспортных значений. Вектор состояния системы V_i , формализованный в главе 1.3, для модифицированной или изношенной техники становится динамически изменяющейся величиной, значение которой невозможно зафиксировать в статических справочниках или нормативах.

Применение усредненных нормативных показателей выработки и расхода топлива к такому разнородному парку ведет к систематическим ошибкам планирования. Назначение на энергоемкую операцию ТЭС с номинально подходящим тяговым классом, но деградировавшими в процессе эксплуатации тяговыми характеристиками, вызывает срыв графика работ. Напротив, использование избыточно мощного ТЭС для транспортных операций из-за отсутствия точных данных о доступности более легкой техники снижает экономическую эффективность логистической системы [39]. Таким образом,

возникает задача идентификации реального эксплуатационного профиля каждой единицы техники, неразрешимая методами традиционного нормативного учета. При этом указанные отклонения непосредственно влияют на значения коэффициентов матрицы технологической допустимости, так как фактическая производительность и энергетические характеристики ресурса определяют его реальную пригодность к выполнению операций. В условиях отсутствия актуальных данных матрица K_{ij} формируется на основе искаженных параметров, что приводит к принятию неэффективных управленческих решений.

1.4.2. Стохастическая природа возмущающих воздействий

Задача оперативного управления парком техники в АПК не может быть сведена к детерминированной задаче составления расписания ввиду воздействия двух групп стохастических факторов, вносящих неопределенность в параметры логистических процессов.

Первая группа включает факторы внутренней стохастичности, связанные с технической надежностью парка. Вероятность безотказной работы $P(t)$ для каждой единицы техники является случайной величиной, зависящей от текущей наработки, истории обслуживания и условий эксплуатации. В условиях сезонных пиковых нагрузок интенсивность отказов возрастает нелинейно. Внезапный выход из строя ключевой единицы (например, единственного в звене энергонасыщенного трактора или высокопроизводительного комбайна) переводит систему в критическое состояние, требующее немедленной динамической перестройки всей логистической схемы и перераспределения заданий, что невозможно осуществить в рамках жестких суточных планов.

Вторая группа объединяет факторы внешней стохастичности, обусловленные состоянием среды. Агроклиматические условия (осадки, температура, влажность почвы и воздуха) выступают в роли активного агента, формирующего жесткие ограничения на выполнение технологических операций. «Погодные окна» имеют вероятностный характер, делая невозможным точное долгосрочное планирование. Кроме того, физико-механические свойства почвы (несущая способность, сопротивление резанию) изменяются динамически в

зависимости от влажности. Это приводит к вариативности тягового КПД мобильных средств и скорости выполнения операций. Игнорирование данных факторов при расчете плановой производительности приводит к существенным расхождениям между планом и фактом, дестабилизируя работу смежных звеньев логистической цепи.

Систематизация возмущающих воздействий с указанием их влияния на параметры логистической системы представлена в Таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Классификация стохастических факторов, воздействующих на внутрихозяйственную транспортно-логистическую систему

Группа факторов	Источник возмущения	Стохастические параметры (переменные)	Влияние на логистический процесс
Внутренняя стохастичность	Техническое состояние парка (ТЭС, СТК, М1)	- Вероятность отказа $P(t)$ - Время восстановления T_{rep} - Текущая производительность (снижение мощности)	- Разрыв логистической цепи (простой смежных звеньев) - Необходимость ввода резерва - Срыв директивных сроков операции
Внешняя стохастичность (Климатическая)	Метеорологические условия	- Интенсивность и продолжительность осадков - Скорость ветра (для опрыскивания) - Температура воздуха	- Закрытие/открытие «агротехнического окна» - Полная остановка работ - Изменение требований к технологии (например, нормы высева)
Внешняя стохастичность (Агротехнологическая)	Состояние агрофона (Почвы)	- Влажность почвы - Твердость / Несущая способность - Рельеф и микрорельеф	- Вариативность рабочей скорости V_{op} - Изменение коэффициента буксования и расхода топлива - Невозможность проезда колесной техники (М1)

Представленная классификация демонстрирует, что управление транспортно-логистической системой АПК происходит в условиях, где детерминированные параметры постоянно корректируются стохастическими переменными. Это обосновывает необходимость применения методов, способных работать с вероятностными распределениями данных величин, что будет рассмотрено в Главе 2.

1.4.3. Ограниченность детерминированных методов в задачах адаптивного управления

Существующие подходы к управлению транспортно-логистическими системами в АПК базируются преимущественно на детерминированных математических моделях (линейное программирование, классические алгоритмы маршрутизации, эвристические методы). Данные методы исходят из допущения о том, что параметры системы (время выполнения операции, доступность техники, скорость движения, расход ресурсов) известны с высокой точностью и неизменны на горизонте планирования.

В условиях реальной эксплуатации, характеризующейся описанной выше разнородностью и стохастичностью, применение детерминированных методов демонстрирует низкую эффективность. Детерминированные планы утрачивают адекватность при возникновении первичных возмущений внешней или внутренней среды, требуя полной ручной перепланировки диспетчером. Кроме того, детерминированные модели генерируют решения, оптимальные для идеализированных условий, однако данные решения обладают низкой устойчивостью при малейших отклонениях параметров. Оптимизация по средним значениям без учета дисперсии и рисков вызывает перегрузку одних элементов системы и простой других, снижая общую производительность парка [41].

В указанных условиях задача управления разнородным парком техники может быть сформулирована как задача адаптивного выбора управленческих решений в стохастической среде, при которой необходимо учитывать ожидаемые значения параметров и риски их отклонения. Это требует перехода от детерминированных моделей к вероятностным и обучаемым подходам, способным динамически корректировать параметры системы на основе поступающих данных [42-44].

Таким образом, возникает необходимость разработки методов управления, основанных на интеграции стохастических моделей и алгоритмов машинного

обучения, что и определяет направление дальнейшего исследования, представленного в последующих главах.

1.5. Выводы по главе 1

Проведенный в первой главе системный анализ состояния и особенностей функционирования транспортно-логистических систем агропромышленного комплекса позволяет сформулировать следующие обобщающие выводы, определяющие вектор дальнейшего диссертационного исследования:

1. Идентификация объекта управления. Внутрихозяйственная логистика АПК определена как сложная динамическая система с обратной связью, функционирующая в условиях жестких агротехнических ограничений и высокой стохастичности внешней среды. Доказано, что эффективность системы зависит от синхронизации трех функциональных контуров: обеспечения ресурсов, технологического обслуживания и эвакуации продукции. Нарушение ритмичности в любом из контуров приводит к нелинейному росту издержек и потере качества продукции.

2. Структуризация технического базиса. Разработана функционально-ориентированная классификация парка техники, разделяющая средства механизации на тягово-энергетические средства (ТЭС), самоходные технологические комплексы (СТК), агрегируемые машины (АМО) и роботизированные системы (РБС). Данная таксономия, в отличие от инвентарного подхода, позволяет формализовать парк как совокупность разнородных производственных ресурсов с уникальными векторами эксплуатационных характеристик, что обеспечивает возможность их включения в формализованные модели распределения ресурсов и последующего алгоритмического управления.

3. Формализация параметров состояния. Обоснована необходимость перехода от использования усредненных нормативных показателей к динамическому вектору состояния для каждой единицы техники. Предложена концепция «Матрицы технологической допустимости», связывающей физические возможности конкретной машины (с учетом ее износа и

модификаций) с требованиями логистической операции. Это создает базис для применения методов машинного обучения при идентификации фактических возможностей парка.

4. Ограниченность детерминированных методов. Установлено, что традиционные методы планирования и диспетчеризации (линейное программирование, эвристики), базирующиеся на детерминированных данных, не обеспечивают устойчивости управленческих решений при отклонении параметров системы от плановых значений в условиях реальной эксплуатации. Высокая энтропия системы, вызванная стохастическим характером отказов техники и погодных условий, требует применения адаптивных алгоритмов.

5. Научная гипотеза исследования. На основании выявленных проблем сформулирована гипотеза о необходимости разработки гибридной методологии управления разнородным парком техники. Данная методология должна интегрировать предиктивные возможности машинного обучения (для снижения неопределенности параметров техники) и строгий математический аппарат теории принятия решений (для выбора оптимальных стратегий в условиях риска).

Таким образом, результаты первой главы формируют требования к математическому аппарату и архитектуре интеллектуальной системы, разработка которых будет осуществлена в последующих главах диссертации. Ключевым инструментом для принятия решений в условиях неустранимой неопределенности предлагается выбрать метод районирования и теорию игр с природой.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРКОМ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

2.1. Теоретико-игровая формализация задачи оперативного управления транспортно-логистическими процессами

Системный анализ, проведенный в предыдущей главе, показал, что внутрихозяйственная логистика АПК представляет собой сложную динамическую систему, функционирующую в условиях перманентной стохастической неопределенности. Для разработки эффективных методов управления необходимо перейти от описательного уровня к строгой математической формализации задачи. В рамках теории исследования операций проблема оперативного планирования и распределения ресурсов при неполной информации о будущих условиях наиболее адекватно описывается в терминах теории игр с природой [45-46].

В контексте рассматриваемой задачи оперативного управления под игроком, принимающим решения, понимается система диспетчеризации, осуществляющая распределение технических ресурсов R по логистическим процессам P . В качестве второго игрока рассматривается «природа», формализующая совокупность стохастических факторов Ξ , включающих метеорологические условия, технические отказы и вариативность эксплуатационных характеристик [47].

Формализация задачи требует определения трех базовых множеств:

1. Множество альтернативных стратегий ЛПР $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$.

В контексте управления парком техники, стратегия a_i представляет собой полный операционный план на заданный временной горизонт (например, рабочая смена). План включает в себя назначение конкретных единиц техники (ТЭС, СТК, М1) на выполнение определенных технологических операций на заданных участках (геозонах), а также определение маршрутов их перемещения. Формирование допустимых стратегий осуществляется с учетом ограничений технологической совместимости ресурсов и операций, задаваемых матрицей технологической допустимости K_{ij} , введенной в подразделе 1.3. Таким образом,

множество стратегий A представляет собой подмножество реализуемых планов, удовлетворяющих условиям $K_{ij} > 0$.

2. Множество состояний природы $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$. Состояние природы π_j - это взаимоисключающий сценарий, описывающий совокупность всех релевантных неконтролируемых факторов. Данное множество включает метеорологические условия (интенсивность осадков, скорость ветра), состояние агрофона (проходимость почвы), техническое состояние парка (вероятность отказа конкретного узла), а также дорожную обстановку. При этом множество Ξ рассматривается как пространство стохастических факторов, тогда как множество Π представляет собой его дискретизацию в виде конечного набора сценариев, используемых для построения платежной матрицы. Каждое состояние π_j определяет конкретную конфигурацию параметров системы, влияющую на производительность ресурсов, доступность техники и значения коэффициентов матрицы технологической допустимости K_{ij} .

3. Матрица эффективности (платежная матрица) $E = \| e_{ij} \|$. Элемент матрицы e_{ij} представляет собой количественную оценку исхода (эффективности) при реализации стратегии a_i в случае наступления состояния природы π_j . В качестве показателя эффективности могут выступать различные экономические или технологические метрики: объем выполненной работы (обработанная площадь, собранный урожай), суммарные эксплуатационные затраты, время выполнения всего комплекса задач или экономические потери от простоев [48]. Поскольку параметры, определяющие исход (например, время выполнения операции), сами являются случайными величинами, элементы матрицы e_{ij} определяются через их математическое ожидание $E[t_{ij}]$. При этом значения e_{ij} формируются с учетом эффективности использования ресурсов в рамках выбранной стратегии, что определяется коэффициентами матрицы технологической допустимости K_{ij} , а также влияния стохастических факторов на параметры выполнения операций [49].

Задача оперативного управления в такой постановке сводится к выбору оптимальной стратегии $a^* \in A$, которая максимизирует (или минимизирует) некоторый критерий, построенный на основе матрицы эффективности E . Выбор данного критерия зависит от степени информированности ЛПР о вероятностном распределении состояний природы $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, где p_j - вероятность наступления состояния π_j . Как показано в работе, информационное состояние системы может варьироваться от полной определенности до полного отсутствия данных о вероятностях.

Следовательно, задача распадается на два взаимосвязанных подэтапа:

- **Задача оценки:** определение объективного вероятностного распределения P на множестве состояний природы Π .
- **Задача выбора:** применение формального критерия для нахождения оптимальной стратегии a^* на основе матрицы E и распределения P .

Традиционные подходы решают задачу оценки путем привлечения экспертных суждений, что вносит элемент субъективизма и снижает устойчивость решений. В предлагаемом подходе задача оценки вероятностного распределения состояний природы делегируется предиктивному модулю машинного обучения, обеспечивающему адаптивное обновление параметров модели. Задача выбора оптимальной стратегии решается с использованием методов теории принятия решений, что позволяет учитывать как ожидаемые значения показателей эффективности, так и риски отклонений. Таким образом, теоретико-игровая формализация создает основу для построения интегрированной модели управления, объединяющей данные, прогнозирование и оптимизацию в единую систему принятия решений [50].

2.2. Развитие метода районирования для задач многокритериальной оптимизации в логистике АПК

Формализованная теоретико-игровая постановка задачи актуализирует фундаментальную проблему теории принятия решений, заключающуюся в необходимости выбора оптимальной стратегии при неполной или отсутствующей информации о вероятностном распределении состояний

природы $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$. Применение классических аналитических инструментов, в частности критерия Байеса, базирующегося на максимизации ожидаемой полезности, сопряжено с жестким требованием точного знания указанного вектора вероятностей. В условиях реального сельскохозяйственного производства выполнение данного требования представляет собой труднореализуемую задачу ввиду высокой стохастичности внешней среды. Для преодоления указанного ограничения в диссертации обосновано применение метода районирования. Предложенный математический аппарат обеспечивает переход от поиска локального оптимума для изолированного вектора P к комплексному структурному анализу всего пространства возможных управленческих решений [51-56].

Основная идея метода заключается в декомпозиции (разбиении) пространства всех возможных распределений вероятностей состояний природы на конечное число областей (районов). В пределах каждой такой области одна и та же стратегия является доминирующей, то есть обеспечивает лучший ожидаемый результат по сравнению со всеми остальными.

Математически, пространство всех возможных распределений вероятностей представляет собой стандартный n -мерный симплекс S_n :

$$S_n = \{P = (p_1, \dots, p_n) \in \mathbb{R}^n \mid \sum_{j=1}^n p_j = 1, p_j \geq 0\}, \quad (2.1)$$

Для любой стратегии $a_i \in A$ ожидаемая эффективность (или математическое ожидание выигрыша/потерь) $B(P, a_i)$ является линейной функцией от компонент вектора вероятностей P :

$$B(P, a_i) = \sum_{j=1}^n e_{ij} p_j, \quad (2.2)$$

где e_{ij} - элементы матрицы эффективности.

Для построения карты районирования производится попарное сравнение эффективности всех альтернативных стратегий. Две стратегии, a_i и a_k , являются

равноэффективными для ЛПР при таком распределении вероятностей P , для которого их ожидаемые эффективности равны:

$$B(P, a_i) = B(P, a_k), \quad (2.3)$$

Раскрывая равенство (2.3), получаем уравнение гиперплоскости, проходящей через начало координат, пересечение которой с симплексом S_n формирует так называемую линию безразличия:

$$\sum_{j=1}^n e_{ij} p_j = \sum_{j=1}^n e_{kj} p_j \Rightarrow \sum_{j=1}^n (e_{ij} - e_{kj}) p_j = 0, \quad (2.4)$$

Обозначив разность эффективностей как $\Delta e_j^{ik} = e_{ij} - e_{kj}$, получаем уравнение:

$$\sum_{j=1}^n \Delta e_j^{ik} p_j = 0, \quad (2.5)$$

Данное уравнение определяет гиперплоскость в n -мерном пространстве $\mathbb{R}^n$, которая проходит через начало координат. Пересечение данной гиперплоскости с симплексом S_n формирует так называемую линию безразличия. Данная линия разделяет пространство вероятностей на две полуплоскости: в одной доминирует стратегия a_i (т.е. $B(P, a_i) > B(P, a_k)$), в другой - стратегия a_k .

Проведение попарного сравнения для всех релевантных стратегий генерирует семейство таких гиперплоскостей, которые разбивают симплекс S_n на конечное число выпуклых многогранников. Каждый такой многогранник представляет собой район доминирования (зону оптимальности) для одной из стратегий.

Район доминирования $Z(a_k^*)$ для стратегии a_k^* определяется как подмножество симплекса S_n , в котором стратегия a_k^* является не хуже любой другой стратегии a_i из множества A :

$$Z(a_k^*) = \{P \in S_n \mid B(P, a_k^*) \geq B(P, a_i) \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}\}, \quad (2.6)$$

Геометрическая интерпретация предложенного аналитического аппарата наиболее наглядна для случая $n = 3$ (три взаимоисключающих состояния

природы). В указанной постановке симплекс вероятностей S_3 представляет собой треугольник на плоскости в барицентрических координатах. Вершины данного симплекса соответствуют детерминированным состояниям среды: $\pi_1 \Rightarrow P = (1,0,0)$, $\pi_2 \Rightarrow P = (0,1,0)$, $\pi_3 \Rightarrow P = (0,0,1)$. Линии безразличия, задаваемые уравнением (2.5), проецируются в виде отрезков прямых, осуществляющих декомпозицию базового треугольника на изолированные полигональные области - районы доминирования стратегий. Графическая интерпретация метода районирования и позиционирования вектора состояний представлена на рисунке 2.1.

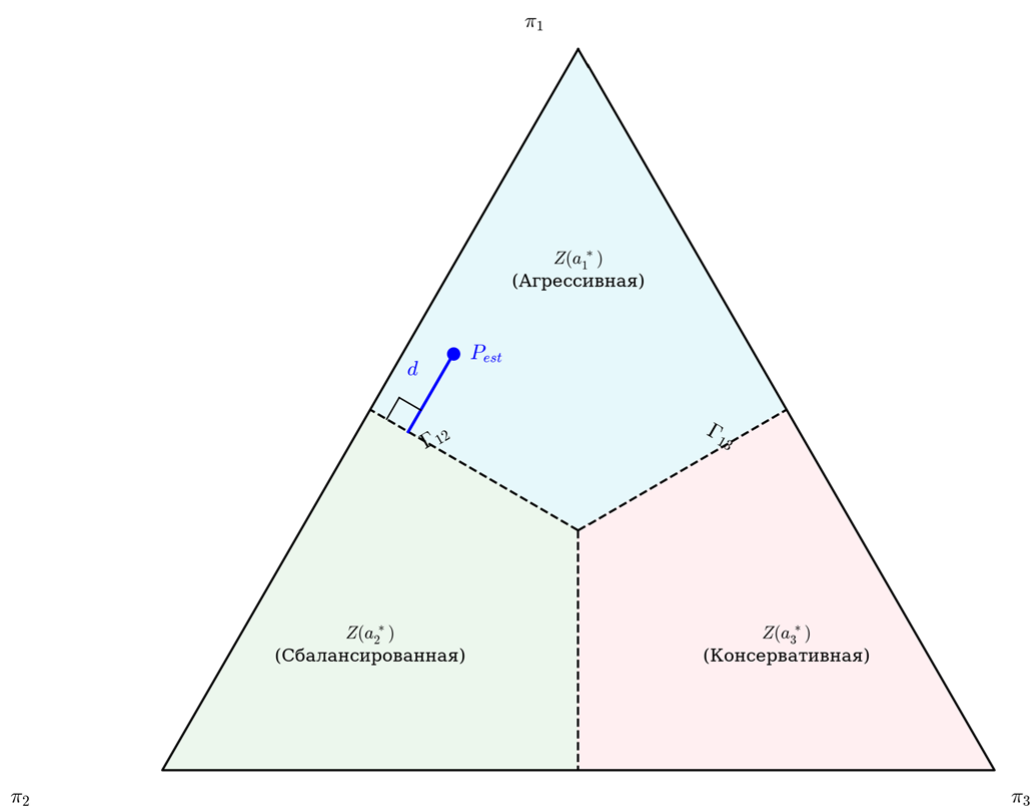


Рисунок 2.1 - Геометрическая интерпретация метода районирования в симплексе вероятностей и расчет метрики устойчивости решения

Фундаментальная ценность метода районирования для задач транспортной логистики АПК заключается в возможности формализации и количественной оценки устойчивости принимаемого управленческого решения. Если вектор вероятностей P_{est} , синтезированный на основе предиктивного прогноза или экспертной оценки, позиционируется глубоко внутри района доминирования

$Z(a_k^*)$, выбранная стратегия a_k^* классифицируется как высокоустойчивая. Геометрически это означает, что длина перпендикуляра d от точки P_{est} до ближайшей линии безразличия Γ превышает критический порог чувствительности. В данном состоянии даже значительные погрешности в оценке вероятностей не инициируют смену оптимальной стратегии, гарантируя стабильность логистического плана [57].

В случае, когда вектор P_{est} располагается в критической близости от одной или нескольких линий безразличия ($d < \delta$), текущее решение признается неустойчивым. Незначительные флуктуации в прогнозе (в частности, изменение вероятности осадков с 30% до 35%) способны спровоцировать пересечение границы района доминирования и, как следствие, детерминировать смену оптимальной стратегии. Подобная топологическая ситуация сигнализирует лицу, принимающему решения, о высокой чувствительности системы к стохастической неопределенности. Данный факт выступает математическим обоснованием для запроса дополнительных телеметрических данных с целью снижения информационной энтропии, либо для принудительного перехода к осторожной (минимаксной) стратегии управления.

Таким образом, метод районирования не просто предлагает одно оптимальное решение, а строит полную структурную карту задачи принятия решений. Он позволяет визуализировать взаимосвязь между неопределенностью среды и оптимальностью стратегий, что является необходимым условием для разработки адаптивных и экономически эффективных систем управления парком техники [58].

2.3. Учет априорной информации и экспертных предпочтений:

Оценки Фишберна и Энтропия

Метод районирования, описанный в предыдущем параграфе, обеспечивает структурный анализ задачи при любом возможном распределении вероятностей состояний природы. Однако для выбора конкретной стратегии необходимо определить наиболее вероятную точку или область внутри симплекса S_n . В условиях дефицита статистических данных, характерного для

агропромышленного сектора, получение точного вектора вероятностей P затруднительно. Вместе с тем, ЛПР (например, агроном или диспетчер) часто обладает ценной априорной информацией, основанной на опыте и анализе косвенных признаков, которая может быть выражена в виде качественных предпочтений [59].

Классическим примером такой информации является ранжирование состояний природы по степени их вероятности. Система не может предоставить точные значения p_j , но эксперт может утверждать, что одно состояние вероятнее другого. Это приводит к формированию системы неравенств, определяющей частичную упорядоченность на множестве вероятностей:

$$p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_n, \quad (2.7)$$

Такое информационное состояние, обозначенное как I_3 , требует специального математического аппарата для преобразования качественных рангов в количественное распределение вероятностей, пригодное для использования в расчетных моделях (например, для нахождения математического ожидания). Одним из наиболее строгих подходов к решению данной задачи является использование оценок Фишберна.

Данный метод позволяет получить числовые значения вероятностей p_j , удовлетворяющие условию (2.7), на основе рекуррентной формулы:

$$p_j = \frac{1}{n} \sum_{k=j}^n \frac{1}{k}, \quad (2.8)$$

Применение оценок Фишберна позволяет трансформировать субъективное экспертное ранжирование в объективный вектор вероятностей, который может быть использован для определения точки P_{est} на карте районирования. Важно отметить, что данное распределение является наименее определенным (наиболее «размытым») из всех, удовлетворяющих заданному ранговому порядку, что соответствует принципу информационной осторожности [60].

Для количественной оценки степени неопределенности, присущей как исходной задаче, так и полученному распределению вероятностей,

целесообразно использовать аппарат теории информации, в частности, информационную энтропию Шеннона. Энтропия $H(P)$ для дискретного распределения вероятностей $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ определяется как:

$$H(P) = - \sum_{j=1}^n p_j \log_2(p_j), \quad (2.9)$$

В контексте нашей задачи энтропия имеет двойную интерпретацию:

1. **Мера неопределенности состояния природы:** чем выше значение $H(P)$, тем сложнее предсказать, какой из сценариев π_j реализуется. Максимальная энтропия достигается при равномерном распределении ($p_j = \frac{1}{n}$ для всех j), что соответствует полной неопределенности (критерий Лапласа). Минимальная энтропия (равная нулю) соответствует детерминированной ситуации, когда вероятность одного из состояний равна 1.

2. **Инструмент выбора распределения (Принцип максимума энтропии):** как указано в работе, в условиях неполной информации следует выбирать такое распределение вероятностей, которое максимизирует энтропию (2.9) при соблюдении всех известных ограничений (например, условия (2.7)). Оценки Фишберна как раз являются одним из частных случаев реализации данного принципа.

Таким образом, совместное применение оценок Фишберна и понятия энтропии позволяет построить мост между качественными экспертными знаниями и количественными методами выбора решений [61]. Это дает возможность использовать аппарат метода районирования даже в условиях острого дефицита статистических данных, формализуя и алгоритмизируя процесс принятия решений, который ранее основывался исключительно на интуиции ЛПР.

2.4. Алгоритм выбора оптимальной стратегии управления парком на основе синтеза критериев

Предшествующие разделы данной главы заложили теоретический фундамент для решения задачи управления: введена теоретико-игровая

формализация (глава 2.1), описан аппарат структурного анализа в виде метода районирования (глава 2.2) и представлены методы для работы в условиях неполной информации (глава 2.3). Данный параграф посвящен синтезу этих компонентов в единый формализованный алгоритм выбора оптимальной стратегии управления парком техники.

Классическая теория принятия решений предлагает несколько критериев для выбора стратегии в условиях неопределенности, каждый из которых отражает определенную степень склонности ЛПР к риску. С помощью метода районирования можно дать этим критериям наглядную геометрическую интерпретацию.

1. Критерий Вальда (максиминный): данный критерий соответствует стратегии крайнего пессимизма. ЛПР предполагает, что при выборе любой стратегии a_i природа выберет наименее благоприятное для него состояние, и стремится максимизировать свой выигрыш в наихудшем случае. Оптимальная стратегия a_W^* находится по правилу:

$$a_W^* = \arg \max_i (\min_j e_{ij}), \quad (2.10)$$

На карте районирования данному критерию соответствует выбор такой стратегии, чей район доминирования включает вершину симплекса, соответствующую наименее выгодному детерминированному исходу для всех стратегий в совокупности.

2. Критерий Сэвиджа (минимаксного сожаления): данный критерий минимизирует максимальные «упущенные выгоды». Сначала строится матрица рисков (сожалений) $R = \| r_{ij} \|$, где:

$$r_{ij} = (\max_k e_{kj}) - e_{ij}, \quad (2.11)$$

Элемент r_{ij} показывает, сколько ЛПР «недополучил», выбрав стратегию a_i , когда природа выбрала состояние π_j , по сравнению с наилучшим возможным выбором для данного состояния. Оптимальная стратегия a_S^* находится по правилу:

$$a_S^* = \arg \min_i (\max_j r_{ij}), \quad (2.12)$$

Применение данного критерия эквивалентно построению новой карты районирования на основе матрицы R и выбору решения, оптимального по критерию Вальда на ней.

3. Критерий Гурвица (критерий пессимизма-оптимизма): данный критерий представляет собой компромисс между крайним пессимизмом (Вальд) и крайним оптимизмом (максимакс). Для каждой стратегии a_i вычисляется взвешенное значение, учитывающее как наилучший, так и наихудший возможный исход:

$$H_i = \alpha \cdot \min_j e_{ij} + (1 - \alpha) \cdot \max_j e_{ij}, \quad (2.13)$$

где α - коэффициент пессимизма, задаваемый экспертно.

Оптимальная стратегия a_H^* выбирается по правилу максимизации данного показателя. При $\alpha = 1$ критерий Гурвица сводится к критерию Вальда.

4. Критерий Лапласа (равной вероятности): используется при полном отсутствии информации о вероятностях. Предполагается, что все состояния природы равновероятны, т.е. $p_j = \frac{1}{n}$ для всех j . Оптимальная стратегия a_L^* максимизирует среднее арифметическое выигрышей:

$$a_L^* = \arg \max_i \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \right), \quad (2.14)$$

На карте районирования данный критерий соответствует выбору стратегии, в чей район доминирования попадает барицентр симплекса вероятностей $P_c = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n} \right)$.

Метод районирования позволяет синтезировать данные подходы. Вместо выбора одного из априорных критериев, он предлагает определить текущее информационное состояние системы (вектор вероятностей P_{est}) и найти соответствующую ему точку на карте районирования. В отличие от классических подходов, навязывающих ЛПР единый критерий (только риск или только выгода), предлагаемый алгоритм адаптирует стратегию управления к текущему уровню информационной энтропии. Формализованная процедура принятия

решения декомпозируется на два этапа: статический (инициализация модели) и динамический (цикл оперативного управления) [62, 63].

Этап I. Инициализация модели и структурный анализ

Данный этап выполняется до начала операционной смены или сезона работ. Целью данного этапа является, построение «навигационной карты» для системы принятия решений.

Шаг 1. Формирование пространства стратегий и состояний.

На основе данных о доступном парке техники (ТЭС, СТК, АМО) и агротехнических требованиях формируется множество допустимых стратегий управления $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$. Каждая стратегия a_i представляет собой вектор управляющих воздействий (распределение техники по рабочим участкам).

Далее определяется множество гипотетических состояний природы $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$, представляющих собой полную группу несовместных событий (сценариев), влияющих на ход логистического процесса (например, дискретные градации метеоусловий или состояния грунта).

Шаг 2. Расчет матрицы эффективности.

Для каждой пары (a_i, π_j) производится расчет показателя эффективности e_{ij} (производительность, затраты, время цикла). Расчет выполняется с использованием детерминированных эксплуатационных моделей, представленных в Главе 1. Формируется платежная матрица $E = \| e_{ij} \|_{m \times n}$.

Шаг 3. Топологическое построение карты районирования.

Для каждой пары стратегий (a_i, a_k) формируется уравнение разделяющей гиперплоскости (линии безразличия) в пространстве вероятностей $\mathbb{R}^n$:

$$\sum_{j=1}^n (e_{ij} - e_{kj}) p_j = 0, \quad (2.15)$$

Симплекс вероятностей S_n разбивается указанными гиперплоскостями на выпуклые многогранники - районы доминирования $Z(a_k)$, внутри которых одна

из стратегий обладает строго максимальным математическим ожиданием эффективности.

Результатом шага является аналитическое описание границ областей оптимальности, которое сохраняется в базе знаний СППР.

Шаг 4. Мониторинг и оценка информационного состояния.

Система агрегирует входящие потоки данных $D(t)$ (телеметрия, метеопрогнозы, отчеты агрономов) и преобразует их в вектор вероятностей состояний природы $P_{est}(t) = (p_1, \dots, p_n)$.

Алгоритм предусматривает вариативность методов оценки в зависимости от полноты данных:

- *Сценарий А:* при наличии достаточного объема исторических и оперативных данных применяется модель машинного обучения (рассматривается в Главе 3), генерирующая распределение вероятностей: $P_{est} = f_{ML}(D)$.

- *Сценарий Б:* при отсутствии статистики, но наличии экспертных предпочтений (ранжирования вида $p_1 \geq \dots \geq p_n$), вектор P_{est} рассчитывается методом оценок Фишберна (формула 2.8).

- *Сценарий В:* в условиях полной неопределенности генерируется вектор равновероятного распределения (центр симплекса).

Шаг 5. Позиционирование и идентификация оптимальной стратегии.

5.1. Производится проверка принадлежности вектора P_{est} одному из районов доминирования $Z(a_k^*)$. Математически это реализуется через проверку системы линейных неравенств:

$$\forall i \neq k: \sum_{j=1}^n e_{kj} p_j \geq \sum_{j=1}^n e_{ij} p_j, \quad (2.16)$$

5.2. Стратегия a_k , удовлетворяющая условию, признается условно-оптимальной.

Шаг 6. Анализ устойчивости решения.

Определяется метрическая устойчивость решения к ошибкам прогноза. Рассчитывается евклидово расстояние d от точки P_{est} до ближайшей границы района доминирования (гиперплоскости безразличия).

$$d(P_{est}, \Gamma) = \min_i \frac{|\sum (e_{kj} - e_{ij}) p_j|}{\sqrt{\sum (e_{kj} - e_{ij}) p_j^2}}, \quad (2.17)$$

Если $d < \delta$ (где δ - заданный порог чувствительности), решение классифицируется как неустойчивое. Это означает, что малая флуктуация внешних условий может сделать оптимальной другую стратегию.

Шаг 7. Выработка управляющего воздействия.

- При устойчивом решении: Система выдает рекомендацию к исполнению стратегии a_k^* .
- При *неустойчивом* решении: активируется протокол снижения рисков. Система либо запрашивает дополнительные данные для уточнения P_{est} (снижение энтропии), либо предлагает ЛПР выбрать «осторожную» стратегию (максиминную), соответствующую критерию Вальда, игнорируя вероятностный выигрыш ради гарантированного результата.

Графическая интерпретация алгоритма функционирования предлагаемой системы представлена на рисунке 2.2.

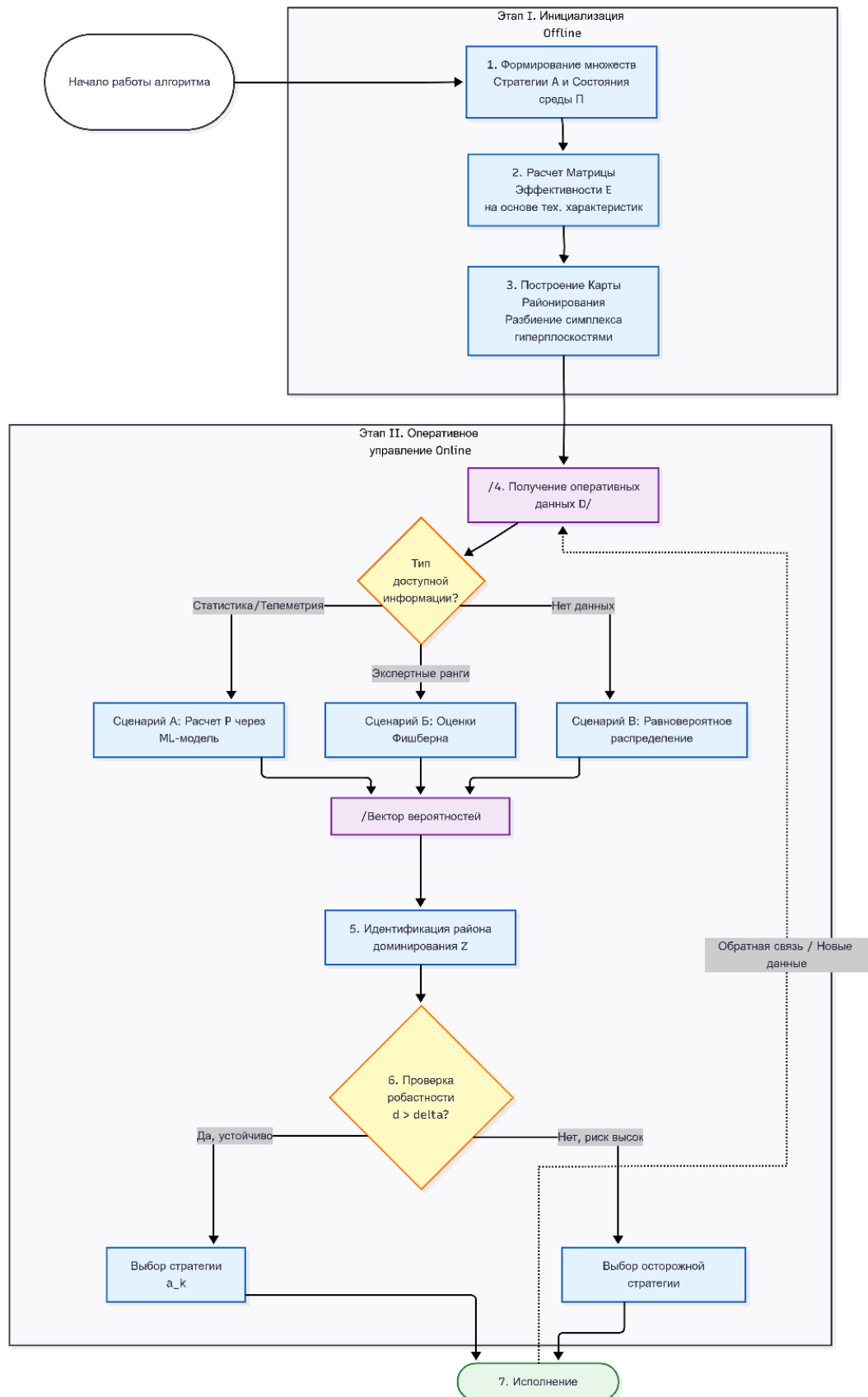


Рисунок 2.2 - Блок-схема алгоритма функционирования системы

2.5. Выводы по главе 2

В рамках второй главы произведена теоретико-методическая разработка математического аппарата для управления внутрихозяйственными транспортно-логистическими системами АПК. Полученные научные результаты сводятся к следующему:

1. **Формализована задача оперативного управления парком техники.** На основе системного анализа (Глава 1) задача управления определена как игра с природой. Введены множества стратегий управления (распределение ресурсов) и состояний стохастической среды (погодно-климатические и технические факторы). Разработана структура платежной матрицы, элементы которой отражают эффективность выполнения логистических операций с учетом ограничений, накладываемых классами техники (ТЭС, СТК, АМО). Данная формализация позволила перевести управленческую проблему из области эвристических решений в область строгих математических методов оптимизации.

2. **Развит метод районирования для задач многокритериальной оптимизации.** Предложен и математически обоснован подход к структурному анализу пространства решений на основе декомпозиции вероятностного симплекса S_n . В отличие от классических методов, ищущих экстремум функции в точке, метод районирования определяет области доминирования стратегий, ограниченные гиперплоскостями безразличия. Указанный подход обеспечил введение количественной метрики устойчивости решения, определяемую как метрическое расстояние от текущего вектора состояния системы до границ области оптимальности.

3. **Разработана методика оценки информационного состояния системы.** Для работы в условиях дефицита статистических данных, характерного для аграрного производства, предложен гибридный подход к формированию вектора вероятностей. Интеграция принципа максимума энтропии Шеннона и оценок Фишберна позволила создать алгоритм преобразования качественных экспертных предпочтений (ранжирования рисков)

в количественные вероятностные оценки. Это обеспечивает возможность применения аналитических методов даже при отсутствии репрезентативных исторических данных (проблема «холодного старта»).

4. Синтезирован адаптивный алгоритм выбора оптимальной стратегии. Разработан пошаговый алгоритм, объединяющий процедуру оценки состояния среды и процедуру выбора решения на карте районирования. Алгоритм реализует динамическое переключение между стратегиями максимизации эффективности (критерий Байеса) и стратегиями минимизации рисков (критерий Вальда) в зависимости от текущего уровня неопределенности и устойчивости решения.

Таким образом, во второй главе сформировано математическое ядро гибридной системы поддержки принятия решений. Разработанная модель предъявляет жесткие требования к качеству и структуре входных данных (вектору состояния системы), что обосновывает необходимость разработки специализированного предиктивного модуля на базе машинного обучения. Реализация данного модуля, включая формирование признакового пространства и архитектуру нейронных сетей, является предметом исследования третьей главы.

3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

3.1. Формирование обучающей выборки и признакового пространства

Эффективность функционирования гибридной системы поддержки принятия решений, концепция которой обоснована в Главе 2, критически зависит от качества и репрезентативности входных данных, поступающих в предиктивный модуль. В рамках разработанной теоретико-игровой модели возникает задача оценки параметров, определяющих матрицу эффективности E и вероятностное распределение состояний природы P . В условиях стохастической неопределенности данные параметры не могут быть заданы априорно и требуют восстановления на основе исторических и оперативных данных [64].

Задача настоящего подраздела заключается в формализации процесса преобразования разнородных потоков данных, генерируемых элементами транспортно-логистической системы (ТЭС, СТК, внешней средой), в структурированное признаковое пространство, пригодное для последующей обработки методами машинного обучения.

В соответствии с классификацией технических средств, введенной в главе 1.2, и матрицей технологической допустимости (Приложение А), каждый объект управления M_i характеризуется набором статических и динамических параметров. Однако прямое использование исходных данных в моделях машинного обучения затруднено в силу их разнородности, зашумленности и различной физической размерности. Требуется процедура векторизации состояния системы.

Задача машинного обучения формализуется как построение отображения вида:

$$f: X \rightarrow Y, \quad (3.1)$$

где: X - вектор входных параметров, включающий характеристики технических средств, параметры внешней среды и состояние логистических процессов;

Y - вектор выходных переменных, используемых в модели управления.

В зависимости от постановки задачи в качестве выходных переменных могут выступать:

- вероятности реализации состояний природы $P(\pi_j)$;
- время выполнения операций t_{ij} ;
- интегральные показатели эффективности e_{ij} .

Следует отметить, что входной вектор X формируется на основе вектора состояния технических средств V_i , введенного в подразделе 1.3, и дополняется параметрами среды и характеристиками выполняемых операций. Таким образом, обеспечивается переход к унифицированному пространству признаков, позволяющему сопоставлять разнородные технические ресурсы [65, 66].

Процесс подготовки входных данных декомпозируется на три последовательных этапа. Первоначальным этапом выступает агрегация информационных источников, в рамках которой базис предиктивной модели формируется из трех независимых потоков:

Информационный базис модели формируется из трех независимых потоков:

- Поток телеметрии: данные, поступающие от бортовых систем техники (CAN-шина, GNSS-трекеры), характеризующие текущее состояние активных агентов (M1, M2, M3). Частота дискретизации: 1–10 Гц.

- Поток состояния среды: данные метеостанций, сервисов прогноза погоды, датчиков влажности почвы и геоинформационных систем. Эти данные определяют параметры состояния природы π_j , введенного в теоретико-игровой модели (глава 2.1) [67].

- Поток контекста: статические и слабо изменяющиеся данные (агротехнические сроки, характеристики полей, паспортные данные техники), поступающие из корпоративных информационных систем.

Вторым этапом является конструирование единого признакового пространства. Для каждого кванта времени t состояние системы описывается вектором признаков x_t . На основе анализа значимости факторов, проведенного

в первой главе, вектор x_t формируется путем конкатенации трех субрегионов признаков:

$$x_t = [x_{stat} \oplus x_{dyn} \oplus x_{env}], \quad (3.2)$$

Субрегион статических признаков (x_{stat}) описывает инвариантные характеристики техники и выполняемой логистической операции. Данный вектор включает тип технического средства (согласно классам M1, M2, M3), тип агрегируемого орудия, вид возделываемой культуры и геометрические параметры поля. Ввиду категориальной природы указанных данных применяется их векторное представление, обеспечивающее корректный учет математической близости объектов по их эксплуатационным характеристикам [68]

Субрегион динамических эксплуатационных признаков (x_{dyn}) отражает текущее физическое состояние парка техники. В состав данного компонента входят геопозиция, скорость движения, частота вращения коленчатого вала, нагрузка на двигатель, мгновенный расход топлива и уровень заполнения бункера. Для приведения разнородных физических величин к единому масштабу данные подвергаются процедуре стандартизации (Z-нормализации) с нулевым математическим ожиданием ($\mu=0$) и единичной дисперсией ($\sigma=1$):

$$x'_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}, \quad (3.3)$$

Субрегион признаков внешней среды (x_{env}) формализует текущие агроклиматические условия функционирования системы. Указанный вектор агрегирует показатели температуры воздуха, интенсивности осадков, скорости ветра, влажности почвы, а также время суток с учетом естественной цикличности производственных процессов.

Описывают текущее состояние внешней среды, определяющее условия функционирования системы.

Для систематизации входных данных и обеспечения воспроизводимости экспериментов разработан реестр признаков, используемых при обучении модели [68-72]. Полная структура признакового пространства, включающая

источники данных, типы переменных и частоту их дискретизации, приведена в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Структура признакового пространства модели машинного обучения

Группа признаков	Наименование параметра	Источник данных	Тип данных и метод предобработки	Частота обновления
1. Статические	Идентификатор модели ТЭС/СТК	ERP / Справочник	Категориальный (Embedding)	Const (на цикл)
	Тип агрегируемого орудия (АМО)	ERP / Система учета	Категориальный (One-Hot / Embedding)	Const (на цикл)
	Плановая площадь обработки (геометрия)	ГИС / Карта полей	Числовой (Нормализация)	Const (на задание)
	Директивный агротехнический срок	Агрономическая служба	Числовой (дни до дедлайна)	1 раз/сутки
2. Динамические	Частота вращения коленчатого вала (<i>RPM</i>)	CAN-шина (J1939)	Числовой (Z-score normalization)	10 Гц
	Мгновенная нагрузка на двигатель (<i>Load</i>)	CAN-шина	Числовой (Нормализация)	10 Гц
	Мгновенный расход топлива	CAN-шина / ДРТ	Числовой (л/ч)	1 Гц
	Географические координаты (L_{at}, L_{on})	GNSS-трекер	Числовой (Гео-хэширование)	1 Гц
	Диагностические коды неисправностей (<i>DTC</i>)	CAN-шина	Бинарный / Категориальный	По событию
3. Внешняя среда	Влажность почвы (в слое 0-10 см)	IoT-датчики / Метеомодель	Числовой (%)	1 раз/час
	Интенсивность осадков	Локальная метеостанция / API	Числовой (мм/ч)	1 раз/10 мин
	Температура воздуха	Метеостанция	Числовой (°C)	1 раз/час

Заключительный этап подготовки данных заключается в формировании многомерных тензоров для подачи на вход нейросети. Поскольку логистические процессы в АПК характеризуются высокой динамичностью и зависят от предыстории (обладают инерционностью), для обучения применяются

архитектуры рекуррентных нейронных сетей или модели класса Трансформер. Указанные архитектуры требуют представления входной информации в виде трехмерных тензоров.

Применяется метод скользящего окна. Последовательность векторов состояний $\{x_1, x_2, \dots, x_T\}$ преобразуется в тензор X размерности $(B \times W \times F)$, где:

- B (Batch Size) - размер пакета данных для одной итерации обучения.
- W (Window Size) - длина исторического горизонта (количество тактов времени в прошлом, учитываемых моделью для прогноза).
- F (Features) - размерность вектора признаков x_t .

Формально, входной тензор для i -го примера в батче представляет собой матрицу:

$$X_i = \begin{pmatrix} x_{t-W}^{(1)} & x_{t-W}^{(2)} & \dots & x_{t-W}^{(F)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_t^{(1)} & x_t^{(2)} & \dots & x_t^{(F)} \end{pmatrix}, \quad (3.4)$$

В контексте гибридной методологии, описанной во второй главе, задачей ML-модуля выступает не прямая генерация управляющего решения, а объективная оценка вероятностного распределения состояний системы. Следовательно, целевой переменной Y является вектор вероятностей или конкретное значение параметра, подверженного стохастическому влиянию. В зависимости от решаемой аналитической подзадачи формируются следующие целевые переменные:

- В задаче расчета ожидаемого времени завершения операции (Estimated Time of Arrival, ETA): целевой переменной выступает скаляр $Y \in \mathbb{R}^1$, отражающий прогнозируемую длительность логистического цикла (задача регрессии).

- В задаче предиктивного обслуживания (Predictive Maintenance, PdM): целевой переменной является $Y \in [0,1]$, определяющая вероятность отказа техники на заданном горизонте планирования H (задача бинарной классификации), либо дискретный класс технического состояния (задача мультиклассовой классификации).

– В задаче оценки информационного состояния для метода районирования (P_{est}): целевой переменной выступает вектор $Y \in Sn$, характеризующий распределение вероятностей принадлежности текущей ситуации к одному из классов состояний природы (например, «Благоприятные», «Рискованные», «Критические»).

Сформированное признаковое пространство обеспечивает формализованный интерфейс между физическими процессами функционирования парка техники и алгоритмами принятия решений, рассмотренными в главе 2. Использование унифицированного вектора состояния позволяет перейти от нормативных оценок к адаптивному управлению в условиях неопределенности.

3.2. Архитектура математически-обоснованной модели

Разработка предиктивного модуля гибридной системы требует решения фундаментального противоречия между высокой аппроксимирующей способностью современных алгоритмов машинного обучения и необходимостью гарантировать физическую и экономическую адекватность выдаваемых прогнозов. Стандартные методы обучения, минимизирующие статистическую ошибку на исторических данных, в условиях высокой стохастичности могут генерировать решения, формально корректные с позиций минимизации ошибки аппроксимации, но неприемлемые с точки зрения критериев устойчивости, определенных в Главе 2.

Для преодоления указанного ограничения в диссертационном исследовании обоснован подход, базирующийся на интеграции априорных аналитических знаний о структуре предметной области непосредственно в вычислительную архитектуру модели и алгоритм ее обучения. В качестве формализованного базиса подобных знаний выступают математические ограничения, синтезированные на основе метода районирования симплекса вероятностей и теоретико-игровой постановки задачи оперативного управления. Практическая реализация данного принципа осуществляется посредством конструирования специализированной функции потерь, накладывающей штраф

на алгоритм за экономические последствия при нарушении границ областей доминирования оптимальных стратегий. Указанная интеграция детерминирует трансформацию алгоритма машинного обучения из изолированного инструмента статистического прогнозирования в неотъемлемый компонент единого контура принятия логистических решений.

На этапе проектирования предиктивного модуля проведен сравнительный анализ применимости современных вычислительных парадигм к специфике транспортно-логистических процессов агропромышленного комплекса. Первым из рассматриваемых классов алгоритмов выступают ансамблевые методы на базе градиентного бустинга над деревьями решений (Gradient Boosting Decision Trees, GBDT). Современные реализации данного подхода (XGBoost, LightGBM, CatBoost) являются общепризнанным стандартом при обработке разнородных табличных массивов информации [73, 74]. В частности, алгоритм XGBoost обеспечивает высокую масштабируемость вычислений и включает встроенные механизмы математической регуляризации. Алгоритмическая реализация LightGBM базируется на гистограммных методах расщепления деревьев, что существенно ускоряет процесс сходимости. В свою очередь, алгоритм CatBoost ориентирован на нативную обработку категориальных признаков, что представляет высокую ценность при анализе текстовых идентификаторов техники и типов агрегируемых орудий.

Несмотря на высокую скорость обучения и устойчивость к выбросам, применение алгоритмов класса GBDT в рамках разрабатываемой системы сопряжено с рядом фундаментальных ограничений. Существенную сложность представляет обработка длинных временных рядов (потоков телеметрии), а также ограниченные возможности по интеграции специализированных дифференцируемых функций потерь сложной формы. Алгоритмы градиентного бустинга формируют решающие границы в виде гиперплоскостей, ортогональных осям признаков, что критически затрудняет аппроксимацию сложных косых границ районов доминирования в симплексе вероятностей.

Альтернативным направлением аналитического моделирования выступают архитектуры глубокого обучения (Deep Learning), специализированные на обработке последовательных массивов данных. Базовые рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Networks, RNN) осуществляют анализ временных рядов посредством сохранения внутреннего состояния, однако обладают математическим ограничением в виде затухания градиента при обработке длинных последовательностей. Преодоление данного барьера реализуется применением модифицированных ячеек долгой краткосрочной памяти (Long Short-Term Memory, LSTM) и управляемых рекуррентных блоков (Gated Recurrent Unit, GRU). Внедрение сложных вентильных структур в указанных архитектурах обеспечивает способность алгоритма к выявлению и сохранению долгосрочных нелинейных зависимостей [75]. Применительно к задачам транспортной логистики АПК описанное свойство имеет определяющее значение для идентификации скрытых трендов деградации узлов техники на основе непрерывного потока бортовой телеметрии. В качестве дополнительного инструментария также рассматриваются архитектуры на базе механизмов внутреннего внимания (Self-Attention, Transformers), вычисляющие весовые коэффициенты значимости для каждого элемента временного ряда независимо от его хронологической позиции.

Фундаментальным преимуществом нейросетевых моделей выступает способность аппроксимировать нелинейные функции произвольной сложности в сочетании с возможностью построения мультимодальных архитектур, объединяющих статические и динамические данные. Определяющим фактором в пользу выбора глубокого обучения для целей настоящего исследования является полная дифференцируемость вычислительного графа. Данное свойство обеспечивает возможность конструирования специализированных функций потерь, интегрирующих метрику статистической ошибки прогноза и дифференцируемые штрафные компоненты, формализующие экономические последствия принимаемых решений. На основании проведенного анализа в качестве вычислительного ядра предиктивного модуля синтезирована

архитектура глубокой нейронной сети с гибридной топологией обработки данных.

Разработанная топология нейросетевой архитектуры представляет собой двухпоточную систему, обеспечивающую параллельную обработку статического контекста и динамической телеметрии с последующим слиянием извлеченных признаков. В соответствии с алгоритмом, изложенным в подразделе 3.1, на вход модели подается тензор X , структурно разделенный на два независимых информационных потока [76].

Первый поток оперирует статическим вектором x_{stat} , агрегирующим инвариантные характеристики техники и агротехнические нормативы. Обработка данного вектора реализуется посредством модуля статического контекста, состоящего из серии полносвязных слоев с функцией активации ReLU. Целью указанного модуля выступает формирование нелинейного признакового пространства, описывающего потенциальные возможности технического средства в заданных условиях. Математически выход данного блока описывается выражением:

$$h_{stat} = f_{Dense}(x_{stat}), \quad (3.5)$$

Второй поток обрабатывает динамический тензор последовательности X_{dyn} размерности $(W \times F_{dyn})$, содержащий ретроспективу изменения эксплуатационных параметров (скорость, расход топлива, метеоусловия) за временное окно W . Анализ указанного тензора осуществляется модулем динамической телеметрии на базе рекуррентных ячеек долгой краткосрочной памяти (LSTM). Применение архитектуры LSTM детерминировано необходимостью выявления долгосрочных зависимостей в телеметрических данных (в частности, тенденций температурных аномалий двигателя или накопления усталостных напряжений), идентификация которых невозможна на основе мгновенных замеров:

$$h_{dyn} = f_{LSTM}(X_{dyn}), \quad (3.6)$$

Интеграция извлеченных признаков реализуется на этапе слияния, где векторы скрытых состояний h_{stat} и h_{dyn} объединяются посредством операции конкатенации, формируя единый вектор контекста системы $h_{context}$.

$$h_{context} = Concat([h_{stat}, h_{dyn}]), \quad (3.7)$$

Вычислительная архитектура завершается выходным полносвязным слоем, использующим функцию активации Softmax. В отличие от задач классической регрессии, предложенная модель осуществляет прогнозирование вектора распределения вероятностей $\hat{P}$ по множеству состояний природы Π . Указанный формат выходных данных обеспечивает прямую интеграцию предиктивного модуля с аналитическим аппаратом метода районирования, обоснованным в Главе 2:

$$\hat{P} = Softmax(W_{out} \cdot h_{context} + b_{out}), \quad (3.8)$$

$$\hat{P} = [\hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots, \hat{p}_n], \sum \hat{p}_j = 1, \quad (3.9)$$

Следовательно, синтезированная нейросеть функционирует в качестве универсального аппроксиматора, трансформирующего физические сигналы телеметрии в объективное вероятностное описание состояния среды, требуемое для принятия управленческих решений. Блок-схема разработанной гибридной архитектуры представлена на рисунке 3.1.

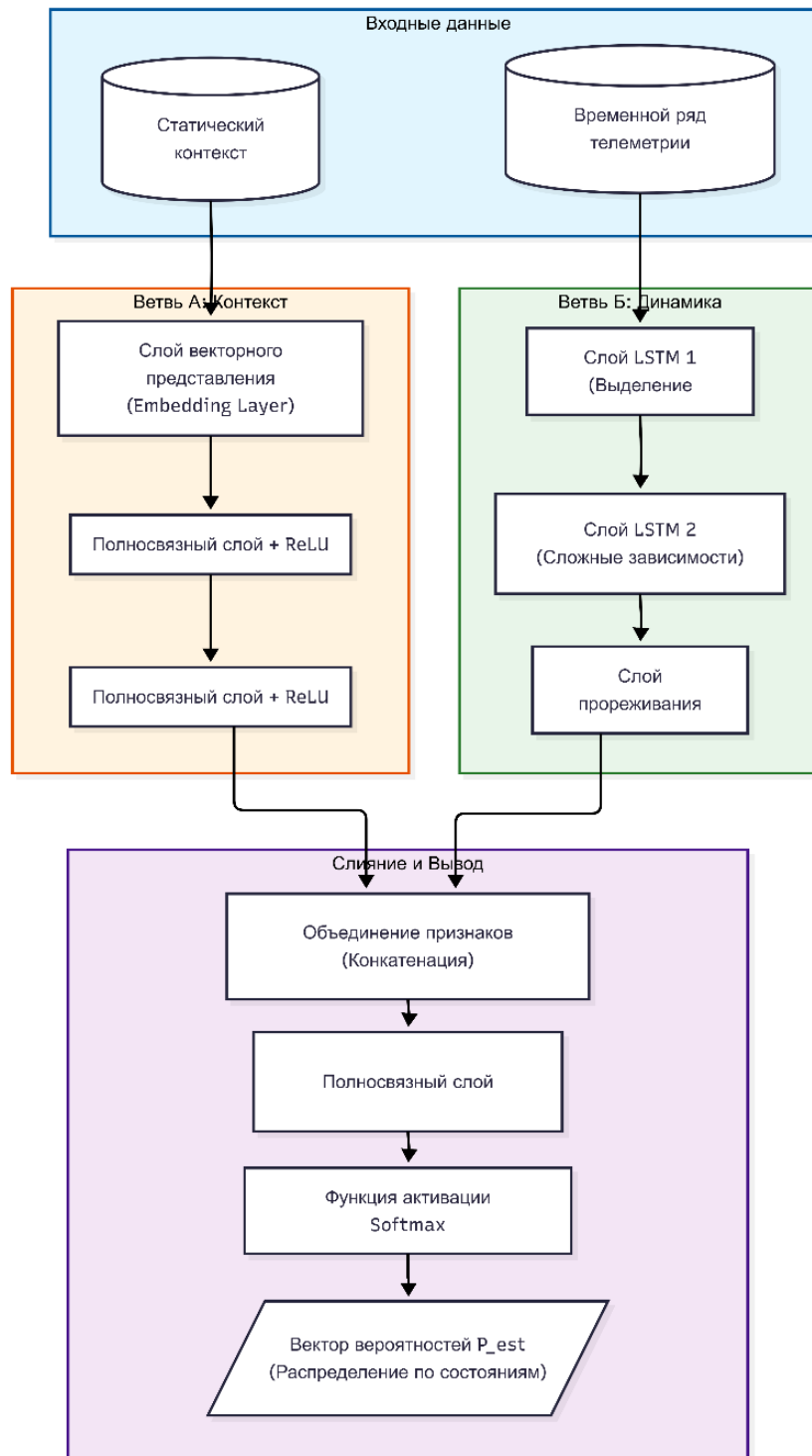


Рисунок 3.1 - Архитектура гибридной нейронной сети для оценки состояний логистической системы

Фундаментальным элементом научной новизны предложенной архитектуры выступает отказ от изолированного применения стандартных метрик ошибки (MSE, MAE, Cross-Entropy) [77, 78]. Классические функции потерь оптимизируют исключительно статистическую точность прогноза,

нивелируя физический и экономический смысл возникающих отклонений. В контексте логистики АПК погрешность прогноза вероятности осадков на 5% может являться несущественной в глубине зоны районирования (где решение обладает высокой устойчивостью), однако становится критической вблизи границ разделения стратегий (в соответствии с подразделом 2.2), провоцируя смену оптимального плана и значительные экономические убытки.

Для реализации концепции математически-информированного машинного обучения синтезирована гибридная целевая функция $\mathcal{L}_{total}$, интегрирующая метрику статистической ошибки аппроксимации и экономический «штраф», вычисляемый на основе матрицы эффективности E [78-80]:

$$\mathcal{L}_{total} = \mathcal{L}_{data}(\hat{P}, P_{true}) + \lambda \cdot \mathcal{L}_{decision}(\hat{P}, P_{true}, E), \quad (3.10)$$

где: $\hat{P}$ - вектор предсказанных вероятностей состояний природы (выход нейросети);

P_{true} - вектор истинного распределения (Ground Truth, полученный из исторических фактов);

E - матрица эффективности (из Главы 2);

λ - гиперпараметр регуляризации, определяющий вес «экономической» составляющей.

Первая составляющая целевой функции ($\mathcal{L}_{data}$) отвечает за способность модели корректно аппроксимировать распределение вероятностей. В качестве данной метрики применяется категориальная перекрестная энтропия (Categorical Cross-Entropy), обеспечивающая эффективную сходимость при работе с выходным слоем Softmax:

$$\mathcal{L}_{data} = - \sum_{j=1}^n p_{true,j} \cdot \log(\hat{p}_j), \quad (3.11)$$

Вторая составляющая ($\mathcal{L}_{decision}$) внедряет аналитические ограничения метода районирования непосредственно в процесс обучения. Указанная компонента накладывает штраф на модель не за абсолютное отклонение вероятностей, а за экономические последствия данного отклонения при выборе

управленческих решений. Математическая формализация данного штрафа базируется на концепции упущенной выгоды. Пусть $a^*(\hat{P})$ - стратегия, выбираемая системой на основе прогноза $\hat{P}$, а $a^*(P_{true})$ - объективно оптимальная стратегия для истинного состояния среды. Функция потерь решения определяется как разность между максимально возможной эффективностью и эффективностью стратегии, инициированной прогнозом модели:

$$\mathcal{L}_{decision} = \max_i \left(\sum_{j=1}^n e_{ij} p_{true,j} \right) - \sum_{j=1}^n e_{a^*(\hat{P}),j} p_{true,j}, \quad (3.12)$$

Экономическая компонента функции потерь определяется как математическое ожидание недополученной эффективности вследствие выбора стратегии, отличной от оптимальной при фактически реализующемся состоянии внешней среды. В отличие от статистической компоненты, штрафующей расхождение между предсказанным и фактическим распределениями безотносительно его последствий, экономическая компонента оценивает именно хозяйственный результат ошибки прогноза. Применительно к рассматриваемой задаче агропромышленного производства указанные потери складываются из двух источников. Ошибочный выбор щадящего режима в условиях, требующих привлечения резервного ресурса, ведёт к затягиванию уборочных работ за пределы директивного агротехнического срока и, как следствие, к потерям выращенной продукции от перестоя на корню. Ошибочное привлечение резервного ресурса в условиях, не требующих его задействования, ведёт к неоправданным затратам на аренду дополнительной техники. Экономическая компонента объединяет оба источника, вследствие чего минимизация её в процессе обучения смещает прогноз в направлении решений, наименее затратных по совокупным хозяйственным последствиям, а не наиболее точных в статистическом смысле.

Использование дискретной операции выбора стратегии ($\arg \max$) блокирует вычисление градиентов, что исключает применение алгоритма

обратного распространения ошибки. Для обеспечения полной дифференцируемости вычислительного графа в работе применена гладкая аппроксимация функции максимума (Soft-Argmax). Вектор ожидаемой эффективности стратегий $U = E \cdot \hat{P}$ трансформируется в вектор внимания S с компонентами s_i :

$$s_i = \frac{\exp(u_i/\tau)}{\sum_k \exp(u_k/\tau)}, \quad (3.13)$$

где τ - температурный коэффициент, регулирующий степень «жесткости» выбора. При $\tau \rightarrow 0$ функция асимптотически приближается к строгому максимуму, а при $\tau > 0$ обеспечивает требуемую дифференцируемость.

С учетом введенной аппроксимации дифференцируемый аналог экономических потерь принимает вид:

$$\mathcal{L}_{diff_decision} = \left(U_{opt} - \sum_{i=1}^m s_i(\hat{P}) \cdot (E_i \cdot P_{true}) \right)^2, \quad (3.14)$$

Процесс обучения модели реализуется как итерационная процедура минимизации функции $\mathcal{L}_{total}$ с использованием градиентных методов оптимизации. На каждой итерации обновление весовых коэффициентов направлено на синхронное снижение как статистической ошибки аппроксимации, так и риска принятия экономически неэффективных решений. Таким образом, предложенная архитектура обеспечивает глубокую интеграцию методов машинного обучения с теоретико-игровой моделью, детерминируя формирование устойчивых управленческих стратегий в условиях стохастической неопределенности.

3.3. Алгоритмы предиктивной аналитики: прогнозирование доступности техники и рабочих окон

Эффективность применения алгоритма выбора стратегии, обоснованного в Главе 2, в решающей степени детерминируется точностью оценки доступности технических ресурсов. В условиях интенсивной эксплуатации парка техники (в частности, классов М2 и М3 в пиковые периоды) детерминированный подход к планированию, оперирующий нормативными значениями наработки на отказ,

демонстрирует недостаточную точность. Фактический ресурс технического средства является динамической величиной, функционально зависящей от режима эксплуатации, истории нагрузок, текущего технического состояния и η (характеристическое время жизни) и параметр формы β (характер износа) не являются константами, а моделируются как функции от вектора динамических признаков x_{dyn} (вибрация, температура, диагностические коды), формируемого предиктивной моделью [81]:

$$\eta_i(t) = \eta_{base} \cdot \exp\left(f_{ML}\left(x_{dyn}^{(i)}\right)\right), \quad (3.15)$$

Указанный подход детерминирует автоматическое снижение расчетной вероятности доступности техники при фиксации аномалий в телеметрических данных (предотказное состояние), независимо от степени выработки нормативного ресурса.

Вторым компонентом комплекса является алгоритм прогнозирования агротехнических периодов. Доступность техники выступает необходимым, но не достаточным условием выполнения логистической операции. Возможность реализации стратегии лимитируется агротехническим окном - временным интервалом, в течение которого состояние внешней среды (почва, метеоусловия, влажность культуры) обеспечивает выполнение работ с заданным уровнем качества.

Прогнозирование указанного окна формализуется как задача бинарной классификации дискретных временных интервалов $T = \{t_1, t_1, \dots\}$. Для каждого кванта времени t_k (например, час) вычисляется вероятность P_{agro} принадлежности состояния природы π_j к множеству допустимых состояний Π_{allow} :

$$P_{agro}(t_k) = P(\pi(t_k) \in \Pi_{allow} \mid D_{meteo}), \quad (3.16)$$

Входной тензор D_{meteo} агрегирует прогнозы метеорологических служб и локальные данные станций мониторинга. Алгоритм учитывает инерционность физических процессов: в частности, после интенсивных осадков (состояние π_{rain}) переход в состояние π_{work} (почва пригодна для обработки)

осуществляется с временной задержкой τ_{dry} , функционально зависящей от типа почвы и температурного режима.

Для интеграции полученных метрик в Матрицу эффективности (Глава 2) синтезируется интегральный показатель операционной доступности (P_{succ}). Для конкретной единицы техники M_i при выполнении операции длительностью Δt данный показатель рассчитывается как произведение вероятности технической исправности и вероятности сохранения благоприятного агротехнического окна:

$$P_{succ}^{(i)}(\Delta t) = R(t_{cur} + \Delta t \mid t_{cur}) \cdot \prod_{k=1}^{[\Delta t]} P_{agro}(t_{start} + k), \quad (3.17)$$

Вычисленные значения P_{succ} применяются для динамической коррекции элементов e_{ij} в платежной матрице. В случае падения показателя $P_{succ}^{(i)}$ ниже заданного критического порога α (например, 0.8), система автоматически инициирует штрафную корректировку для данной единицы техники в алгоритме планирования, детерминируя ее превентивную замену на резервный ресурс (ТЭС класса М1 или М3).

Для самоходных технологических комплексов (СТК), выступающих узловыми элементами системы (класс М2), снижение функции надежности $R(t)$ инициирует формирование заявки на упреждающее техническое обслуживание. Указанное обслуживание планируется на ближайший период вынужденного простоя, обусловленного неблагоприятными метеоусловиями ($P_{agro} \rightarrow 0$).

Следовательно, разработанные алгоритмы предиктивной аналитики обеспечивают фундаментальный переход от реактивного реагирования на отказы к проактивному управлению рисками. Данное обстоятельство гарантирует существенное повышение устойчивости транспортно-логистической системы в условиях неопределенности и обеспечивает строгую синхронизацию функционирования всех ее элементов.

3.4. Выводы по главе 3

В третьей главе осуществлена программно-алгоритмическая реализация методологии управления транспортно-логистическими процессами АПК.

Разработан инструментарий, обеспечивающий преобразование разнородных потоков «сырых» данных в верифицированные вероятностные оценки, необходимые для работы метода районирования. Полученные научные и практические результаты сводятся к следующему:

1. Разработана методика формирования признакового пространства. Формализован процесс агрегации данных из разнородных источников (телеметрия ТЭС/СТК, метеоданные, агрономический контекст) и их преобразования в тензорное представление. Предложенный подход к конструированию вектора состояния системы x_t обеспечивает необходимую полноту описания физических процессов для их последующей обработки методами глубокого обучения.

2. Обоснована архитектура математически-информированной модели. Предложена гибридная топология нейронной сети, сочетающая обработку статического контекста и динамических временных рядов (через LSTM-блоки). Ключевым элементом новизны является разработка специализированной функции потерь $\mathcal{L}_{total}$, включающей регуляризационный компонент $\mathcal{L}_{decision}$. Это позволило интегрировать ограничения метода районирования непосредственно в процесс обучения нейросети, гарантируя, что минимизация статистической ошибки прогноза не приведет к нарушению границ экономической эффективности принимаемых решений.

3. Формализованы алгоритмы предиктивной аналитики. Разработан комплекс алгоритмов для оценки динамической надежности техники и прогнозирования агротехнических «окон». В отличие от нормативных методов, предложенный подход позволяет рассчитывать вероятность безотказной работы конкретной единицы техники в режиме реального времени на основе анализа текущей телеметрии и истории нагрузок. Введен интегральный показатель операционной доступности P_{succ} , являющийся динамическим весовым коэффициентом для матрицы эффективности.

4. Создано алгоритмическое ядро системы. Совокупность разработанных моделей и алгоритмов образует предиктивный уровень

гибридной СППР. Данный уровень способен генерировать объективный вектор вероятностей состояний природы P_{est} , заменяя субъективные экспертные оценки объективными данными.

Таким образом, в главах 2 и 3 полностью сформирован математический и алгоритмический базис системы: от теоретико-игровой модели до нейросетевого предиктора. Однако выходные данные ML-моделей (вероятностные распределения, тензоры) сложны для прямой интерпретации диспетчером или агрономом. Для внедрения разработанной методологии в реальный производственный процесс необходима разработка архитектуры системы с интерфейсом на естественном языке, что обуславливает задачи четвертой главы - интеграцию полученного решения с большими языковыми моделями (LLM) для реализации объяснимого искусственного интеллекта (XAI).

ГЛАВА 4. АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С МОДУЛЕМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

4.1. Общая архитектура гибридной СППР: схема взаимодействия модулей

Практическая реализация разработанного научно-методического аппарата управления требует создания масштабируемой программной архитектуры, обеспечивающей системную интеграцию разнородных вычислительных парадигм: детерминированных алгоритмов обработки данных, стохастических моделей машинного обучения и генеративных моделей искусственного интеллекта [92, 93].

С позиций системного анализа проектируемая система поддержки принятия решений (СППР) представляет собой замкнутый контур управления киберфизической логистической системой [82, 83]. Архитектура СППР базируется на модульном принципе и декомпозируется на четыре функциональных иерархических уровня. Через указанные уровни последовательно проходит информационный поток, трансформируясь из первичных телеметрических сигналов в обоснованные управленческие решения.

Обобщенная характеристика выделенных иерархических уровней, их функционального назначения и базовых программных компонентов систематизирована в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Функционально-компонентная структура иерархических уровней гибридной СППР

Наименование иерархического уровня	Функциональное назначение	Базовые программные модули	Результат обработки информационного потока
1. Информационно-сенсорный	Формирование цифрового двойника парка техники и агрегация параметров внешней среды.	Модуль телематического сбора; Модуль интеграции с внешними ИС; Консолидированное хранилище.	Структурированные массивы первичных данных (телеметрия, метеоусловия, агрофон).

2. Прогностический (предиктивный)	Снижение стохастической неопределенности и прогнозирование состояний системы.	Модуль конструирования признаков пространства; Ансамбль предиктивных нейросетевых моделей.	Динамический вектор вероятностей состояний среды (<i>PestPest</i>).
3. Аналитический (прескриптивный)	Математический выбор оптимальной логистической стратегии и оценка ее устойчивости.	Модуль математического районирования; Блок оценки устойчивости; Модуль семантического структурирования.	Машинно-читаемый контекст (JSON/XML) с выбранной стратегией и метриками.
4. Когнитивно-интерпретационный	Реализация концепции объяснимого ИИ (XAI) и обеспечение человеко-машинного взаимодействия.	Модуль генеративного ИИ (LLM); Автоматизированное рабочее место (АРМ) логиста-диспетчера.	Семантически прозрачные управленческие директивы на естественном языке.

Первый уровень - информационно-сенсорный (уровень сбора и первичной обработки данных). Данный контур отвечает за формирование актуального цифрового двойника транспортно-логистической системы предприятия, реализуя функции интерфейса с физическим парком техники и внешней средой. Функционал уровня обеспечивается модулем телематического сбора данных, который осуществляет непрерывный прием потоковой информации от бортовых систем техники (тягово-энергетических средств и самоходных комплексов). Указанный модуль выполняет первичную фильтрацию, пространственно-временную привязку (GNSS-координаты) и проверку достоверности пакетов данных. Применение асинхронных протоколов передачи гарантирует сохранность телеметрии в условиях нестабильного покрытия сотовой сети на удаленных сельскохозяйственных угодьях. Дополнительно на данном уровне функционирует модуль интеграции с внешними информационными системами, агрегирующий данные о возмущающих воздействиях среды (метеорологические сводки, карты полей, данные с роботизированных беспилотных систем).

Накопление исторических данных для ретроспективного анализа и буферизация оперативных потоков реализуются посредством консолидированного хранилища данных.

Второй уровень - прогностический (предиктивный). Данный блок выступает вычислительным ядром системы, реализующим алгоритмы машинного обучения, обоснованные в Главе 3. Целью прогностического уровня является снижение стохастической неопределенности и перевод первичных данных в вероятностные оценки состояния системы. Входящий в его состав модуль конструирования признакового пространства выполняет векторизацию и тензорное преобразование поступающих потоков данных в формат, пригодный для обработки нейронными сетями. Непосредственная оценка текущего и будущего состояний системы осуществляется ансамблем предиктивных моделей. Результатом работы данного комплекса математически-информированных нейросетевых моделей выступает вектор вероятностей состояний природы P_{est} агрегирующий вероятности изменения погодных условий, риски отказов техники и вероятность закрытия благоприятных агротехнических периодов.

Третий уровень - аналитический (прескриптивный уровень принятия решений). Указанный контур является центральным управляющим элементом архитектуры, реализующим строгий математический аппарат теории принятия решений, разработанный в Главе 2. Модуль математического районирования и оптимизации оперирует оцифрованными картами районирования и матрицами технологической эффективности E . Принимая на вход вектор вероятностей P_{est} т предиктивного уровня, модуль определяет топологическое положение текущей логистической ситуации в конкретной зоне доминирования оптимальной стратегии распределения ресурсов. Сопряженный блок оценки устойчивости вычисляет метрику надежности найденного решения (метрическое расстояние до линий безразличия). При выявлении неустойчивости инициируется протокол снижения рисков, детерминирующий переход к минимаксным стратегиям по критерию Вальда. Для последующей интерпретации модуль семантического

структурирования контекста преобразует результаты математической оптимизации в стандартизированный машинно-читаемый формат (JSON/XML), формируя исчерпывающее описание ситуации.

Четвертый уровень - когнитивно-интерпретационный (уровень человеко-машинного взаимодействия). Данный уровень отвечает за реализацию концепции объяснимого искусственного интеллекта (XAI) и обеспечение доверия диспетчерского аппарата к выдаваемым рекомендациям. Функционирование контура базируется на модуле генеративного искусственного интеллекта, ядром которого выступает специализированная большая языковая модель (LLM). Модель принимает на вход структурированный контекст от аналитического уровня и генерирует текстовое обоснование выбора стратегии на естественном профессиональном языке. Задача модуля заключается в трансляции математических аргументов (в частности, метрик устойчивости) в формализованные логистические термины, описывающие риски простоев и необходимость ввода резервного транспорта. Взаимодействие с пользователем осуществляется через автоматизированное рабочее место (АРМ) логиста-диспетчера, представляющее собой веб-интерфейс для геоинформационной визуализации парка техники, отображения аналитических таблиц и диалоговой панели рекомендаций [84, 85].

Схема информационного взаимодействия модулей в рамках предложенной архитектуры представлена на рисунке 4.1.

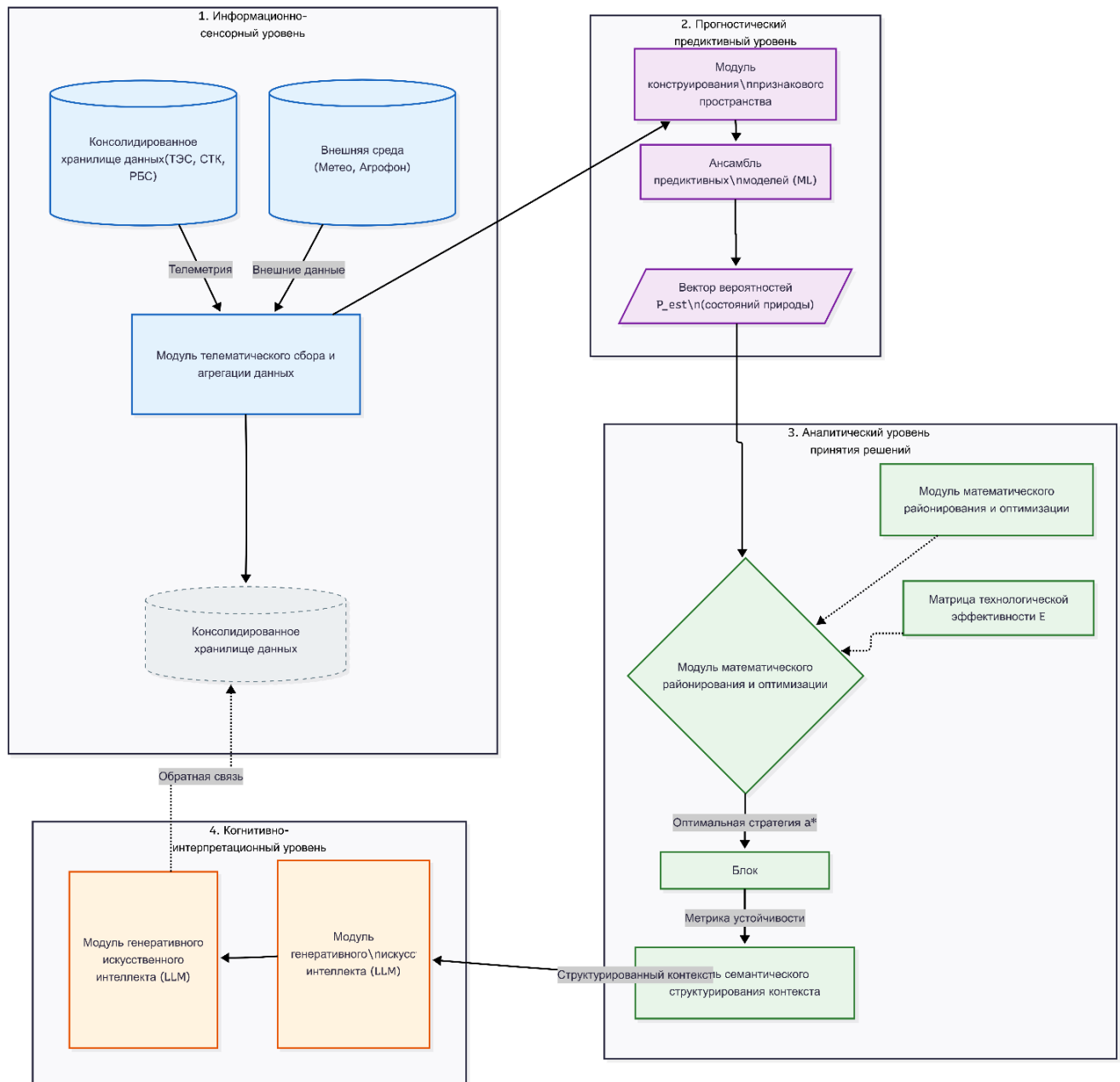


Рисунок 4.1 - Концептуальная схема архитектуры гибридной СППР

Синтезированная иерархическая архитектура обеспечивает строгое разделение ответственности между вычислительными парадигмами. Прогностический уровень работает с массивами данных и неопределенностью среды; аналитический уровень гарантирует строгую математическую логику выбора и исключает риск генерации фактологических искажений (стохастических артефактов) при принятии решений; когнитивный уровень обеспечивает эффективную коммуникацию с оператором, повышая оперативность и точность диспетчеризации логистических процессов.

4.2. Разработка модуля объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) на базе больших языковых моделей

Фундаментальным барьером для внедрения интеллектуальных систем управления в реальный сектор экономики выступает проблема непрозрачности нейросетевых вычислений. Логистические решения, синтезированные на основе многомерных тензоров и стохастических карт районирования (обоснованных в Главах 2 и 3), будучи математически оптимальными, зачастую контринтуитивны для человека-оператора (диспетчера). Интеграция концепции объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) призвана устранить семантический разрыв между формальным математическим выводом алгоритма и когнитивной моделью лица, принимающего решения (ЛПР) [86-90].

В качестве технологической основы модуля ХАИ применены большие языковые модели (LLM), архитектура которых обеспечивает эффективную обработку контекстных зависимостей и генерацию связного текста [91]. Вместе с тем, использование генеративного искусственного интеллекта общего назначения в контуре управления критически важными транспортными процессами недопустимо вследствие риска генерации фактологических искажений (стохастических артефактов) и отсутствия профильных знаний.

Для адаптации указанной технологии к задачам транспортной логистики АПК разработан комплекс алгоритмических решений, включающий предметную адаптацию, детерминированную параметрическую стабилизацию и семантическое структурирование контекста.

Первоначальным этапом выступает предметная адаптация, в рамках которой семантическое ядро модели настраивается на оперирование специфической терминологией (ТЭС, СТК, агротехнические периоды, тяговый класс). Указанная задача решается посредством процедуры предметно-ориентированного дообучения на специализированном корпусе данных. В процессе дообучения модель настраивается на следование строгой логике эксперта-логиста, включающей идентификацию критических ограничений (например, прогноза осадков или высокой вероятности отказа техники),

связывание физических ограничений с выбранной математической стратегией (в частности, обоснование перехода к минимаксной стратегии по критерию Вальда) и формулирование управленческих директив в императивном стиле. Данный подход обеспечивает корректную интерпретацию абстрактных математических категорий (устойчивость решения, зона доминирования), транслируя их на язык производственных логистических задач.

Вторым этапом является детерминированная параметрическая стабилизация генерации. В отличие от задач синтеза творческого контента, где применяются высокие значения стохастичности (температуры) для обеспечения вариативности текста, в оперативном управлении логистикой вариативность выступает критическим недостатком. Идентичное состояние системы должно гарантированно порождать однозначную управленческую интерпретацию. В связи с этим для модуля ХАІ устанавливается режим детерминированной генерации: параметры стохастичности минимизируются, а ядро сэмплирования фиксируется на значениях, отсекающих маловероятные лингвистические конструкции. Указанный подход обеспечивает максимальную фактологическую точность вывода модели и исключает риск искажения математического решения.

Заключительным этапом выступает семантическое структурирование информационного обмена. Связь между аналитическим уровнем (математическое ядро, обоснованное в Главе 2) и когнитивным уровнем осуществляется посредством передачи структурированного контекста. Во избежание переполнения контекстного окна модели и потери фокуса внимания первичные телеметрические данные подвергаются предварительной агрегации. Модуль семантического структурирования преобразует результаты работы математических алгоритмов в стандартизированный иерархический формат. В качестве стандарта сериализации данных выбран формат JSON, обеспечивающий высокую скорость обмена сообщениями между микросервисами и высокую скорость десериализации в современных языковых моделях. Концептуальная структура передаваемого контекста представлена в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Структура семантического контекста для модуля интерпретации (XAI)

Логический блок	Передаваемые параметры	Логистический смысл данных
Состояние системы	Временная метка, тип операции, уровень энтропии среды, вероятности погодных явлений.	Описание текущей стохастической ситуации и уровня неопределенности (на основе Главы 3).
Ресурсы	Идентификаторы техники, классы (M1, M2, M3), статус предиктивного обслуживания (PdM).	Оценка фактической доступности парка техники и рисков внезапных отказов.
Ядро принятия решений	Выбранная стратегия, примененный критерий (например, Вальда), метрика устойчивости решения.	Математическое обоснование выбора, расчетное расстояние до границ смены стратегий (из Главы 2).
Альтернативы	Отвергнутые стратегии и ассоциированные с ними факторы риска.	Оценка упущенной выгоды или потенциального ущерба при отклонении от рекомендованного плана.

Практическая реализация данной информационной модели в виде сериализованного объекта, генерируемого математическим ядром системы и передаваемого на вход LLM, представлена в Листинге 4.1.

Листинг 4.1 - Пример структуры входного контекста для модуля XAI (JSON)

```
JSON
{
  "system_state": {
    "timestamp": "2024-05-20T08:00:00",
    "operation_type": "Посев зерновых",
    "uncertainty_level": "HIGH", // Высокая энтропия (из Гл. 2.3)
    "weather_forecast": {
      "precipitation_prob": 0.65,
      "soil_condition": "trafficable_risk"
    }
  },
  "resources": {
    "active_units": [
      {"id": "TES-101", "class": "M3", "status": "OK"},
      {"id": "TES-104", "class": "M3", "status": "PRE_FAIL_WARN"} // Прогноз PdM (из Гл. 3)
    ]
  },
  "decision_core": {
    "selected_strategy": "STRATEGY_B (Conservative)",
    "criterion_used": "WALD", // Критерий Вальда (из Гл. 2.4)
    "robustness_metric": 0.12, // Низкая устойчивость решения
    "reasoning": "Vector P_est crossed indifference line Z1-Z2"
  },
  "alternatives": [
```

```

{
  "strategy": "STRATEGY_A (Aggressive)",
  "risk_factor": "Potential downtime 4h if rain starts"
}
]
}

```

Представленная структура выступает стандартизированным информационным шлюзом между детерминированной математикой и стохастической лингвистикой, гарантируя опору языковой модели исключительно на верифицированные расчетные данные.

Для обработки структурированного контекста применяется алгоритм конструирования контекстных запросов, базирующийся на методе пошагового логического вывода (декомпозиции рассуждений). Базовая ролевая установка задает модели жесткую структуру вывода, включающую три обязательных блока: управленческую директиву (четкое указание к действию, включая перемещение техники или смену стратегии), аналитическое обоснование (объяснение причины выбора с опорой на метрику устойчивости и вероятностный прогноз) и оценку рисков (описание последствий в случае выбора альтернативного, отвергнутого сценария).

Пример синтезированного объяснения, выводимого на терминал диспетчера:

«Рекомендация: Перевести логистическое звено №2 на участок «Северный» и применить консервативную стратегию минимизации простоев (согласно критерию Вальда). Рекомендуется превентивная замена тягового средства ТЭС-104 на резервную единицу.

Обоснование: Высокая вероятность осадков (65%) в сочетании с риском отказа гидравлической системы на ТЭС-104 (по данным предиктивной аналитики) снижают метрику устойчивости агрессивной стратегии до критического уровня (0.12). Текущий вектор состояния системы пересек границу зоны доминирования стратегии максимальной производительности.

Риски отклонения: Сохранение текущего операционного плана

(Стратегия А) при реализации негативного погодного сценария приведет к простоя посевного комплекса длительностью до 4 часов.»

Следовательно, предложенная архитектура гарантирует, что искусственный интеллект не принимает логистические решения самостоятельно, а выступает исключительно в роли высококвалифицированного транслятора, переводящего строгие результаты математической оптимизации на язык практических управленческих решений. Указанное ограничение исключает риск непредсказуемых последствий при автоматизированном управлении транспортно-логистической системой.

4.3. Программная реализация и интеграция компонентов системы

Практическая апробация разработанного научно-методического аппарата потребовала создания программного комплекса, объединяющего разнородные вычислительные модули в единый контур управления транспортно-логистической системой. Для обеспечения отказоустойчивости системы в периоды пиковых логистических нагрузок (посевная и уборочная кампании) программная реализация выполнена на основе сервис-ориентированной архитектуры. Данный подход обеспечивает независимое масштабирование вычислительных мощностей и технологическую изоляцию базовых компонентов: математического ядра, предиктивных моделей машинного обучения и модуля генеративного искусственного интеллекта. В качестве базовой среды разработки применен язык Python, выступающий общепризнанным вычислительным стандартом для решения задач исследования операций и анализа данных. Программная реализация декомпозирована на ряд функциональных блоков [94, 95].

Первым функциональным блоком выступает математическое и предиктивное ядро системы, инструментарий которого обеспечивает реализацию алгоритмов, теоретически обоснованных в Главах 2 и 3. Для выполнения матричных вычислений, реализации алгоритмов работы с симплексом вероятностей (метод районирования) и расчета матриц

технологической допустимости применена библиотека векторных вычислений NumPy. Решение оптимизационных задач и вычисление метрик устойчивости, определяемых как евклидовы расстояния до гиперплоскостей безразличия, реализованы средствами библиотеки научных вычислений SciPy. В свою очередь, архитектура математически-информированной модели, включающая LSTM-блоки для обработки временных рядов телеметрии, синтезирована на базе фреймворка глубокого обучения PyTorch. Использование указанного фреймворка детерминировано поддержкой динамических вычислительных графов, наличие которых является обязательным условием для реализации специализированной функции потерь $\mathcal{L}_{total}$, учитывающей логистические ограничения и формализующей штраф за нарушение оптимальности принимаемых решений.

Вторым структурным элементом является подсистема агрегации и хранения логистических данных. Принимая во внимание разнородность поступающей информации, в системе реализован гибридный подход к хранению данных. Статические параметры, включающие эксплуатационные профили техники и справочники агротехнических нормативов, консолидируются в классической реляционной системе управления базами данных (PostgreSQL) [96]. Динамические временные ряды телеметрии, объединяющие потоки пространственных координат и диагностических данных от бортовых систем техники, агрегируются в специализированной СУБД, оптимизированной для работы с временными рядами. Указанный подход обеспечивает эффективное применение оконных функций при формировании многомерных тензоров для последующей обработки предиктивным модулем машинного обучения [97].

Третьим функциональным блоком выступает подсистема интеграции и маршрутизации данных. Взаимодействие между микросервисами организовано по гибридной схеме, учитывающей специфику сельскохозяйственной логистики. В качестве точки входа для телеметрических устройств функционирует специализированный информационный шлюз. Прием данных осуществляется по легковесному протоколу MQTT, гарантирующему доставку пакетов телеметрии

в условиях нестабильного покрытия сотовой сети на удаленных производственных участках. Для предотвращения потери информации при пиковых нагрузках, характеризующихся одновременной работой десятков единиц техники, реализована буферизация данных посредством брокера асинхронных сообщений (RabbitMQ). Сервисы аналитики и принятия решений функционируют в качестве независимых подписчиков очередей данных: они извлекают пакеты телеметрии, выполняют вычисления предиктивных моделей и рассчитывают оптимальную стратегию, транслируя результат во внутреннюю шину данных. Для координации взаимодействия с языковой моделью в сервисе когнитивной интерпретации применен специализированный фреймворк (LangChain). В целях обеспечения информационной безопасности и защиты коммерческой тайны агропредприятия (координаты полей, урожайность) вычисления генеративной модели реализованы в локальном изолированном контуре с использованием оптимизированных сред исполнения и методов квантования весовых коэффициентов, что исключает необходимость передачи данных в сторонние облачные сервисы.

Четвертым элементом архитектуры является геоинформационный интерфейс диспетчера. Клиентская часть системы, представляющая собой автоматизированное рабочее место (АРМ) логиста, реализована в виде веб-ориентированного приложения с применением современных библиотек построения пользовательских интерфейсов. Фундаментальным компонентом АРМ выступает геоинформационный модуль, обеспечивающий визуализацию пространственного положения техники, динамическое отображение аналитических панелей с текущими вероятностями (прогноз погоды, оценка технического состояния узлов) и вывод текстовых обоснований от модуля когнитивной интерпретации. Указанный интерфейс предоставляет лицу, принимающему решения, функционал для подтверждения или отклонения предложенной логистической стратегии.

Заключительным аспектом программной реализации выступает развертывание и обеспечение отказоустойчивости. Для гарантии

воспроизводимости среды исполнения и упрощения процесса обновления предиктивных моделей без прерывания процессов диспетчеризации все компоненты системы изолированы с применением технологий контейнеризации (Docker). Управление кластером контейнеров осуществляется средствами специализированных систем (Docker Compose для локальных инсталляций в масштабах отдельного хозяйства или Kubernetes для облачных решений на уровне агрохолдингов).

Предложенная программная архитектура обеспечивает требуемую вычислительную производительность для функционирования в режиме, близком к реальному времени. Разработанный комплекс служит надежной технологической платформой для проведения экспериментальных исследований и оценки эффективности предложенного научно-методического аппарата.

4.4. Стратегия развертывания интеллектуальной системы управления на агропромышленном предприятии

Внедрение разработанной гибридной системы поддержки принятия решений (СППР) в реальную производственную практику агропромышленного комплекса требует учета существующего информационного ландшафта предприятия и специфики накопления эксплуатационных данных. Предлагаемая стратегия развертывания базируется на принципах бесшовной интеграции и поэтапной эволюции алгоритмов управления [98, 99].

1. Интеграция в информационный ландшафт предприятия
Разработанная СППР не заменяет базовые учетные системы хозяйства, а позиционируется как интеллектуальная аналитическая надстройка, интегрируемая с действующей ИТ-инфраструктурой:

- Интеграция с ERP-системами (например, 1С:ERP Агропромышленный комплекс): обеспечивает автоматическую загрузку нормативно-справочной информации (реестр парка техники, штатное расписание механизаторов, технологические карты возделывания культур) и директивных агротехнических сроков. Это формирует базис для расчета статической части матрицы технологической допустимости [100, 101].

- Интеграция с базовыми системами телематики: система способна получать данные как напрямую с CAN-шин тракторов, так и через API существующих платформ мониторинга (Wialon, АвтоГРАФ, RSM Agrotronic, John Deere Operations Center). Это снижает капитальные затраты предприятия на дооснащение парка дополнительными датчиками.

- Взаимодействие с агрономическими сервисами: получение геоконтуров полей, карт предписаний (для дифференцированного внесения) и локальных метеосводок для формирования вектора состояния внешней среды.

2. Преодоление проблемы «холодного старта»

Критическим барьером при внедрении интеллектуальных систем управления, основанных на машинном обучении, является отсутствие репрезентативной исторической выборки данных на начальном этапе эксплуатации (проблема «холодного старта»). Особенностью предложенной гибридной архитектуры является способность обеспечивать поддержку принятия логистических решений с первого дня внедрения, реализуя стратегию поэтапной эволюции от экспертно-нормативной к адаптивной модели управления.

Жизненный цикл развертывания системы декомпозируется на две фазы, различающиеся источниками данных для формирования Матрицы эффективности (E) и вектора вероятностей (P_{est}).

Фаза 1. Экспертно-нормативный режим (Инициализация системы).

На данном этапе, характеризующемся дефицитом накопленной локальной телеметрии, система функционирует на базе детерминированного математического ядра (описанного в Главе 2), минуя предиктивный ML-уровень.

- Формирование Матрицы эффективности (E): базируется на паспортных технических характеристиках парка (ТЭС, СТК) и нормативных показателях выработки, утвержденных профильными ведомствами или производителями техники (на основе классификаций, приведенных в Главе 1). Коэффициенты технической готовности на данном этапе принимаются равными нормативным значениям.

– Оценка неопределенности (P_{est}): вектор вероятностей состояний среды формируется методом экспертных оценок. Лицо, принимающее решения (главный агроном, логист), вводит качественное ранжирование сценариев (например, вероятность дождя выше вероятности засухи), которое система автоматически преобразует в строгие численные значения с использованием математического аппарата оценок Фишберна (согласно формуле 2.8).

Результат Фазы 1: СППР генерирует маршруты и распределяет технику, гарантируя соблюдение базовых агротехнических норм и минимизацию грубых логистических ошибок согласно формализованному экспертному опыту.

Фаза 2. Адаптивный режим (Эксплуатация).

По мере накопления локальных данных телеметрии и истории выполненных операций происходит автоматическая калибровка системы и фоновое дообучение ML-компонентов (Глава 3).

– Динамическая коррекция матриц: нормативные значения производительности и расхода топлива плавно замещаются фактическими эмпирическими показателями, рассчитанными на основе статистики конкретного хозяйства. Это позволяет учесть реальный физический износ парка и специфику локального рельефа (агрофона).

– Правило перехода между режимами. Переход от экспертно-нормативного режима к адаптивному не может задаваться назначенным объёмом накопленных данных: одно и то же число машино-часов телеметрии при различном составе наблюдаемых состояний среды обеспечивает существенно различное качество прогноза, вследствие чего критерий, основанный только на объёме выборки, не характеризует готовности системы к переключению. Под переходом между режимами здесь понимается смена источника формирования вектора вероятностей состояний среды - от экспертных оценок Фишберна к выходу предиктивной модели; этот механизм следует отличать от смены решающего критерия (перехода между критериями Байеса и Вальда), рассматриваемой в главе 5, действуют на разных уровнях и независимы, поэтому установленные в подразделе 5.5 свойства механизма смены критерия к правилу

перехода между режимами не относятся. Решающее правило перехода строится на том же функционале ожидаемых потерь, что применяется при обучении предиктивной модели, чем обеспечивается согласованность критерия переключения с критерием качества.

Обозначим через Ω_{val} отложенную выборку моментов принятия решений, не участвовавших в обучении, а через $\Delta(P)$ - ожидаемые потери от выбора стратегии по вектору вероятностей P относительно выбора при точном знании реализовавшегося распределения:

$$\Delta(P, P^{fact}) = \max_i (E P^{fact})_i - (E P^{fact})_{i^*(P)}, \quad i^*(P) = \arg \max_i (E P)_i, \quad (4.1)$$

где: E - матрица эффективности;

$i^*(P)$ - номер стратегии, избираемой по вектору P .

Величина Δ неотрицательна и обращается в нуль, когда прогноз приводит к тому же решению, что и точное знание состояния среды. Переход в адаптивный режим выполняется при одновременном выполнении четырёх условий.

Первое условие - статистически значимое превосходство машинного прогноза над экспертными оценками по ожидаемым потерям:

$$H_0: \text{med}[\Delta(P^{exp}) - \Delta(P^{ML})] = 0, \quad H_1: \text{med}[\Delta(P^{exp}) - \Delta(P^{ML})] > 0, \quad (4.2)$$

где: P^{exp} - вектор, сформированный оценками Фишберна;

P^{ML} - выход предиктивной модели.

Нулевая гипотеза проверяется парным критерием Уилкоксона на выборке Ω_{val} при уровне значимости 0,05; переход допускается при её отклонении. Парный характер сопоставления обеспечивается тем, что оба вектора формируются для одних и тех же моментов принятия решений.

Второе условие - достижение прогнозом абсолютного порога качества, а не только превосходства над экспертной базой. Относительный критерий (4.2) сам по себе недостаточен: при слабой экспертной базе машинная модель может превзойти её, оставаясь плохо откалиброванной. Поэтому дополнительно требуется, чтобы на отложенной выборке ожидаемая ошибка калибровки прогноза (ECE) и оценка Бриера (BS) не превышали установленных порогов:

$$ECE(P^{ML}; \Omega_{val}) \leq \varepsilon_{cal}, \quad BS(P^{ML}; \Omega_{val}) \leq BS_{max}, \quad (4.3)$$

Пороговые значения приняты $\varepsilon_{cal} = 0,05$ и $BS_{max} = 0,25$; в вычислительных экспериментах (подраздел 5.5) достигнуты значения 0,0103 и 0,126 соответственно, то есть условие выполняется с запасом. Одновременно контролируется сходимость фоновое дообучения: обучение считается завершённым, когда медиана ожидаемых потерь $\Delta(P^{ML})$ на выборке Ω_{val} перестаёт улучшаться более чем на заданную величину η на протяжении нескольких последовательных эпох дообучения (правило ранней остановки). Тем самым переключение привязано к достигнутому и стабилизировавшемуся качеству прогноза, а не к моменту начала обучения.

Третье условие - представительность накопленной выборки. Каждое состояние среды должно быть представлено в отложенной выборке числом наблюдений не менее n_{min} :

$$\min_j |\{t \in \Omega_{val} : \pi(t) = \pi_j\}| \geq n_{min}, \quad (4.4)$$

Условие существенно, поскольку редкие состояния среды определяют положение границ областей доминирования, и их отсутствие в выборке делает оценку ожидаемых потерь смещённой. Значение n_{min} задаёт требуемый объём данных в терминах числа наблюдаемых событий на состояние и устанавливается исходя из точности оценки долей состояний: при доверительной вероятности 0,95 и предельной погрешности 0,1 оно составляет порядка ста наблюдений на состояние. Тем самым достаточность накопленных данных выражается не абстрактным сроком эксплуатации, а конкретным числом зарегистрированных событий каждого типа.

Четвёртое условие - принадлежность текущих значений наблюдаемых признаков области, покрытой обучающей выборкой. Контроль осуществляется по квадрату расстояния Махаланобиса от вектора признаков до центра обучающего распределения:

$$d_M^2(x) = (x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu) \leq \chi_{p; 0.99}^2, \quad (4.5)$$

где: μ и Σ - среднее и ковариационная матрица признаков обучающей выборки;

p - размерность признакового пространства.

Поскольку при нормальной аппроксимации квадрат расстояния Махаланобиса распределён по закону χ^2 с p степенями свободы, порог принимается равным квантили $\chi^2_{p;0.99}$, где его превышение означает выход за область обучения, при котором прогноз модели не обеспечен данными, и переход блокируется.

Обратный переход в экспертно-нормативный режим выполняется при наступлении любого из событий: прекращении поступления телеметрических данных на интервале, превышающем установленный; выходе признаков за область обучения (нарушении условия (4.5)); утрате превосходства машинного прогноза, устанавливаемой повторной проверкой условия (4.2) по скользящему окну отложенной выборки. Во избежание многократных переключений вблизи границы вводится гистерезис: переход в адаптивный режим выполняется при достигнутом уровне значимости не выше 0,05, тогда как возврат в нормативный режим - при уровне выше 0,20; дополнительно устанавливается минимальная продолжительность пребывания в режиме, в течение которой повторное переключение не производится. Правило определяет момент перехода не объёмом накопленных данных как таковым, а достигнутым и подтверждённым качеством порождаемых решений, вследствие чего оно применимо при любом составе парка и любой интенсивности эксплуатации, а требуемый объём данных выражается измеримым числом наблюдений на каждое состояние среды (4.4).

Предложенная двухуровневая стратегия развертывания обеспечивает непрерывность логистического управления и высокую отказоустойчивость. В случае сбоя сенсорного оборудования, потери связи с техникой или появления аномальных выбросов в данных, система автоматически «деградирует» (откатывается) до нормативного режима фазы 1. Это гарантирует сохранение способности выдавать математически обоснованные рекомендации при любых возмущающих воздействиях, что является ключевым требованием к промышленным логистическим системам.

4.5 Выводы по главе

На основании проведенных в четвертой главе исследований, направленных на программно-архитектурную реализацию разработанной методологии управления транспортно-логистическими процессами, можно сформулировать следующие основные выводы:

1. **Синтезирована иерархическая четырехкомпонентная архитектура гибридной СППР**, построенная по принципу замкнутого контура управления киберфизической системой. В отличие от существующих решений, предложенная структура обеспечивает бесшовную интеграцию сенсорных потоков телеметрии, прогностических моделей машинного обучения, детерминированного математического аппарата принятия решений и когнитивных модулей интерпретации. Это позволяет трансформировать «сырые» сигналы мониторинга в обоснованные управленческие директивы с высоким уровнем доверия со стороны ЛПР.

2. **Разработана методология реализации «объяснимого искусственного интеллекта» (XAI)** в контуре управления логистикой агропредприятия. Ключевым результатом является создание формализованного протокола информационного обмена (на базе структурированного семантического контекста), позволяющего транслировать сложные математические категории (уровень энтропии, метрики устойчивости, зоны доминирования стратегий) в понятные диспетчеру логистические рекомендации. Доказано, что применение детерминированной параметрической стабилизации генерации текста исключает риск «галлюцинаций» языковой модели, гарантируя фактологическую точность управленческих интерпретаций.

3. **Обоснован выбор сервис-ориентированной технологической платформы** для программной реализации СППР. Использование брокеров асинхронных сообщений и специализированных СУБД для временных рядов обеспечивает высокую производительность системы в периоды пиковых сезонных нагрузок на транспортно-логистическую сеть. Особую значимость имеет предложенная схема локального развертывания языковых моделей, что

гарантирует информационную безопасность и защиту коммерческой тайны предприятия в части данных об урожайности и координатах ресурсов.

4. Сформулирована комплексная стратегия поэтапного развертывания системы, решающая проблему «холодного старта». Разработан двухфазный механизм перехода от экспертно-нормативного режима (на основе оценок Фишберна) к адаптивному режиму (на основе машинного обучения). Критерий перехода формализован не через назначенный объём накопленных данных, а через статистически значимое превосходство машинного прогноза по ожидаемым потерям от выбора стратегии при одновременном выполнении условий абсолютного качества прогноза (калибровки и сходимости дообучения), представительности отложенной выборки и принадлежности наблюдаемых признаков области обучения. Механизм автоматической «деградации» до нормативного режима при технических сбоях обеспечивает непрерывность логистических процессов.

5. Программная реализация СППР в виде аналитической надстройки над ERP-системами и платформами телематики подтверждает практическую применимость предложенной методологии. Созданная архитектура полностью соответствует требованиям современности к интеллектуализации транспорта и создает необходимый технологический базис для проведения экспериментальной проверки эффективности разработанных алгоритмов в реальных условиях эксплуатации агропромышленного комплекса.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОЛОГИИ

5.1. Цели, задачи и методика проведения экспериментальных исследований

Целью вычислительного эксперимента является установление того, обеспечивает ли разработанная схема оперативного управления, объединяющая прогнозирование распределения вероятностей режимов ограничения пропускной способности звеньев с выбором стратегии по методу районирования симплекса вероятностей, повышение эффективности функционирования уборочно-транспортного звена по сравнению со стратегиями, не использующими прогнозной информации, а также в установлении вклада отдельных элементов разработанного контура в достигаемый результат.

Проверке подлежат три утверждения, сформулированные до проведения вычислений. Первое состоит в том, что предложенная схема обеспечивает более высокие значения интегрального показателя по сравнению со стратегией постоянного привлечения дополнительного ресурса и со стратегией его полного неиспользования. Второе состоит в том, что достигаемое преимущество порождается введением компоненты, штрафующей экономические последствия ошибки прогноза, в целевую функцию обучения предиктивной модели, а не самим фактом применения нейросетевой модели. Третье состоит в том, что метрика устойчивости решения несёт информацию о риске неоптимального выбора, а построенный на ней механизм смены критерия снижает потери. Каждому утверждению сопоставлена статистическая формулировка: нулевая гипотеза состоит в равенстве нулю медианы парной разности значений интегрального показателя между сопоставляемыми конфигурациями, альтернативная гипотеза односторонняя.

Предварительная фиксация состава утверждений, системы показателей и решающих правил до начала вычислений составляет существенный элемент методики: при заранее определённых критериях результаты сохраняют доказательную силу независимо от их знака, тогда как формулирование

утверждений после получения числовых значений превращает эксперимент в подбор подтверждающих аргументов. Протокол эксперимента с перечнем утверждений, начальными состояниями генератора псевдослучайных чисел, значениями параметров и результатами проверок корректности приведён в приложении.

Сопоставлению подлежат шесть конфигураций управления, состав которых приведён в таблице 5.1. Первые две воспроизводят практику диспетчеризации без применения прогнозной информации и соответствуют агрессивной и консервативной стратегиям. Конфигурации c2 и c5 введены как отделяющие: первая отличается от полной схемы отсутствием экономической компоненты в целевой функции обучения, вторая - отсутствием механизма смены критерия. Их наличие позволяет установить вклад каждого элемента новизны отдельно. Конфигурация c4 отвечает управлению при точном знании реализующегося состояния среды; она недостижима практически, но задаёт верхнюю границу и позволяет выразить результат как долю теоретически достижимого выигрыша.

Таблица 5.1 - Состав сопоставляемых конфигураций управления

Обозначение	Наименование	Отличительный признак
c0	Агрессивная	постоянное применение стратегии a1
c1	Консервативная	постоянное применение стратегии a2
c2	Прогноз без экономической компоненты	обучение при $\lambda = 0$
c3	Полная схема	обучение при $\lambda = \lambda^*$, смена критерия при $d < \delta$
c4	Точное знание состояния среды	верхняя граница достижимого
c5	Без смены критерия	$\delta = 0$

Решение принимается с интервалом четыре часа, что даёт девятно шесть моментов принятия решений на одной реализации. Прогноз строится на горизонт упреждения восемь часов по окну предыстории продолжительностью двадцать четыре часа.

Схема сопоставления принята парной. Реализации внешней среды порождаются и сохраняются полностью до запуска конфигураций, вследствие

чего все конфигурации функционируют на одних и тех же реализациях; это устраняет межсерийную составляющую дисперсии и повышает чувствительность статистических критериев при том же числе прогонов. Применение общих случайных чисел потребовало отдельных потоков псевдослучайных величин для метеорологического процесса, шума измерения, порогов наступления отказов, продолжительностей восстановления, вариативности выработки и урожайности. При едином потоке изменение числа обращений к генератору в одной конфигурации нарушило бы синхронизацию реализаций. Независимость реализаций среды от применяемой конфигурации подтверждена программной проверкой.

Число независимых реализаций принято равным тремстам. Предварительная оценка при парной схеме, ожидаемом размере эффекта порядка 0,4 и требуемой мощности 0,9 даёт величину порядка ста двадцати - ста пятидесяти реализаций на одно сравнение; принятое значение обеспечивает запас с учётом расслоения выборки. Множество реализаций разделено на три равные страты по величине экзогенного индекса возмущённости:

$$V(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T 1[\pi(t) \neq \pi_1] + \frac{1}{|M|} \sum_{m=1}^{|M|} (1 - u_m), \quad (5.1)$$

где первое слагаемое которого отражает долю времени пребывания среды вне благоприятного режима, а второе - предрасположенность парка к отказам. Индекс вычисляется исключительно по сохранённой реализации среды и от конфигурации управления не зависит, вследствие чего состав страт одинаков для всех конфигураций. Распределение индекса и границы страт приведены на рисунке 5.3. Множества реализаций, используемые для обучения предиктивной модели, для проверки постановки задачи, для основной серии и для серии при нарушенных допущениях, не пересекаются по начальным состояниям генератора: оценка качества управления на реализациях, использованных при обучении, приводит к завышенным оценкам и настоящей методикой исключена.

Система показателей включает семнадцать величин, разделённых на четыре группы: частные критерии, определяющие элементы матрицы

эффективности; показатели результата функционирования звена; показатели качества вероятностного прогноза; показатели, относящиеся к метрике устойчивости и механизму смены критерия. Основным показателем выступает накопленная операционная эффективность за горизонт моделирования

$$J(c, \omega) = \sum \left[c_y \Delta Y_k - C_k^{fuel} - C_k^{lab} - C_k^{am} - C_k^{dry} - C_k^{hire} - C_k^{rep} \right] - P(c, \omega), \quad (5.2)$$

где: ΔY_k - физический объём принятой продукции за интервал k ;

Последующие слагаемые - затраты на топливо, оплату труда, амортизацию, сушку, привлечение резервного комплекса и ремонтные воздействия;

P - суммарные потери, включающие потери урожая при превышении директивного срока и потери от неубранного остатка.

К показателям результата отнесены также коэффициент технической готовности парка, суммарная продолжительность непроизводительных простоев под выгрузкой, число отказов, наступивших в рабочей фазе цикла, доля использованных агротехнических окон, удельный расход топлива и фактический момент завершения уборки.

Показатели качества прогноза выбраны исходя из существа задачи: метод районирования реагирует на положение вектора вероятностей относительно границ областей доминирования, то есть на калибровку прогнозируемого распределения, а не на его моду, вследствие чего доля верных классификаций пригодности прогноза не характеризует и в состав показателей не включена. Применяются оценка Бриера, логарифмическая функция правдоподобия и ожидаемая ошибка калибровки, а качество прогнозирования отказов характеризуется площадью под характеристической кривой. Показатели заблаговременности выявления неблагоприятного состояния и доли пропусков обнаружения приводятся исключительно совместно, поскольку первый из них без второго допускает тривиальное завышение за счёт повышения порога срабатывания.

Для каждого показателя вычисляются медиана и межквартильный размах по множеству реализаций, а также доверительный интервал медианы, построенный методом бутстрепа при пяти тысячах повторных выборок; применение медианы обусловлено правосторонней асимметрией распределения интегрального показателя, порождаемой редкими аварийными событиями. Статистическая значимость различий устанавливается парным критерием Уилкоксона в односторонней постановке, наряду с достигнутым уровнем значимости приводятся ранговый бисериальный коэффициент корреляции и доля реализаций, на которых одна конфигурация превосходит другую; при множественных сравнениях применяется поправка Холма. Результат дополнительно выражается нормированным показателем реализуемой доли теоретически достижимого выигрыша:

$$\Lambda = \frac{\text{med } J(c3) - \text{med } J(c1)}{\text{med } J(c4) - \text{med } J(c1)}, \quad (5.3)$$

где: Λ - реализуемая доля теоретически достижимого выигрыша;

$\text{med } J(c)$ - медиана интегрального показателя эффективности $J(c, \omega)$ по множеству реализаций ω для конфигурации c (показатель J определен выражением (5.2)).

Показатель вычисляется по медианным значениям, что исключает деление на малые величины на отдельных реализациях. Помимо основной серии проводятся серия при нарушенных допущениях, устанавливающая границы применимости выводов, анализ чувствительности по семи параметрам на подмножестве из ста реализаций и диагностическая серия, в которой прогноз риска отказа вычисляется, но упреждающее обслуживание не выполняется. При действующем вмешательстве, предсказанные отказы устраняются из записи, и измерялся бы остаток после вмешательства, а не качество прогноза.

5.2. Объект моделирования и исходные данные вычислительного эксперимента

Объектом вычислительного эксперимента принято уборочно-транспортное звено зернового производства. Выбор обусловлен тем, что

уборочный период характеризуется наибольшей интенсивностью материального потока и наиболее жёсткими директивными сроками, вследствие чего именно на нём проявляется различие между стратегиями управления; звено содержит все три функциональных класса технических средств, введенных в подразделе 1.3; цепь «уборка - транспортировка - приёмка» образует замкнутую последовательность операций с ограничивающим звеном, положение которого изменяется в зависимости от состояния внешней среды, что и составляет предмет оперативного управления.

Воспроизводится функционирование звена в пределах одного производственного массива на протяжении напряжённого периода продолжительностью шестнадцать суток при директивном агротехническом сроке двенадцать суток. За границами модели оставлены процессы снабжения материально-техническими ресурсами, послеуборочная доработка продукции за пределами приёмного пункта и перебазирование техники между отделениями хозяйства: перечисленные процессы не входят в контур оперативного управления, и их включение увеличило бы размерность задачи без изменения проверяемых положений. Территориальная привязка принята к южной лесостепной зоне Омской области, возделываемая культура - яровая пшеница.

Параметры обслуживаемого массива приведены в таблице 5.2. Разброс значений плеча подвоза задан намеренно, поскольку при равной удалённости всех участков задача распределения транспортных средств вырождается. По признаку удалённости участки разделены на ближнюю зону с плечом подвоза не более двадцати километров и дальнюю с плечом свыше двадцати километров.

Таблица 5.2 - Параметры производственной базы

Участок	Площадь, га	Плечо подвоза, км	Урожайность, т/га	Зона
1	187	14	1,70	ближняя
2	169	19	1,72	ближняя
3	147	11	1,68	ближняя
4	124	27	1,90	дальняя
5	111	34	1,95	дальняя
6	62	23	1,85	дальняя
Всего	800	20,0	1,78	-

Общая площадь массива составляет 800 гектаров, средневзвешенное плечо подвоза 20,0 километра, средневзвешенная урожайность 1,78 тонны с гектара, расчётный валовой сбор 1422 тонны. Ближняя зона включает три участка общей площадью 503 гектара при урожайности 1,70 тонны с гектара, дальняя - три участка площадью 297 гектаров при урожайности 1,91 тонны с гектара. Отрицательная связь между удалённостью участка и его продуктивностью отражает распространённое размещение более плодородных земель на удалении от производственного центра и образует содержательное противоречие между стремлением к увеличению объёма продукции и стремлением к сокращению транспортных затрат. Урожайность каждого участка задаётся реализацией случайной величины с усечённым нормальным распределением при среднеквадратическом отклонении 0,18 тонны с гектара и границах усечения 1,20 и 2,50 тонны с гектара.

Состав парка технических средств приведён в таблице 5.3 в соответствии с функционально-ориентированной классификацией, введённой в подразделе 1.3. Марки технических средств не указываются: привязка к тяговому классу и пропускной способности молотилки достаточна для воспроизводимости результатов, при этом обезличенное описание сохраняет общность выводов.

Таблица 5.3 - Состав парка технических средств

Класс	Тип технического средства	Число единиц	Состав
M2 (СТК)	Зерноуборочный комбайн, вместимость бункера 6,5 т	3	базовый
M2 (СТК)	Зерноуборочный комбайн, привлекаемый из резерва	1	резерв
M1	Автомобиль-зерновоз грузоподъёмностью 11 т	2	базовый
M1	Бункер-перегрузчик вместимостью 14 т	1	базовый
M3 (ТЭС)	Трактор тягового класса 5 по ГОСТ 27021-86	2	базовый
M3 (ТЭС)	Трактор тягового класса 2 по ГОСТ 27021-86	3	базовый

Совокупная численность парка составляет двенадцать единиц, из которых одиннадцать образуют базовый состав, а одна привлекается из резерва хозяйства при реализации соответствующей стратегии. Энергетические средства класса M3 обеспечивают выполнение вспомогательных операций и работу приёмного

пункта, вследствие чего их техническое состояние влияет на пропускную способность приёмно-перерабатывающего звена. Бункер-перегрузчик выступает общим ресурсом звена и применяется при работе на участках дальней зоны независимо от применяемой стратегии.

Соотношение численности уборочных комплексов и транспортных средств выбрано близким к границе сбалансированности звена: при номинальной производительности комбайнов интенсивность поступления продукции составляет 13,3 тонны в час, что сопоставимо с провозной способностью транспортного звена при средневзвешенном плече подвоза. Избыточное транспортное обеспечение устранило бы простои под выгрузкой и обесценило задачу управления, недостаточное привело бы к постоянному дефициту, при котором любая стратегия даёт одинаково низкий результат. Сбалансированность подтверждается вычислением: базовый состав парка при продлённой смене завершает уборку массива за 11,4 суток по медиане сорока реализаций, превышение директивного срока наступает в пяти процентах реализаций, медиана непроизводительных простоев под выгрузкой составляет 6,4 часа. Тем самым парк укомплектован в соответствии с директивным сроком, а привлечение резерва не является безусловно необходимым, что и создаёт предмет выбора.

Эксплуатационные параметры и характеристики надёжности приведены в таблице 5.4. Параметр формы распределения наработки до отказа превышает единицу, что соответствует постепенному характеру отказов и обуславливает применимость предиктивного подхода: при значении параметра, равном единице, интенсивность отказов постоянна, история нагрузок не несёт информации о будущем состоянии и прогнозирование отказа принципиально невозможно. Указанное условие определяет границу применимости результатов главы 3.

Таблица 5.4 - Эксплуатационные параметры и характеристики надёжности

Параметр	Обозначение	Значение
Часовая производительность уборочного комплекса	W^0	2,50 га/ч
Расход топлива на уборке	$g_{уб}$	9,5 кг/га
Расход топлива транспортного средства	$g_{тр}$	0,33 кг/км
Техническая скорость автомобиля-зерновоза	V	40 км/ч
Коэффициент снижения скорости на переувлажнённых дорогах	κ_L	0,55
Пропускная способность приёмного пункта	$\mu_{пр}$	25 т/ч
Производительность сушильного комплекса	$\mu_{суш}$	5 т/ч
Продолжительность работы приёмного пункта в сутки	-	16 ч
Продолжительность смены, стандартная и продлённая	$T_{см}$	12 и 16 ч
Характеристическое время жизни уборочного комплекса	η^0	70 мото-ч
Характеристическое время жизни транспортного средства	η^0	220 мото-ч
Характеристическое время жизни энергетического средства	η^0	250 и 280 мото-ч
Параметр формы распределения наработки до отказа	β	от 1,9 до 2,1
Медиана продолжительности восстановления после отказа	$T_{вос}$	4,0 ч
Остаточное повреждение после отказа и после обслуживания	κ	0,35 и 0,15
Продолжительность упреждающего обслуживания	$T_{то}$	1,5 ч
Горизонт оценки операционной доступности	Δt	8 ч

В соответствии с определением, приведённым в подразделе 2.1, множество состояний природы образует дискретизацию пространства стохастических факторов, а основание дискретизации определяется предметом решаемой задачи. В рамках настоящего эксперимента состояния выделены по признаку звена технологической цепи, выступающего ограничивающим; основанием служит структура материального потока внутрихозяйственной логистической системы, включающая уборочное, транспортное и приёмно-перерабатывающее звенья, каждое из которых при определённом сочетании внешних условий определяет предельную пропускную способность цепи.

Состояние π_1 отвечает режиму, ограничиваемому уборочным звеном: влажность зерна не превышает 16 процентов, несущая способность полевых дорог не снижена, пропускная способность приёмного пункта используется не полностью, вследствие чего определяющим ресурсом выступает время работы самоходных уборочных комплексов. Состояние π_2 отвечает режиму, ограничиваемому приёмно-перерабатывающим звеном: влажность зерна

находится в пределах от 16 до 20 процентов, что требует включения сушильного комплекса, производительность которого ниже интенсивности поступления продукции, вследствие чего наращивание выработки уборочного звена не увеличивает объёма принятой продукции. Состояние π_3 отвечает режиму, ограничиваемому транспортным звеном: относительная влажность почвы превышает 0,70 наименьшей влагоёмкости, несущая способность полевых дорог снижается, техническая скорость движения падает, а участки дальней зоны, расположенные на пониженных элементах рельефа, временно исключаются из отработки. Условия, при которых выполнение работ невозможно, состояния природы не образуют, поскольку в такие периоды выбор стратегии не осуществляется; соответствующие интервалы учитываются как внешние прерывания.

Множество альтернативных стратегий $A = \{a_1, a_2\}$ построено по принципу соответствия каждой стратегии определённому режиму ограничения пропускной способности. Стратегия a_1 предусматривает привлечение резервного уборочного комплекса с почасовой оплатой при продлённой продолжительности смены и направлена на снятие ограничения со стороны уборочного звена. Стратегия a_2 реализует щадящий режим при стандартной продолжительности смены без привлечения резерва и направлена на сокращение эксплуатационных затрат и расходования технического ресурса в условиях, при которых наращивание выработки не увеличивает объёма принятой продукции. Упреждающее техническое обслуживание в множество стратегий не входит, поскольку не является альтернативой распределения ресурсов, и реализуется как постоянный элемент контура управления, режим которого определяется предиктивным модулем главы 3.

Первоначально в состав множества альтернатив входила третья стратегия, предусматривавшая привлечение дополнительных транспортных средств. При проверке невырожденности постановки на калибровочном множестве из шестидесяти реализаций с оценкой погрешности методом бутстрепа установлено, что различие между направлениями усиления звеньев при

сбалансированном составе парка не превышает погрешности оценивания элементов матрицы эффективности, вследствие чего указанная стратегия исключена как избыточная. Данное обстоятельство составляет самостоятельный результат: при сбалансированном составе парка усиление уборочного и транспортного звеньев даёт статистически неразличимый прирост эффективности, поскольку любое из них снимает ограничение с одной и той же пропускной способности цепи.

Стоимостные параметры, применяемые при вычислении элементов матрицы эффективности и интегрального показателя, приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 - Экономические параметры

Параметр	Обозначение	Значение
Закупочная цена зерна	c_y	14 000 руб/т
Стоимость дизельного топлива	c_f	68 руб/кг
Часовая ставка оплаты труда	c_l	450 руб/ч
Амортизационные отчисления, уборочный комплекс	$c_{ам}$	900 руб/маш-ч
Амортизационные отчисления, транспортное средство	$c_{ам}$	320 руб/маш-ч
Стоимость привлечения резервного комплекса	$c_{прив}$	5000 руб/ч
Стоимость сушки продукции	$c_{суш}$	380 руб/т
Стоимость устранения отказа и упреждающего обслуживания	$c_{рем}$	45 000 и 12 000 руб
Суточная доля потерь урожая сверх директивного срока	γ	0,012

Закупочная цена принята в размере 14 000 рублей за тонну без налога на добавленную стоимость, что соответствует середине интервала предельных уровней цен на пшеницу мягкую третьего класса, установленных на период с 1 июля 2026 года по 30 июня 2027 года для проведения государственных закупочных и товарных интервенций: от 13 300 до 14 600 рублей за тонну без налога на добавленную стоимость. Стоимость дизельного топлива 68 рублей за килограмм соответствует 68 000 рублей за тонну при оптовом приобретении наливом и отличается от розничной цены на автозаправочных станциях, составлявшей в рассматриваемый период от 77 до 88 рублей за литр, что при плотности летнего дизельного топлива 0,84 килограмма на литр отвечает 92-105 рублям за килограмм; различие обусловлено отсутствием розничной наценки при оптовом приобретении.

Аддитивная свёртка нормированных частных критериев, введённая выражением (2.3), выполняется при векторе весовых коэффициентов $w = (0,35; 0,25; 0,25; 0,15)$, отвечающем критериям производительности, эксплуатационных затрат, риска нарушения директивных агротехнических сроков и расходования технического ресурса. Значения получены ранжированием частных критериев по значимости с последующим преобразованием рангов аппаратом подраздела 2.3, а чувствительность результатов к вектору весовых коэффициентов исследована в подразделе 5.5. Критерий риска нарушения директивного срока, в отличие от остальных трёх, вычисляется в каждый момент принятия решения по необранному объёму работ и оставшемуся времени, вследствие чего матрица эффективности является функцией состояния выполнения работ.

Значения эксплуатационных параметров и показателей надёжности приняты по нормативным и справочным источникам и представляют собой параметры имитационной модели, а не результаты натурных наблюдений. Целью эксперимента выступает сопоставление конфигураций управления при идентичных условиях внешней среды, вследствие чего абсолютные значения показателей носят условный характер, тогда как предметом анализа являются относительные различия между конфигурациями. Применённая парная схема сопоставления с общими случайными числами обеспечивает работу всех конфигураций на одних и тех же реализациях, вследствие чего погрешность задания параметров действует на них одинаково.

5.3. Модель порождения исходных данных вычислительного эксперимента

Исходные данные порождаются имитационной моделью, воспроизводящей стохастические факторы, недоступные управляющему воздействию. Модель включает три компонента: описание внешней среды, описание технического состояния парка и описание наблюдаемых величин, доступных системе управления. Определяющим требованием выступает независимость порождаемых реализаций от применяемой конфигурации

управления: реализация формируется и сохраняется полностью до запуска расчёта, вследствие чего все конфигурации функционируют в идентичных условиях по построению. Модель порождения данных не содержит структур, воспроизводящих решающие правила системы управления; общими для неё и для контура управления являются исключительно наблюдаемые величины.

Метеорологическая обстановка описывается однородной цепью Маркова с дискретным временем и тремя состояниями при шаге дискретизации один час: состояние s_1 отвечает отсутствию осадков при пониженной относительной влажности воздуха, s_2 - отсутствию осадков при повышенной влажности, s_3 - наличию осадков. Оценивание переходных вероятностей по архиву метеорологических наблюдений не проводилось; матрица восстанавливается косвенно из двух величин, доступных из климатических справочников, - доли времени с осадками в уборочный период и средней продолжительности непрерывного периода с осадками. Выход из бездождевого периода принимается происходящим с одинаковой интенсивностью из состояний s_1 и s_2 , что обеспечивает геометрическое распределение его продолжительности; из условия баланса для состояния с осадками средняя продолжительность бездождевого периода определяется однозначно:

$$D_d = D_r \frac{(1 - p_r)}{p_r}, \quad (5.4)$$

где: p_r обозначает долю времени с осадками;

D_r - среднюю продолжительность периода с осадками.

При принятых значениях $p_r = 0,10$ и $D_r = 5$ ч средняя продолжительность бездождевого периода составляет 45,0 ч. Стационарное распределение восстановленной цепи равно (0,540; 0,360; 0,100), ожидаемые продолжительности непрерывного пребывания в состояниях составляют 12,2, 6,9 и 5,0 ч. Совпадение стационарной доли состояния с осадками и продолжительности периода с осадками с заданными значениями служит внутренними проверками согласованности восстановления. Однородность цепи представляет собой упрощение, при котором внутрисуточная цикличность

вероятности осадков не воспроизводится; обоснование состоит в том, что горизонт моделирования охватывает шестнадцать суток и внутрисуточные колебания усредняются.

Влажность почвы описывается инерционным процессом первого порядка с несимметричной реакцией на увлажнение и просыхание:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{h(t)}{H_a} - \frac{[w(t) - w_{\text{рав}}]}{\tau_{\text{сух}}(\vartheta)}, \quad (5.5)$$

где: w - относительную влажность почвы в долях наименьшей влагоёмкости;

h - интенсивность осадков;

H_a - приведённую влагоёмкость деятельного слоя;

$\tau_{\text{сух}}$ - постоянную времени просыхания, убывающую с ростом температуры воздуха ϑ и составляющую 14,0 ч при опорной температуре 18 °С и 7,8 ч при 25 °С.

Несимметричность реакции существенна содержательно: увлажнение происходит быстро, просыхание медленно, вследствие чего кратковременные осадки исключают участки дальней зоны из отработки на время, многократно превышающее их собственную продолжительность. Именно это свойство порождает содержание задачи оперативного управления. Влажность зерна на корню описывается процессом аналогичной структуры с постоянной времени 4,0 ч и равновесными значениями 12,5, 18,5 и 25,0 процента для трёх метеорологических состояний.

Состояния природы определяются как области в пространстве наблюдаемых физических величин по пороговым значениям, приведённым в таблице 5.6. Существенно, что состояние природы представляет собой детерминированную функцию непрерывных физических величин, а не самостоятельный случайный процесс; такое построение исключает произвол в задании вероятностей состояний, поскольку вероятностный характер порождается исключительно стохастичностью метеорологического процесса. Динамика факторов внешней среды и границы состояний природы для одной реализации приведены на рисунке 5.1. При принятой параметризации средние

доли времени пребывания в трёх состояниях, вычисленные по тридцати реализациям, составляют 0,535, 0,313 и 0,152, интервал между пятым и девяносто пятым процентилями доли благоприятного состояния составляет от 0,36 до 0,71, медианная продолжительность непрерывного благоприятного периода равна 11,0 ч, доля периодов продолжительностью менее шести часов составляет 0,26. Наличие существенного разброса между реализациями при устойчивом среднем обеспечивает возможность расслоения множества реализаций по интенсивности возмущений.

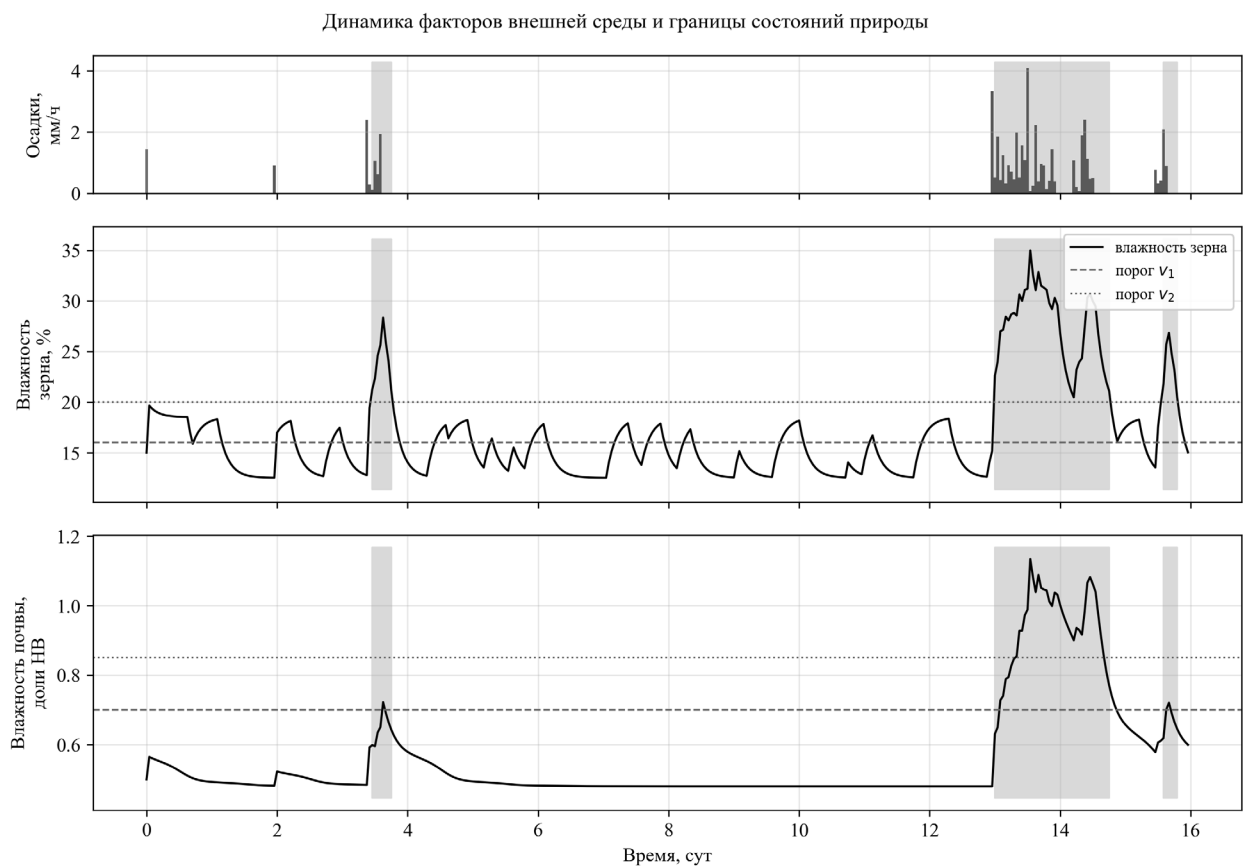


Рисунок 5.1 - Динамика факторов внешней среды и границы состояний природы

Техническое состояние каждой единицы техники описывается скалярной переменной приведённой наработки, накапливаемой с интенсивностью, зависящей от режима эксплуатации, который определяется относительной загрузкой двигателя, температурой охлаждающей жидкости и признаком работы на переувлажнённом агрофоне. В этом заключено определяющее для эксперимента свойство модели: интенсивность накопления повреждения зависит

от режима эксплуатации, а режим определяется управлением, вследствие чего различие между конфигурациями возникает закономерно, а не вносится извне. Отказ фиксируется в момент достижения приведённой наработкой экзогенно порождённого порога:

$$\theta_m = \eta_m^0 [-\ln(1 - u_m)]^{\frac{1}{\beta}}, \quad u_m \sim U(0, 1), \quad (5.6)$$

Данное условие представляет собой обратное преобразование функции распределения Вейбулла и согласуется с моделью надёжности подраздела 3.3. Порог порождается до запуска конфигураций управления и одинаков для всех из них, вследствие чего стратегия, снижающая нагрузку, отодвигает наступление отказа, но не изменяет заложенную реализацией предрасположенность парка к отказам. Указанное построение обеспечивает содержательную интерпретацию результата: различие между конфигурациями по числу отказов, наступивших в рабочей фазе, означает, что при одной и той же предрасположенности парка одна система управления допускает их наступление в рабочем режиме, а другая переводит в плановое обслуживание. Соответствие порождаемого распределения модели Вейбулла проверено на выборке из сорока тысяч реализаций: относительное отклонение эмпирических квантилей уровней от 0,10 до 0,90 от теоретических не превышает 1,8 процента. После восстановления приведённая наработка снижается не до нуля, а до остаточного уровня, что отражает неполноту восстановления ресурса при устранении отказа в полевых условиях, чем и создаётся экономический смысл упреждающего обслуживания.

Приведённая наработка недоступна системе управления непосредственно. Наблюдению подлежит вектор телеметрических признаков, включающий среднеквадратическое значение виброскорости опорных узлов, температуру охлаждающей жидкости, температуру масла в трансмиссии, удельный расход топлива и число зафиксированных диагностических сообщений. Модель измерения имеет вид

$$x_i(t) = \varphi_i^0(\zeta) [1 + \gamma_i z^{\psi_i(t)}] + \varepsilon_i(t), \quad \varepsilon \sim N(0, \Sigma), \quad (5.7)$$

где: z - приведённую наработку, отнесённую к характеристическому времени жизни класса техники,

φ_i^0 - значение признака в исправном состоянии при данном режиме, γ_i - амплитуду отклика,

ψ_i - показатель нелинейности. Определяющим является выбор аргумента отклика: признаки определяются абсолютной накопленной наработкой, отнесённой к характеристическому времени класса, а не к индивидуальному порогу наступления отказа, поскольку последний недоступен измерению и остаётся экзогенным.

При нормировании по индивидуальному порогу телеметрия сообщала бы долю израсходованного индивидуального ресурса, и прогнозирование отказа сводилось бы к считыванию показаний: проверка показала, что в этом случае связь виброскорости с наступлением отказа характеризуется площадью под характеристической кривой 0,956, тогда как при принятом нормировании она составляет 0,774, что соответствует действительному положению дел в технической диагностике. Показатели нелинейности отклика принимают значения от 2,0 до 3,0, вследствие чего признаки реагируют на деградацию преимущественно на поздней стадии; при линейном отклике деградация выявлялась бы тривиально, и различие между редакциями предиктивной модели не проявилось бы. Отклик признаков на деградацию технического состояния приведён на рисунке 5.2.

Отклик телеметрических признаков на деградацию технического состояния

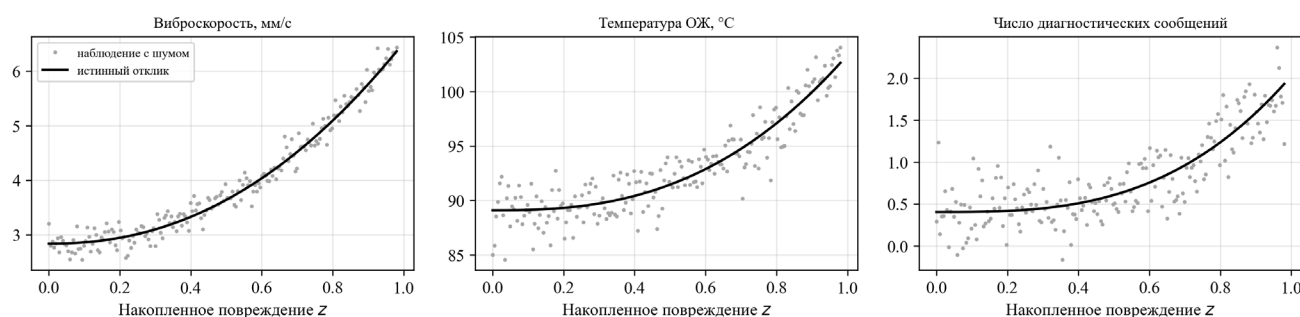


Рисунок 5.2 - Отклик телеметрических признаков на деградацию технического состояния

Перечень параметров модели порождения данных приведён в таблице 5.6.

Таблица 5.6 - Параметры модели порождения исходных данных

Параметр	Обозначение	Значение
Доля времени с осадками в уборочный период	p_r	0,10
Средняя продолжительность периода с осадками	D_r	5,0 ч
Средняя продолжительность бездождевого периода	D_d	45,0 ч
Средняя и предельная интенсивность осадков	h	1,2 и 8,0 мм/ч
Средняя температура и амплитуда суточного хода	ϑ	18 и 7 °С
Приведённая влагоёмкость деятельного слоя	H_a	22 мм
Равновесная влажность почвы	$w_{\text{рав}}$	0,48 НВ
Постоянная времени просыхания при опорной температуре	τ_0	14,0 ч
Постоянная времени изменения влажности зерна	τ_v	4,0 ч
Предельная влажность зерна при уборке без сушки	v_1	16 %
Предельная влажность зерна, допускающая уборку	v_2	20 %
Предельная влажность почвы по несущей способности	w_1	0,70 НВ
Разброс интенсивности накопления повреждений	σ_ξ	0,20
Показатель нелинейности отклика признаков	ψ_i	от 2,0 до 3,0

Распределение экзогенного индекса возмущённости с границами страт и положение реализаций в симплексе вероятностей состояний среды приведены на рисунке 5.3. Разброс между реализациями обеспечивает содержательность расслоения: медиана индекса монотонно возрастает от первой страты к третьей, доля времени пребывания вне благоприятного режима возрастает от 0,395 до 0,527, а медиана порогов наступления отказов убывает от 0,580 до 0,442, вследствие чего в тяжёлой страте парк одновременно функционирует в худших условиях и обладает меньшим запасом ресурса.

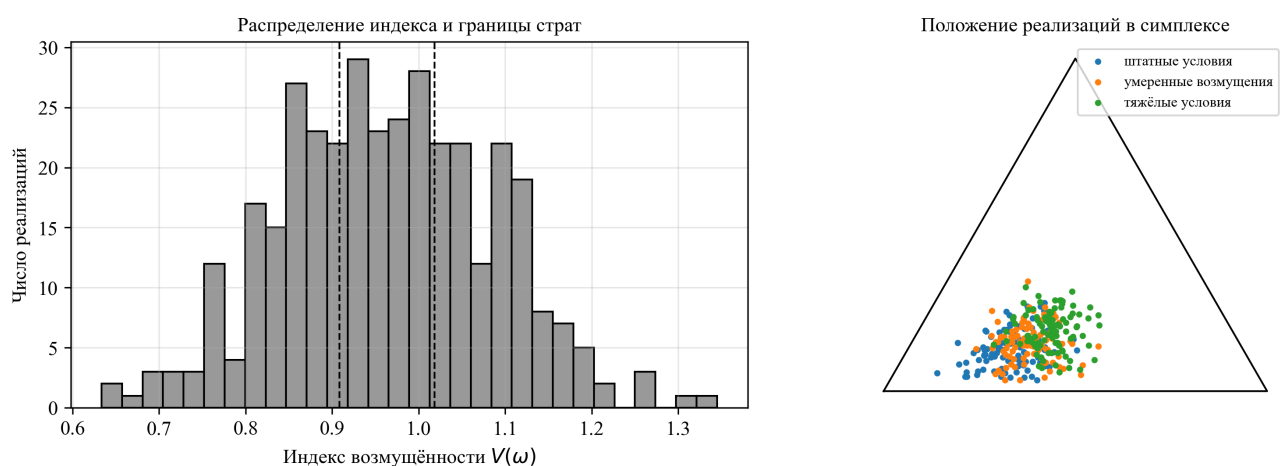


Рисунок 5.3 - Распределение индекса возмущённости с границами страт и положение реализаций в симплексе вероятностей

Отдельного рассмотрения требует возражение о замкнутости рассуждения, состоящее в том, что модель управления проверяется на данных, порождённых

теми же гипотезами, которые в неё заложены. Для его снятия предусмотрен режим нарушенных допущений, в котором параметры модели порождения выводятся за пределы диапазона, использованного при обучении предиктивной модели: доля времени с осадками увеличивается с 0,10 до 0,16, средняя продолжительность периода с осадками - с 5,0 до 7,0 ч, вследствие чего средняя продолжительность бездождевого периода сокращается до 36,8 ч, а стационарная доля состояния с осадками возрастает до 0,160. Одновременно параметр формы распределения наработки до отказа снижается на 0,8 при нижней границе 1,15, что ослабляет предсказуемость деградации, поскольку при значении параметра, близком к единице, интенсивность отказов становится постоянной и история нагрузок утрачивает прогностическую ценность. Предиктивная модель при этом остаётся обученной на исходных параметрах. Результаты серии, проведённой в указанном режиме, приведены в подразделе 5.5.

5.4. Описание экспериментального программного комплекса и проверка корректности реализации

Для практической верификации разработанного научно-методического аппарата спроектирован и реализован экспериментальный программный комплекс, представляющий собой интеллектуальную систему поддержки принятия решений (СППР). Архитектура комплекса базируется на микросервисном подходе и декомпозируется на три функциональных уровня, обеспечивающих реализацию прескриптивного управления разнородным парком техники.

Программная реализация включает следующие структурные компоненты. Вычислительное ядро (Backend) разработано на базе высокопроизводительного веб-фреймворка FastAPI (язык программирования Python) и интегрирует математический аппарат расчёта матриц технологической допустимости, предиктивный ML-компонент и сервис когнитивной интерпретации (XAI). Аналитический интерфейс реализован с использованием библиотеки Streamlit и обеспечивает интерактивную визуализацию расчётных процессов, транслируя

многомерные математические метрики в формат прозрачной аналитики. Модуль имитационного моделирования предназначен для проведения вычислительных экспериментов: осуществляет программную генерацию пространственных координат по алгоритму покрытия полигонов (траекторное движение) и синтезирует телеметрические параметры (уровень вибрации, температура узлов) с наложением заданных стохастических возмущений.

Фундаментальным блоком системы выступает цифровой двойник парка техники. В программном комплексе применён объектно-ориентированный подход к моделированию ресурсов, интегрирующий логику формирования «виртуальной сцепки» (МТА), математически обоснованную в подразделе 1.3. Агрегатирование тягово-энергетического средства (ТЭС) и агрегатируемой машины (АМО) осуществляется программно с автоматической экспериментальной проверкой применимости энергетической совместимости по тяговому классу. Для каждой инвентарной единицы рассчитывается индивидуальный динамический риск отказа (PdM), имитирующий выходные данные нейросетевого предиктора. Интерфейс управления цифровым двойником с настройкой параметров надёжности представлен на рисунке 5.4.

Интеллектуальная система управления парком техники АПК

 Реестр техники (Настройка PdM)
 Геоинформационный мониторинг
 Постановка задач и Анализ
 Симуляция смены

Список техники и настройка предиктивных рисков (PdM)

Отредактируйте столбец 'Риск поломки (%)', чтобы задать индивидуальную вероятность отказа для каждой машины.

Бортовой ID	Класс	Модель	Тяговый класс	Мощность	Статус	Риск поломки (%)
0 TES-HEAVY-101	ТЭС	Кировец К-7М (Новый)	5.0	420	Готов	5
1 TES-HEAVY-104	ТЭС	Кировец К-7М (Износ 50%)	5.0	400	Готов	5
2 TES-HEAVY-105	ТЭС	Кировец К-744РЗ	5.0	390	Готов	5
3 TES-MEDIUM-102	ТЭС	RSM 2375	3.0	380	Готов	5
4 TES-LIGHT-103	ТЭС	MT3-1221	2.0	130	Готов	5
5 STK-GRAIN-201	СТК	Torim 785 (Зерно)	-	520	Готов	5
6 STK-FORAGE-202	СТК	RSM F 2650 (Корм)	-	600	Готов	5
7 M1-TRUCK-301	M1	KAMA3-65115	-	280	Готов	5
8 M1-TRUCK-302	M1	GA3-3309	-	136	Готов	5
9 M1-AUGER-303	M1	Бункер-перегрузчик	-	-	Готов	5

Рисунок 5.4 - Интерфейс управления цифровым двойником парка техники с настройкой индивидуальных параметров надёжности

Оперативный контроль за исполнением логистических процессов обеспечивается подсистемой геоинформационного мониторинга. Программный комплекс осуществляет рендеринг трёхмерных карт с отображением полигонов

производственных участков и динамической отрисовкой траекторий движения техники с привязкой к вектору состояния внешней среды. Визуализация оперативного мониторинга технологической операции представлена на рисунке 5.5.

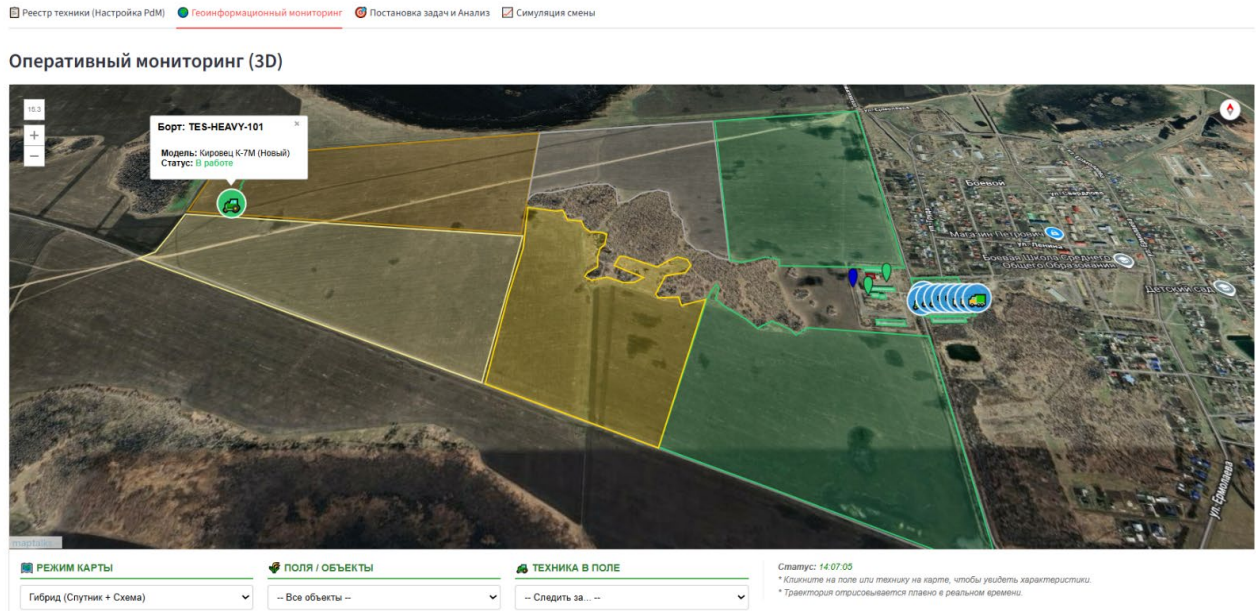


Рисунок 5.5 - Визуализация оперативного мониторинга выполнения технологической операции в реальном времени

Для обеспечения прозрачности вычислений в аналитический интерфейс интегрирован дашборд, визуализирующий гистограмму распределения вероятностей состояний среды и топологию симплекса с отображением текущего вектора состояния, а также расчётные значения весовых коэффициентов и метрики устойчивости. Графическое представление процесса выбора оптимальной стратегии приведено на рисунке 5.6.

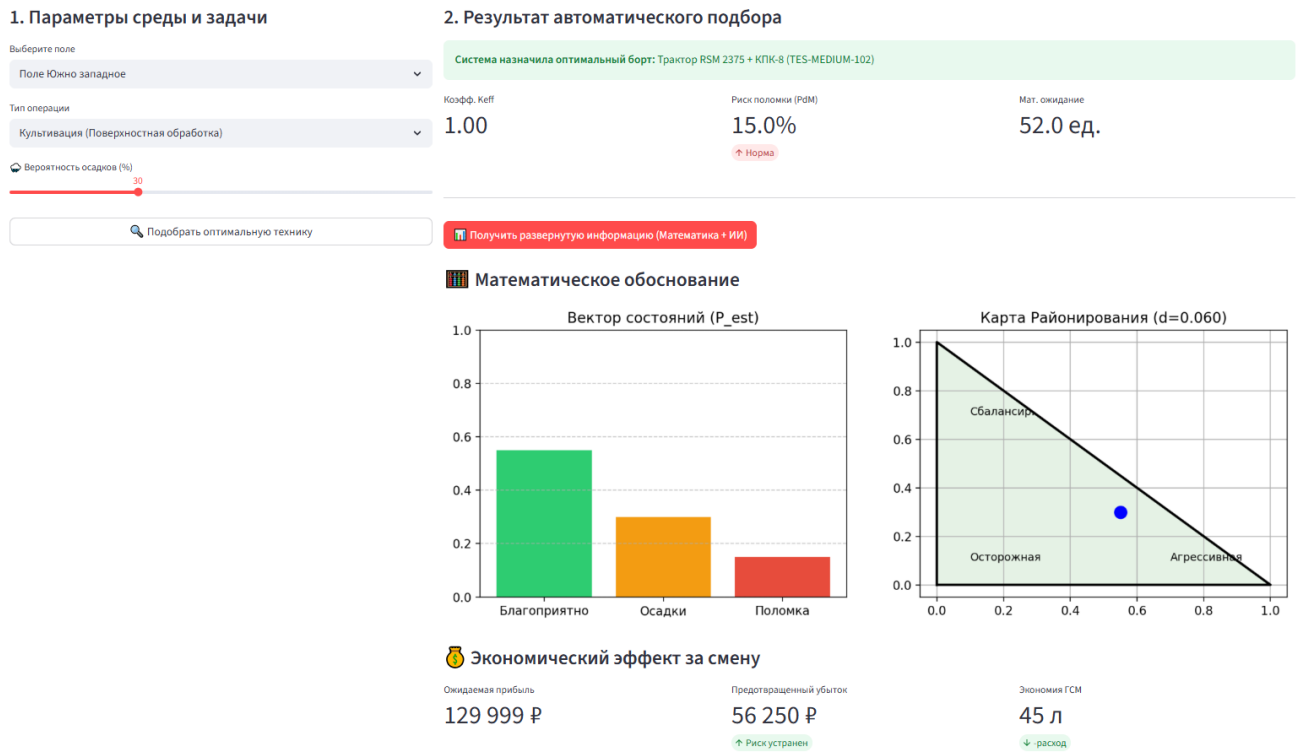


Рисунок 5.6 - Визуализация процесса принятия решения в симплексе вероятностей состояний среды

Расчётная часть программного комплекса, обеспечивающая проведение вычислительного эксперимента, реализована на языке Python и организована по модульному принципу. Модуль порождения внешней среды содержит марковскую модель метеорологической обстановки, инерционный пересчёт влажности почвы и зерна, порождение шума измерения, порогов наступления отказов и продолжительностей восстановления, а также вычисление индекса возмущённости. Модуль имитационной модели звена содержит описание единиц техники, логику формирования сцепок, модель обслуживания на приёмном пункте, учёт накопленного повреждения и вычисление показателей результата функционирования. Модуль матрицы эффективности выполняет вычисление частных критериев, нормирование и свёртку. Модуль районирования строит гиперплоскости безразличия, определяет области доминирования и вычисляет метрику устойчивости и площади областей. Модуль предиктивной модели содержит двухпоточную нейросетевую архитектуру, обе редакции целевой функции и процедуру обучения. Модуль конфигураций управления реализует шесть решающих правил, модуль планирования эксперимента - порождение

множеств реализаций, расслоение и последовательность прогонов, модуль статистической обработки - парные критерии, построение доверительных интервалов методом бутстрепа, поправку на множественность сравнений и формирование итоговых таблиц.

Достоверность программной реализации подтверждена пятью проверками, выполненными до проведения основной серии. Проверка воспроизводимости состоит в повторном прогоне одной реализации при том же начальном состоянии генератора псевдослучайных чисел с требованием полного совпадения всех сохраняемых величин. Проверка независимости реализации внешней среды от применяемой конфигурации управления состоит в сопоставлении сохранённых массивов после последовательного прогона всех шести конфигураций. Проверка балансового соотношения устанавливает равенство объёма убранной продукции сумме, принятой на приёмном пункте, находящейся в очереди и находящейся в бункерах и транспортных средствах на момент завершения. Проверка областей допустимых значений контролирует принадлежность коэффициента технической готовности и показателя использования агротехнических окон единичному отрезку, неотрицательность продолжительностей и непревышение убранной площадью площади массива. Проверка вырожденных случаев требует, чтобы полная схема при нулевом пороге смены критерия воспроизводила результат схемы без смены критерия, а конфигурация постоянного применения стратегии привлечения резерва - результат прогона с фиксированной стратегией. Все пять проверок пройдены; их результаты, начальные состояния генератора, полный перечень параметров и версии применённого программного обеспечения вынесены в приложение и обеспечивают воспроизводимость расчёта третьим лицом.

Совокупный объём вычислений составил тысячу восемьсот прогонов основной серии, тысячу восемьсот прогонов серии при нарушенных допущениях, триста прогонов диагностической серии и порядка двух тысяч прогонов при анализе чувствительности; обучение предиктивной модели

выполнено на выборке из 77 757 образцов, сформированной по тремстам реализациям.

5.5. Верификация математического ядра и результаты сопоставления стратегий управления

Проверка работоспособности математического ядра выполнена в два этапа: на первом установлена невырожденность постановки задачи на калибровочном множестве реализаций, на втором проведено сопоставление шести конфигураций управления на основной серии.

Матрица эффективности построена по калибровочным реализациям с фиксированным состоянием внешней среды. Три частных критерия, отвечающие производительности, эксплуатационным затратам и расходованию технического ресурса, вычисляются однократно и остаются постоянными. Критерий риска нарушения директивного срока зависит от необработанного объема работ и оставшегося времени и потому вычисляется в каждый момент принятия решения как доля калибровочных реализаций, при которых сохранение достигнутого темпа покрытия площади не обеспечивает выполнения оставшегося объема в срок:

$$q_{zij}(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbb{1} \left[\frac{S_{\text{ост}}(t)}{v_{ij}^{(k)}} > T_{\text{дир}} - t \right] \quad (5.8)$$

где: $S_{\text{ост}}(t)$ - необработанную площадь;

$v_{ij}^{(k)}$ - темп покрытия площади при стратегии a_i и состоянии π_j , полученный на k -й калибровочной реализации.

Матрица эффективности тем самым является функцией состояния выполнения работ, а декомпозиция симплекса выполняется в каждый момент принятия решения. Постоянная матрица не отражала бы зависимости предпочтительности стратегии от положения звена относительно директивного графика, вследствие чего привлечение резервного комплекса оказывалось бы одинаково оправданным при опережении графика и при отставании от него. Матрица эффективности на начало расчетного периода приведена в таблице 5.7.

Таблица 5.7 - Матрица эффективности на начало расчётного периода

Стратегия	π_1	π_2	π_3
a1 привлечение дополнительного ресурса	0,6455	0,2731	0,5665
a2 щадящий режим	0,5371	0,3708	0,4356

Декомпозиция симплекса вероятностей на области доминирования приведена на рисунке 5.7. Каждая из двух стратегий обладает непустой областью доминирования: им отвечают доли 0,852 и 0,148 площади симплекса, граница безразличия пересекает внутренность симплекса, что и составляет условие невырожденности постановки. Устойчивость структуры декомпозиции проверена бутстрепом по шестидесяти калибровочным реализациям при двух тысячах повторных выборок: условие непустоты областей доминирования обеих стратегий выполняется в 0,998 повторений. Действие динамического критерия риска содержательно: при полном объёме неубранной площади на начало периода предпочтительным оказывается привлечение резервного комплекса, а по достижении опережения директивного графика критерий риска обращается в нуль для обеих стратегий и предпочтительным становится щадящий режим.



Рисунок 5.7 - Карта районирования симплекса вероятностей с положением рабочей точки

Основная серия выполнена на трёхстах реализациях внешней среды при шести конфигурациях управления, что составляет тысячу восемьсот прогонов.

Полнота набора и выполнение балансового соотношения по массе продукции проверены программно. Сводные результаты приведены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 - Медианные значения показателей по конфигурациям управления

Показатель	c0	c1	c2	c3	c4	c5
Накопленная эффективность, млн руб	16,402	17,187	17,299	17,315	17,386	17,318
Привлечение резерва, тыс. руб	1280,0	0,0	327,5	338,8	313,8	345,0
Потери от нарушения срока, тыс. руб	0,0	615,5	67,5	65,6	66,8	61,8
Простой под выгрузкой, ч	29,50	7,25	17,75	18,13	18,00	19,63
Отказов в рабочей фазе	13	12	12	12	11	12
Упреждающих воздействий	0	0	2	2	3	2
Использование агротехнических окон	0,349	0,347	0,366	0,363	0,366	0,362
Завершение уборки, сут	8,73	14,58	12,29	12,28	12,28	12,26

Механизм достигаемого преимущества раскрывается тремя строками таблицы. Агрессивная конфигурация расходует на привлечение резервного комплекса 1 280 000 рублей и завершает уборку на 8,73 сутки при директивном сроке двенадцать суток, то есть оплачивает опережение графика, не приносящее выигрыша. Консервативная конфигурация затрат на привлечение не несёт, но завершает уборку на 14,58 сутки и несёт потери от нарушения срока в размере 615 454 рублей. Разработанная схема привлекает резерв избирательно, расходуя 338 750 рублей, завершает уборку на 12,28 сутки и сокращает потери до 65 565 рублей; сумма двух статей составляет 1 280 000, 615 454 и 404 315 рублей соответственно, чем и определяется полученное различие. Одновременно непроизводительный простой под выгрузкой сокращается относительно агрессивной конфигурации с 29,50 до 18,13 часа, то есть на 38,6 процента, а использование агротехнических окон возрастает с 0,349 до 0,363. Структура указанных затрат по трём конфигурациям приведена на рисунке 5.8.

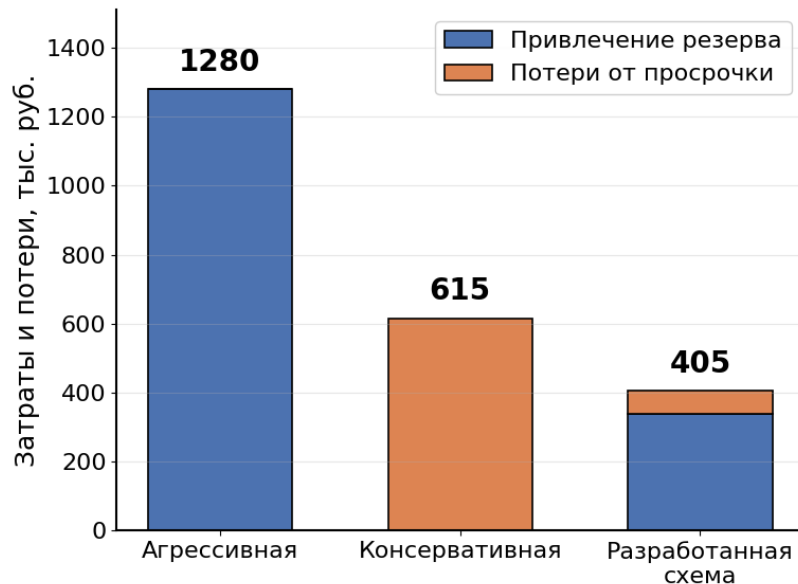


Рисунок 5.8 - Структура затрат на привлечение резервного комплекса и потерь от нарушения директивного срока по сопоставляемым конфигурациям

Достигаемое преимущество допускает интерпретацию в натуральных технико-агрономических показателях, определяющих эффективность для агропромышленного производства. Определяющим агрономическим результатом является соблюдение директивного агротехнического срока: разработанная схема завершает уборку массива на 12,3 сутки при нормативе 12 суток, тогда как практика отказа от привлечения резерва растягивает работы до 14,6 суток, что соответствует сокращению просрочки с 2,6 до 0,3 суток. Прямым следствием служит сохранение урожая от потерь при перестое на корню: физический объём потерь снижается с 43,9 до 4,7 тонны зерна на массив, то есть сохраняется около 39 тонн, составляющих 2,8 процента валового сбора. Одновременно полнота использования агротехнических окон возрастает с 0,349 до 0,363, а непроизводительный простой уборочных комплексов под выгрузкой сокращается с 29,5 до 18,1 часа, то есть на 38,6 процента, что означает более полное использование уборочной техники в напряжённый период. Избирательное привлечение резервной техники по прогнозу состояния среды снижает затраты на её аренду с 1280 до 339 тыс. руб. на массив. Техничко-агрономические результаты внедрения разработанной схемы в сопоставлении с базовой практикой приведены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 - Техничко-агрономические результаты внедрения разработанной схемы

Показатель эффективности для АПК	Базовая практика	Разработанная схема
Завершение уборки массива, сут	14,6	12,3
Просрочка относительно директивного срока, сут	2,6	0,3
Потери зерна от нарушения срока, т на массив	43,9	4,7
Полнота использования агротехнических окон	0,349	0,363
Простой уборочной техники под выгрузкой, ч	29,5	18,1
Затраты на привлечение резервной техники, тыс. руб.	1280	339

В качестве базовой практики по каждому показателю принята та из двух традиционных стратегий, которая уступает разработанной схеме по данному показателю. По срокам завершения работ и потерям зерна - практика отказа от привлечения резерва, по простоям техники и затратам на резерв - практика его постоянного привлечения.

Прирост интегрального показателя относительно агрессивной конфигурации составляет 5,566 % и достигается на всех без исключения реализациях; относительно консервативной конфигурации прирост составляет 0,743 процента при превосходстве на 82,3 процента реализаций. Конфигурация с точным знанием состояния среды даёт 1,155 процента, вследствие чего реализуемая доля теоретически достижимого выигрыша, вычисленная по выражению (5.3), составляет 0,644. Распределение интегрального показателя по конфигурациям и распределения парных разностей приведены на рисунке 5.9.

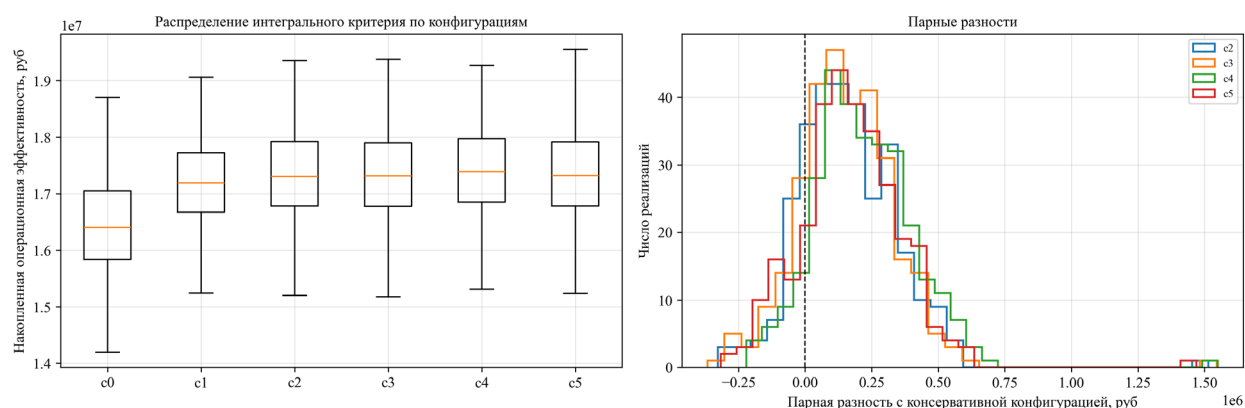


Рисунок 5.9 - Распределение интегрального показателя по конфигурациям и парные разности с консервативной конфигурацией

Результаты статистической проверки утверждений приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 - Результаты проверки утверждений

Утверждение	Медиана, руб	95 % интервал, руб	Уровень значим.	Размер эффекта	Доля реал.
Превосходство над агрессивной конфигурацией	901 899	[878 172; 927 823]	$1,2 \cdot 10^{-50}$	1,000	1,000
Превосходство над консервативной конфигурацией	147 223	[129 913; 175 128]	$3,8 \cdot 10^{-33}$	0,647	0,823
Вклад экономической компоненты	0	[-6 931; 7 505]	1,00	0,007	0,483
Вклад механизма смены критерия	0	[-13 515; 3 468]	1,00	-0,017	0,477

Первое утверждение подтверждено с существенным запасом: превосходство над агрессивной конфигурацией достигается на всех реализациях при размере эффекта, равном единице, а нижняя граница доверительного интервала медианы парной разности с консервативной конфигурацией составляет 129 913 рублей и отделена от нуля с запасом. Результаты по стратам условий приведены в таблице 5.11, преимущество сохраняется во всех трёх стратах, вследствие чего оно не является следствием благоприятного усреднения.

Таблица 5.11 - Сопоставление полной схемы с консервативной конфигурацией по стратам

Страта	Медиана разности, руб	Прирост, %	Уровень значимости	Доля
Штатные условия	133 574	0,722	$6,2 \cdot 10^{-13}$	0,87
Умеренные возмущения	161 437	1,099	$1,8 \cdot 10^{-11}$	0,80
Тяжёлые условия	165 741	0,673	$4,2 \cdot 10^{-13}$	0,80

Наибольший относительный прирост достигается в страте умеренных возмущений, что содержательно объяснимо: в штатных условиях выбор стратегии близок к безразличному, поскольку директивный срок выдерживается при любой из них, а в тяжёлых условиях возможности управления ограничены самими условиями, вследствие чего наибольшую ценность адаптивное управление приобретает в промежуточной области.

Обучение предиктивной модели выполнено в четырёх редакциях, различающихся весовым коэффициентом экономической компоненты; кривые сходимости приведены на рисунке 5.10. Экономическая компонента убывает монотонно с возрастанием весового коэффициента, с 0,01775 при нулевом значении до 0,01445 при пятидесяти, тогда как статистическая компонента монотонно возрастает, с 0,58013 до 0,62744. Наличие двух монотонных зависимостей противоположного направления подтверждает, что предложенная конструкция целевой функции действует заявленным образом.

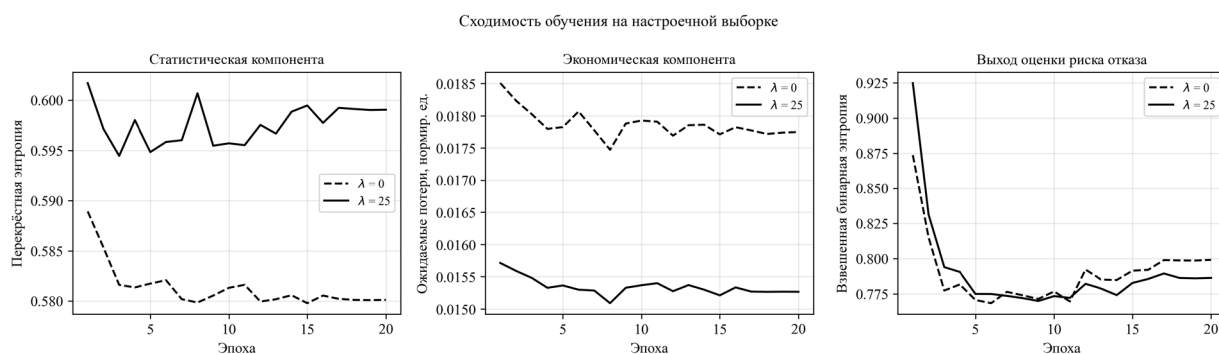


Рисунок 5.10 - Сходимость обучения по компонентам целевой функции

Прогноз состояний внешней среды калиброван: оценка Бриера составляет 0,126 при теоретическом диапазоне от нуля до двух, ожидаемая ошибка калибровки 0,0103, а диаграмма калибровки, приведённая на рисунке 5.11, располагается вблизи диагонали на всём диапазоне прогнозируемых

вероятностей. Площадь под характеристической кривой для прогноза отказов составляет 0,888. При введении экономической компоненты ошибка калибровки возрастает до 0,0359, а оценка Бриера до 0,133. Изменение закономерно и было предусмотрено заранее, поскольку компонента смещает решение в направлении минимизации последствий, а не статистического расхождения.

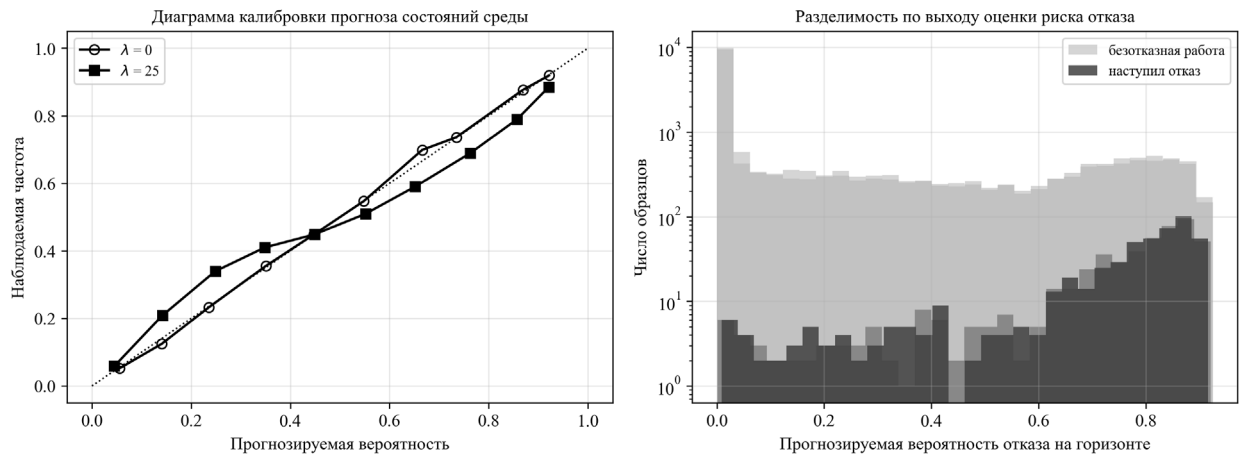


Рисунок 5.11 - Диаграмма калибровки прогноза состояний среды и разделимость по выходу оценки риска отказа

Прогностическая информативность метрики устойчивости установлена независимо от механизма смены критерия. Проверка выполнена по пособытийному журналу конфигурации без смены критерия на совокупности из 28 500 решений; решение относится к неоптимальным, если выбранная стратегия отличается от стратегии, оказавшейся наилучшей при фактически реализовавшемся распределении состояний среды. Медиана метрики при неоптимальном решении составляет 0,308 против 0,596 при оптимальном, площадь под характеристической кривой равна 0,8965 при доверительном интервале от 0,8905 до 0,9022. Доля неоптимальных решений монотонно убывает с ростом метрики: в нижнем дециле она составляет 0,255 при средней 0,054, то есть риск ошибочного выбора повышен в 4,7 раза, а начиная с восьмого дециля неоптимальные решения не встречаются. Связь метрики с ошибочностью выбора приведена на рисунке 5.12.

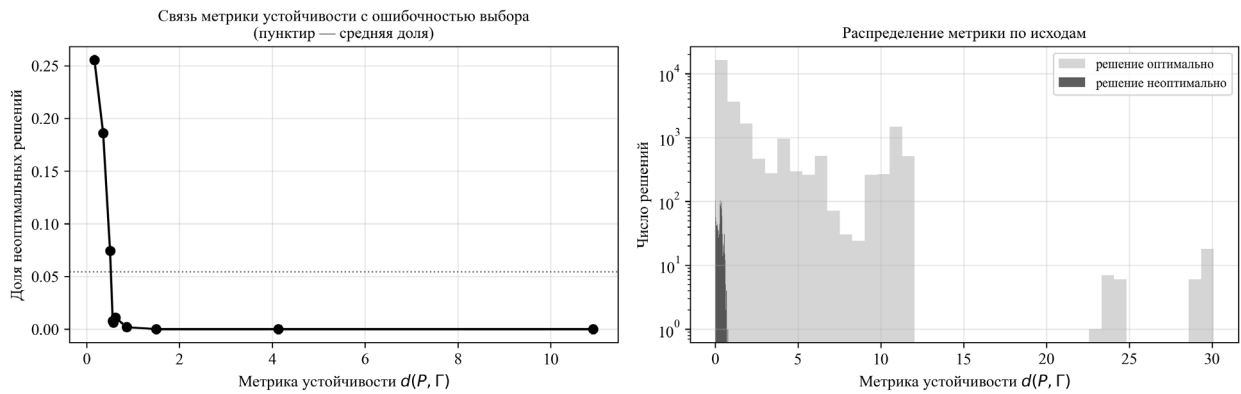


Рисунок 5.12 - Связь метрики устойчивости с ошибочностью выбора стратегии

Вместе с тем построенный на метрике механизм смены критерия улучшения интегрального показателя не обеспечивает: медиана парной разности с конфигурацией без смены критерия равна нулю при доверительном интервале от $-13\,515$ до $3\,468$ рублей. Установленная причина состоит в том, что минимаксный критерий в рассматриваемой задаче систематически смещает выбор в пользу щадящего режима, то есть той стратегии, которая при принятой структуре затрат проигрывает в среднем; чем чаще срабатывает смена критерия, тем ближе результат к результату консервативной конфигурации. Область применимости механизма ограничивается задачами, в которых цена ошибочного решения существенно превышает цену осторожности. Аналогично не получил подтверждения перенос установленного свойства целевой функции на интегральный показатель: медиана парной разности с конфигурацией, обученной без экономической компоненты, равна нулю.

Анализ чувствительности выполнен на расслоённом подмножестве из ста двух реализаций основной серии, по тридцати четыре из каждой страты; результаты приведены в таблице 5.12. Оценка выборочного шума получена из доверительного интервала медианы парной разности: на полной серии его полуширина составляет 0,132 процентного пункта, на подмножестве указанного объёма -0,226 процентного пункта.

Таблица 5.12 - Чувствительность прироста интегрального показателя к настраиваемым величинам

Величина						
Порог смены критерия δ	0	0,10	0,20	0,33	0,50	0,80
Прирост к консервативной, %	0,837	0,596	0,643	0,788	0,556	0,613
Доля решений со сменой критерия	0	0,020	0,064	0,144	0,278	0,852
Весовой коэффициент λ	0	10	25	50	-	-
Прирост к консервативной, %	0,578	1,052	0,837	0,593	-	-

Зависимость прироста от порога смены критерия немонотонна при размахе 0,281 процентного пункта, что сопоставимо с оценкой шума; наибольшее значение достигается при нулевом пороге, то есть при полном отсутствии смены критерия. Зависимости, различимой на фоне выборочной погрешности, не обнаружено, что согласуется с результатом основной серии. Зависимость прироста от весового коэффициента экономической компоненты, исследованная при отключённом механизме смены критерия, обнаруживает внутренний максимум при значении десять; размах составляет 0,474 процентного пункта и вдвое превышает оценку шума, вследствие чего зависимость признаётся установленной. Различие между нулевым и принятым значением коэффициента составляет 0,259 процентного пункта в пользу принятого, различие между принятым значением и значением, отвечающим максимуму, составляет 0,215 процентного пункта и лежит в пределах погрешности. Замена принятого значения на значение, доставляющее наибольший результат, не производилась: правило выбора весового коэффициента зафиксировано до вычислений, и его пересмотр по полученным результатам превратил бы настройку в подбор.

Сопоставление двух зависимостей выявляет взаимодействие механизмов. Экономическая компонента улучшает результат при отключённом механизме смены критерия, тогда как в основной серии, где механизм смены критерия действовал при принятом пороге, разность между конфигурациями с компонентой и без неё оказалась равной нулю. Причина состоит в том, что оба механизма смещают выбор в сторону осторожности: экономическая компонента через штраф за последствия ошибки прогноза, смена критерия через переход к минимаксному правилу; при совместном действии смещение оказывается избыточным, и выигрыш от первого механизма поглощается потерями от

второго. Установленное взаимодействие определяет условие применимости предложенной целевой функции: она обеспечивает прирост при выборе стратегии по критерию Байеса и утрачивает его при одновременном применении механизма смены критерия.

Разрешающая способность предиктивного модуля при обнаружении предстоящих отказов оценена на диагностической серии, в которой прогноз вычисляется, но упреждающее обслуживание не выполняется: при действующем вмешательстве верно предсказанные отказы устраняются из записи и измерялся бы остаток после вмешательства, а не качество прогноза. Результаты приведены в таблице 5.13 и на рисунке 5.14.

Таблица 5.13 - Разрешающая способность обнаружения предстоящих отказов

Порог срабатывания	Полнота обнаружения	Медиана заблаговременности, ч	Межквартильный размах, ч	Доля ложных
0,04	0,979	44,75	[32,2; 46,5]	0,535
0,08	0,874	35,00	[24,8; 45,8]	0,480
0,10	0,771	30,75	[21,2; 45,0]	0,446
0,15	0,418	26,50	[10,8; 38,7]	0,373
0,20	0,108	23,25	[7,0; 32,2]	0,316

Показатели полноты обнаружения и заблаговременности приводятся исключительно совместно: повышение порога срабатывания удлиняет заблаговременность на всё меньшем числе обнаруженных событий, вследствие чего показатель заблаговременности сам по себе допускает тривиальное завышение. Рабочая точка задана не назначением порога на выходе модели, а допустимой долей срабатываний, составляющей пять процентов от числа решений, поскольку обучение со взвешиванием редкого класса смещает шкалу выхода и порог, назначенный на ней непосредственно, содержательной трактовки не имеет. Принятому значению отвечает порог прогнозируемого риска 0,136, при котором полнота обнаружения составляет от 0,42 до 0,77 при медианной заблаговременности от 26,5 до 30,8 часа и доле ложных срабатываний от 0,37 до 0,45. Достигаемое за счёт упреждающего обслуживания сокращение числа отказов, наступающих в рабочей фазе цикла, статистически не значимо;

предельное сокращение, достижимое при точном знании состояния технического ресурса, составляет один отказ за расчётный период.

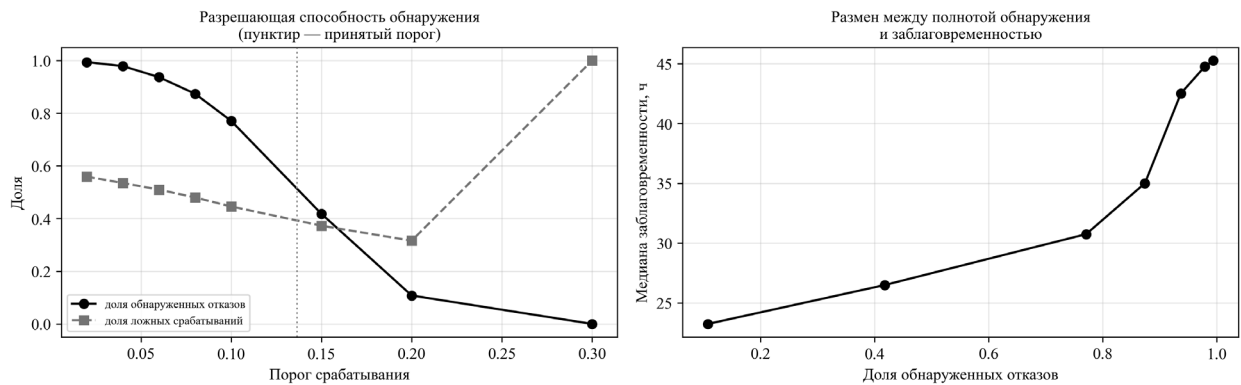


Рисунок 5.13 - Разрешающая способность обнаружения предстоящих отказов и размен между полнотой обнаружения и заблаговременностью

Устойчивость полученных выводов к нарушению допущений, положенных в основу модели порождения данных, проверена на отдельной серии из трёхсот реализаций. Превосходство разработанной схемы сохраняется: относительно агрессивной конфигурации 5,022 процента против 5,566 в основной серии при медиане парной разности 878 880 рублей и достигнутом уровне значимости $3,0 \cdot 10^{-51}$, относительно консервативной 1,137 процента против 0,743 при медиане 149 853 рубля, размере эффекта 0,68 и превосходстве на 84 процентах реализаций. Возрастание относительного преимущества над консервативной конфигурацией объясняется тем, что при ужесточении условий стратегия неиспользования резерва чаще не обеспечивает выполнения работ в директивный срок и несёт большие потери, тогда как адаптивная схема компенсирует это избирательным привлечением резерва. Утверждать на этом основании, что система функционирует лучше в худших условиях, оснований нет; правомерным выводом является возрастание ценности адаптивного управления по мере ужесточения условий.

5.6. Когнитивная интерпретация решений и оценка экономической эффективности

С целью обеспечения семантической прозрачности алгоритмических выводов и преодоления проблемы непрозрачности нейросетевых вычислений в архитектуру программного комплекса интегрирован модуль когнитивной

интерпретации на базе большой языковой модели. Модуль осуществляет автоматизированную трансляцию структурированного JSON-контекста, формируемого математическим ядром, в развёрнутую управленческую директиву на естественном языке, что минимизирует когнитивную нагрузку на диспетчерский аппарат и повышает уровень доверия к рекомендациям интеллектуальной системы.

Сформированный отчёт содержит детализированное предписание по выбору стратегии, аналитическое обоснование перехода между критериями принятия решений с указанием метрики устойчивости d , оценку сопутствующих логистических рисков и расчётные значения ожидаемой операционной прибыли. Пример сгенерированной управленческой директивы с экономическим обоснованием и оценкой рисков приведён на рисунке 5.14.

↑ Риск устранен
↓ расход

Когнитивная интерпретация (LLM)

Уважаемый Главный Диспетчер,

Система поддержки принятия решений (СППР АПК) провела комплексный анализ текущей операционной среды и готова предоставить следующие управленческие рекомендации по проведению культивации.

1. УПРАВЛЕНЧЕСКАЯ ДИРЕКТИВА

Приказываю немедленно приступить к операции "Культивация (Поверхностная обработка)". Для выполнения работ задействовать Трактор RSM 2375 + КПК-8. Строго придерживаться стратегии A2 (Сбалансированная), обеспечивающей оптимальное соотношение производительности и минимизации рисков.

2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Выбор стратегии A2 (Сбалансированная) обусловлен ее максимальной ожидаемой полезностью, составляющей 52.0, что является наивысшим показателем среди всех рассмотренных альтернатив. Данное решение было принято с использованием критерия Байеса (Maximum Expected Utility), который учитывает все известные вероятности состояний среды для максимизации общего ожидаемого результата.

Несмотря на низкий общий погодный риск (LOW), система прогнозирует вероятность осадков на уровне 30% и риск технического отказа оборудования в 15%. В этих условиях сбалансированная стратегия A2 является наиболее рациональной, так как она позволяет эффективно использовать благоприятные условия, одновременно минимизируя потенциальные негативные последствия от осадков или поломок.

Решение является **робастным**, о чем свидетельствует метрика робастности $d = 0.05985651633507169$. Это означает, что выбранная стратегия стабильна и устойчива к незначительным изменениям в вероятностных прогнозах, находясь на достаточном удалении от гиперплоскости безразличия.

3. ОЦЕНКА РИСКОВ

Игнорирование данной рекомендации и выбор агрессивной стратегии A1 (Агрессивная), которая имеет ожидаемую полезность 44.5 (значительно ниже, чем у A2), приведет к неоправданному увеличению рисков. В частности, при 30% вероятности осадков и 15% риске технического отказа, агрессивный подход может повлечь за собой:

- Повреждение или некачественное выполнение культивации из-за внезапного ухудшения погодных условий.
- Повышенную вероятность преждевременного износа или отказа оборудования вследствие работы на предельных режимах без достаточного учета рисков.
- Увеличение операционных расходов, связанных с возможными простоями, ремонтом и необходимостью повторного выполнения работ.
- Снижение общей эффективности и рентабельности операции.

4. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Принятие рекомендованной сбалансированной стратегии A2 позволит достичь следующих экономических показателей:

- Ожидаемая прибыль от операции составит **129 999 рублей**.
- Система предотвратила потенциальный убыток в размере **56 250 рублей**, который мог бы возникнуть в случае выбора менее оптимальной стратегии или возникновения аварийной ситуации.
- Дополнительно будет сэкономлено **45 литров топлива**.

Экономия достигнута за счет оптимизации рабочего процесса, предотвращения возможных поломок оборудования и минимизации рисков, связанных с погодными условиями. Сбалансированный подход позволяет избежать неэффективного расхода ресурсов и дорогостоящих простоев, напрямую влияя на повышение рентабельности и устойчивости агропромышленного комплекса.

↑ Риск устранен
↓ расход

✓ УТВЕРДИТЬ И ОТПРАВИТЬ TES-MEDIUM-102

Рисунок 5.14 - Сгенерированная управленческая директива с экономическим обоснованием и оценкой рисков

Экономическая оценка эффективности выполнена путём конвертации интегрального показателя, формируемого в результате устойчивого управления, в финансовые показатели инвестиционного проекта внедрения системы. В качестве объекта принято уборочно-транспортное звено, рассмотренное в подразделе 5.2 (производственный массив площадью 800 га, парк из 12 единиц техники). Базой сравнения служит практика диспетчеризации с постоянным привлечением резервной техники, экономически эквивалентная «агрессивной» конфигурации вычислительного эксперимента. Стоимостные параметры приняты по укрупнённым оценкам уровня цен 2026 года и подлежат уточнению применительно к условиям конкретного предприятия. Расчёт выполнен для варианта с дооснащением парка бортовыми телеметрическими комплектами, стоимость которых принята по укрупнённым оценкам для типового состава измерительных средств.

Структура единовременных и ежегодных затрат на внедрение и эксплуатацию системы приведена в таблице 5.14. Единовременные (капитальные) затраты включают оснащение парка бортовыми телеметрическими комплектами, приобретение серверного оборудования, разработку и интеграцию программного обеспечения, а также обучение диспетчерского и инженерного персонала. Ежегодные (эксплуатационные) затраты образуются расходами на связь и передачу телеметрии, хостинг и электроснабжение сервера, сопровождение программного обеспечения с периодическим переобучением моделей и техническое обслуживание измерительных средств.

Таблица 5.14 - Затраты на внедрение и эксплуатацию системы

Статья затрат	Кол-во	Сумма, тыс. руб.
Единовременные (капитальные) затраты		
Бортовые телеметрические комплекты	12	360
Серверное и вычислительное оборудование	1	350
Разработка, внедрение и интеграция ПО	-	500
Монтаж и пусконаладочные работы	-	150
Обучение персонала	4 чел.	100
Итого капитальные затраты		1 460

Ежегодные (эксплуатационные) затраты		
Связь и передача телеметрии	12	72
Хостинг и электроснабжение сервера	-	108
Сопровождение ПО и переобучение моделей	-	180
Техническое обслуживание и замена датчиков	-	90
Итого эксплуатационные затраты		450

Годовой экономический эффект принят равным величине, установленной в вычислительном эксперименте. Медианное превосходство разработанной схемы над практикой постоянного привлечения резервной техники составляет 901,9 тыс. руб. за напряжённый период (таблица 5.9) и достигается за счёт избирательного привлечения резерва, сокращения непроизводительных простоев и уменьшения потерь от нарушения директивных агротехнических сроков. Экономия горюче-смазочных материалов и снижение аварийно-восстановительных затрат в состав годового эффекта отдельными слагаемыми не включены. Удельный расход топлива по всем сопоставляемым конфигурациям составляет от 11,73 до 11,76 кг/га, вследствие чего измеримой экономии топлива не установлено. Затраты на ремонтные воздействия входят в интегральный показатель согласно выражению (5.2), и их учёт отдельным слагаемым привёл бы к двойному счёту. Принятая величина годового эффекта является нижней оценкой, поскольку не учитывает применения системы в посевной период, при котором действуют те же директивные сроки и та же логика распределения ресурсов.

Оценка экономической эффективности внедрения выполнена динамическим методом, учитывающим изменение стоимости денежных средств во времени. Горизонт расчёта принят равным семи годам, что соответствует сроку службы бортового телеметрического оборудования и серверных мощностей, образующих основную часть капитальных вложений. Ставка дисконтирования принята равной 18 процентам и отражает требуемую норму доходности с учётом безрисковой ставки и премий за отраслевой и проектный риск.

Исходными величинами расчёта служат капитальные затраты K , годовые эксплуатационные затраты C и годовой экономический эффект Δ ,

установленный в вычислительном эксперименте как медианное превосходство разработанной схемы над практикой постоянного привлечения резервной техники. Годовой чистый денежный поток определяется как разность годового эффекта и эксплуатационных затрат:

$$CF = Э - C = 901,9 - 450,0 = 451,9 \text{ тыс. руб.}, \quad (5.9)$$

Чистый дисконтированный доход вычисляется как сумма годовых денежных потоков, приведённых к начальному моменту, за вычетом капитальных вложений

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF}{(1+r)^t} - K = 1722,4 - 1460,0 = 262 \text{ тыс. руб.}, \quad (5.10)$$

Индекс доходности определяется отношением суммы дисконтированных потоков к капитальным вложениям и составляет $PI = 1722,4/1460,0 = 1,18$, что означает возврат 1,18 рубля приведённых денежных средств на каждый вложенный рубль. Внутренняя норма доходности IRR вычисляется как ставка, обращающая чистый дисконтированный доход в нуль:

$$\sum_{t=1}^T \frac{CF}{(1+IRR)^t} - K = 0, \quad IRR = 24, \quad (5.11)$$

Динамика приведённых к начальному моменту денежных потоков по годам расчётного периода представлена в таблице 5.15. Каждое годовое поступление, равное чистому денежному потоку 451,9 тыс. руб., приводится к начальному моменту делением на коэффициент дисконтирования $(1+r)^t$ и суммируется с потоками предшествующих лет.

Таблица 5.15 - Дисконтированные денежные потоки проекта по годам расчётного периода

Год <i>t</i>	Коэффициент дисконтирования	Дисконтированный поток, тыс. руб.	Накопленный дисконтированный поток, тыс. руб.
1	0,8475	383,0	383,0
2	0,7182	324,5	707,5
3	0,6086	275,0	982,5
4	0,5158	233,1	1215,6
5	0,4371	197,5	1413,2

6	0,3704	167,4	1580,6
7	0,3139	141,9	1722,4

Сумма дисконтированных потоков за семилетний период составляет 1722,4 тыс. руб., что при вычитании капитальных вложений 1460 тыс. руб. даёт чистый дисконтированный доход 262 тыс. руб. Дисконтированный срок окупаемости определяется годом, в котором накопленный дисконтированный поток впервые покрывает капитальные вложения. К концу пятого года накопленный поток составляет 1413,2 тыс. руб. и не покрывает вложения, к концу шестого года достигает 1580,6 тыс. руб. и превышает их, вследствие чего окупаемость наступает в течение шестого года. Непокрытая на начало шестого года часть вложений составляет 1460 минус 1413,2, то есть 46,8 тыс. руб., а её отношение к дисконтированному потоку шестого года определяет дробную часть срока:

$$DPP = 5 + \frac{K - \sum_{t=1}^5 CF (1+r)^{-t}}{CF (1+r)^{-6}} = 5 + \frac{46,8}{167,4} = 5,3, \quad (5.12)$$

Приведённые к начальному моменту денежные потоки по годам и их накопление приведены при вычислении показателей, сводные результаты которых представлены в таблице 5.16.

Таблица 5.16 - Показатели экономической эффективности проекта (Т = 7 лет, r = 18 %)

Показатель	Значение
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	901,9
Годовые эксплуатационные затраты, тыс. руб.	450
Годовой чистый эффект (CF), тыс. руб.	451,9
Капитальные затраты (K), тыс. руб.	1 460
Чистый дисконтированный доход NPV, тыс. руб.	262
Дисконтированный срок окупаемости, лет	5,3
Индекс доходности PI	1,18
Внутренняя норма доходности IRR, %	24

Положительное значение чистого дисконтированного дохода и превышение внутренней нормой доходности принятой ставки дисконтирования на 6 процентных пунктов подтверждают экономическую целесообразность внедрения разработанной системы. Индекс доходности, превышающий единицу,

указывает на возврат вложенных средств с приростом в приведённом выражении.

Полная развёртка денежных потоков проекта приведена в приложении Б. Исходные данные расчёта представлены в таблице Б.1, распределение потоков по операционной, инвестиционной и финансовой деятельности представлены в таблице Б.2 и годовые притоки и оттоки на всём горизонте планирования, от года капитальных вложений до завершающего года представлены в таблице Б.3. Итоговые показатели получены непосредственно из этой развёртки. Чистый дисконтированный доход равен накопленному дисконтированному потоку завершающего года. Дисконтированный срок окупаемости определяется годом, в котором накопленный поток меняет знак. Внутренняя норма доходности равна ставке дисконтирования, при которой чистый дисконтированный доход обращается в нуль. Индекс доходности равен отношению суммы дисконтированных операционных потоков к капитальным вложениям.

Приведённые оценки относятся к одному производственному массиву площадью 800 га. При обслуживании системой нескольких производственных массивов хозяйства капитальные и эксплуатационные затраты возрастают медленнее суммарного экономического эффекта, поскольку серверная инфраструктура и программное обеспечение используются совместно, что улучшает показатели проекта. Кроме того, принятая величина годового эффекта является нижней оценкой, так как соответствует одному напряжённому уборочному периоду и не учитывает применения системы в иные периоды сельскохозяйственных работ, где действует та же логика распределения ресурсов.

5.7. Выводы по главе 5

На основе результатов вычислительных экспериментов, статистической обработки полученных данных и экономической оценки сформулированы следующие выводы по пятой главе.

1. Выполнена экспериментальная проверка применимости разработанного научно-методического аппарата на имитационной модели уборочно-

транспортного звена. Основная серия составила 1800 прогонов (300 независимых реализаций внешней среды при шести конфигурациях управления); дополнительно проведены серия при нарушенных допущениях модели порождения данных, диагностическая серия и серия анализа чувствительности. Обучение предиктивной модели выполнено на выборке из 77 757 образцов. Достоверность программной реализации подтверждена пятью проверками корректности, обеспечивающими воспроизводимость расчёта.

2. Статистически доказано превосходство разработанной устойчивой схемы управления над традиционными детерминированными стратегиями. Превосходство над практикой постоянного привлечения резервной техники достигается на всех без исключения реализациях: медиана выигрыша 901,9 тыс. руб., прирост интегрального показателя 5,566 процента при размере эффекта 1,000 и уровне значимости $1,2 \cdot 10^{-50}$. Превосходство над консервативной стратегией составляет по медиане 147,2 тыс. руб. при уровне значимости $3,8 \cdot 10^{-33}$ и достигается на 82 процентах реализаций, причём наибольший относительный прирост 1,099 процента получен в страте умеренных возмущений. В натуральном технико-агрономическом выражении преимущество складывается из соблюдения директивного агротехнического срока с сокращением просрочки уборки с 2,6 до 0,3 суток, сохранения около 39 тонн зерна на массив от потерь при перестое на корню, повышения полноты использования агротехнических окон с 0,349 до 0,363 и сокращения непроизводительного простоя уборочной техники под выгрузкой с 29,5 до 18,1 часа, то есть на 38,6 процента, при снижении затрат на привлечение резервной техники с 1280 до 339 тыс. руб. на массив.

3. Подтверждена работоспособность предиктивного модуля с гибридной функцией потерь. Прогноз состояний внешней среды калиброван (оценка Бриера 0,126, ожидаемая ошибка калибровки 0,0103). Установлена прогностическая информативность метрики устойчивости (площадь под характеристической кривой 0,8965, доля неоптимальных решений в нижнем дециле метрики 0,255 против 0,054 в среднем). Разрешающая способность обнаружения предстоящих

отказов характеризуется совместными показателями полноты и заблаговременности. При пороге срабатывания 0,08 полнота обнаружения составляет 0,874 при медианной заблаговременности 35,0 часа, при пороге 0,10 - 0,771 и 30,75 часа соответственно, причём повышение порога удлиняет заблаговременность ценой снижения полноты обнаружения. Полученная заблаговременность создаёт временной резерв, достаточный для перевода отказа из аварийного в плановое обслуживание с использованием технологических перерывов. Введение экономической компоненты в целевую функцию обучения снижает ожидаемые потери от выбора стратегии на 14,0 % при ухудшении статистического качества прогноза на 3,3 %. Вместе с тем установлено, что перенос этого снижения на интегральный показатель функционирования звена статистического подтверждения не получил, равно как и вклад механизма смены критерия принятия решений. Полученный результат уточняет границы применимости предложенных механизмов.

4. Проверена работоспособность модуля когнитивной интерпретации на базе большой языковой модели. Подтверждена возможность трансляции формальных параметров решения (метрики устойчивости, положения вектора состояния в симплексе, оценок логистических рисков) в управленческую директиву на естественном языке. Тем самым решается проблема информационной непрозрачности интеллектуальной системы и создаются условия для повышения доверия персонала к автоматизированным рекомендациям.

5. Обоснована экономическая эффективность внедрения системы на типовом предприятии. Оценка выполнена динамическим методом при горизонте планирования семь лет и ставке дисконтирования 18 процентов. При капитальных затратах 1460 тыс. руб. и годовом чистом эффекте 451,9 тыс. руб. чистый дисконтированный доход составляет 262 тыс. руб., дисконтированный срок окупаемости 5,3 года, внутренняя норма доходности 24 процента. Расчёт опирается исключительно на величину превосходства, установленную в вычислительном эксперименте, без включения не подтверждённых измерением

составляющих. Разработанный программный комплекс на базе языка Python (FastAPI, Streamlit) представляет собой готовый прототип для создания промышленных систем управления транспортно-технологическими ресурсами предприятий агропромышленного комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационное исследование посвящено решению актуальной научно-практической задачи повышения эффективности функционирования внутрихозяйственных транспортно-логистических систем агропромышленного комплекса (ВТЛС АПК) в условиях высокой стохастической неопределенности и цифровой трансформации отрасли. Разработанный научно-методический аппарат обеспечивает переход от реактивной диспетчеризации к проактивному предиктивному управлению разнородным парком техники.

Выполненный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил получить следующие основные научные и практические результаты:

1. Проведен системный анализ и формализация логистических процессов АПК. Доказано, что ключевым лимитирующим фактором пропускной способности ВТЛС является высокая энтропия внешней (метеоусловия) и внутренней (надежность техники) среды. Разработана структурно-параметрическая модель разнородного парка, представленная в виде Матрицы технологической допустимости. В отличие от существующих подходов, данная модель формализует взаимосвязь эксплуатационных характеристик машин классов М1, М2 и М3 с требованиями логистических операций, обеспечивая формирование единого признакового пространства для алгоритмов интеллектуального управления.

2. Развита аналитический аппарат принятия решений на основе метода районирования симплекса вероятностей. Предложенный метод позволяет осуществлять выбор оптимальных стратегий управления (агрессивной или консервативной) в условиях неполной информации о вероятностях состояний среды. Введенная метрика устойчивости, определяемая как кратчайшее расстояние от текущего вектора состояния системы до границ смены стратегий, позволяет количественно оценивать устойчивость логистических планов к погрешностям прогнозирования и своевременно идентифицировать ситуации высокого риска.

3. Спроектирована и обоснована архитектура математически-информированной модели машинного обучения. Научная новизна подхода заключается в разработке гибридной функции потерь, которая интегрирует в процесс обучения нейросети (архитектуры LSTM) дифференцируемый штраф за экономические последствия принятия ошибочных решений. Экспериментально подтверждено, что введение указанного штрафа снижает ожидаемые потери от выбора стратегии на 14,0 % при ухудшении статистического качества прогноза на 3,3 %. Разработанный предиктивный модуль обеспечивает выявление предстоящих отказов уборочной техники с медианной заблаговременностью 35,0 часа при полноте обнаружения 0,87 (подраздел 5.5), что создаёт временной резерв для передислокации ресурсов и перевода отказа в плановое обслуживание.

4. Разработана концептуальная архитектура гибридной интеллектуальной СППР, реализующая принцип функционального разделения между детерминированным математическим ядром и когнитивным модулем интерпретации на базе больших языковых моделей (LLM). Реализованная концепция объяснимого искусственного интеллекта (XAI) обеспечивает прозрачность алгоритмических решений, транслируя сложные математические категории в понятные диспетчеру логистические рекомендации. Предложенная стратегия поэтапного развертывания (от оценок Фишберна к Data-Driven моделям) эффективно решает проблему «холодного старта», обеспечивая работоспособность системы с первого дня эксплуатации. Критерий перехода от экспертно-нормативного к адаптивному режиму формализован через статистически значимое превосходство машинного прогноза по ожидаемым потерям при одновременном соблюдении условий его абсолютного качества, представительности отложенной выборки и покрытия признакового пространства.

5. Проведена экспериментальная проверка разработанной методологии с использованием созданного программного комплекса на языке Python. Имитационное моделирование напряжённого уборочного периода

продолжительностью шестнадцать суток при директивном агротехническом сроке двенадцать суток выполнено на 300 независимых реализациях внешней среды при шести конфигурациях управления, что составило 1800 прогонов. Эффективность разработанной схемы для агропромышленного производства выражается в конкретных технико-агрономических результатах: сокращении просрочки уборки с 2,6 до 0,3 суток относительно директивного срока, сохранении около 39 тонн зерна на массив, или 2,8 процента валового сбора, от потерь при несвоевременной уборке, повышении полноты использования благоприятных агротехнических окон с 0,349 до 0,363 и сокращении непроизводительного простоя уборочной техники на 38,6 процента. Статистически подтверждено превосходство разработанной схемы над традиционными стратегиями при наступлении стохастических возмущений: прирост интегрального показателя составил 5,566 процента относительно реактивной стратегии при медиане выигрыша 901,9 тыс. руб. за напряжённый период и уровне значимости $1,2 \cdot 10^{-50}$. Экономическая оценка, выполненная динамическим методом при горизонте семь лет, показала положительный чистый дисконтированный доход 262 тыс. руб. и внутреннюю норму доходности 24 процента при требуемой ставке 18 процентов.

6. Практическая значимость работы подтверждается разработкой специализированного программного обеспечения, которое может функционировать как аналитическая надстройка над существующими ERP и телематическими платформами агропредприятий. Предложенные решения способствуют достижению принципов логистики «точно-в-срок», снижению удельных издержек на транспортировку и повышению операционной надежности транспортно-технологических цепей АПК.

Теоретические положения и практические рекомендации диссертации формируют научно-методический фундамент для создания интеллектуальных транспортных систем нового поколения, способных эффективно функционировать в условиях неопределенности, что имеет существенное

значение для обеспечения продовольственной и технологической безопасности Российской Федерации.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АМО – Агрегатируемая машина и орудие

АПК – Агропромышленный комплекс

АРМ – Автоматизированное рабочее место

БАС – Беспилотная авиационная система

ВТЛС – Внутрихозяйственная транспортно-логистическая система

ГСМ – Горюче-смазочные материалы

ИИ – Искусственный интеллект

ЛПР – Лицо, принимающее решения

МТА – Машинно-тракторный агрегат

НРТК – Наземный робототехнический комплекс

ПО – Программное обеспечение

РБС – Роботизированная и беспилотная система

СЗР – Средства защиты растений

СППР – Система поддержки принятия решений

СТК – Самоходный технологический комплекс

СУБД – Система управления базами данных

ТЭС – Тягово-энергетическое средство

CAN (Controller Area Network) – Локальная вычислительная сеть контроллеров (стандарт промышленной сети)

ERP (Enterprise Resource Planning) – Система планирования ресурсов предприятия

GBDT (Gradient Boosting Decision Trees) – Градиентный бустинг над деревьями решений

GNSS (Global Navigation Satellite System) – Глобальная навигационная спутниковая система

GRU (Gated Recurrent Unit) – Управляемый рекуррентный блок (тип архитектуры нейронной сети)

IoT (Internet of Things) – Интернет вещей

LLM (Large Language Model) – Большая языковая модель

LSTM (Long Short-Term Memory) – Долгая краткосрочная память (архитектура рекуррентной нейронной сети)

ML (Machine Learning) – Машинное обучение

NPV (Net Present Value) - чистый дисконтированный доход

PdM (Predictive Maintenance) – Предиктивное техническое обслуживание

RNN (Recurrent Neural Network) – Рекуррентная нейронная сеть

VRP (Vehicle Routing Problem) – Задача маршрутизации транспортных средств

XAI (Explainable Artificial Intelligence) – Объяснимый искусственный интеллект

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Татаров, Е. Б. Агропромышленный комплекс России: современное состояние и тенденции развития / Е. Б. Татаров, Н. Б. Морозова // Символ науки: международный научный журнал. – 2024. – Т. 1, № 4-2. – С. 105-109. – EDN THORMH.
2. Ерошенко, Е. К. Современное состояние и перспективы развития АПК России / Е. К. Ерошенко // Технологическое обеспечение и экономическая целесообразность использования новых сортов сельскохозяйственных культур : Материалы международной научно-практической онлайн-конференции молодых ученых и специалистов, посвящённой 300-летию Российской академии наук, Орёл, 12 декабря 2024 года. – Орёл: ФГБНУ "Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур", 2025. – С. 41-47. – EDN WHACUB.
3. Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов РФ на период до 2030 года [Текст]: Распоряжение Правительства РФ от 08.09.2022 № 2567-р // Рос. газ. - 2022. - 10 сент. - С. 10.
4. Тод, Н. А. Особенности управления потоками в логистике АПК / Н. А. Тод // Научно-практические аспекты развития АПК : Материалы национальной научной конференции, Красноярск, 12 ноября 2020 года. Том Часть 2. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2020. – С. 106-109. – EDN VTUHOI.
5. Кокунова, И. В. Особенности использования логистического подхода в агропромышленном комплексе / И. В. Кокунова // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 3. – С. 37-45. – EDN UNNTNB.
6. Павлова Е.И. Трансформация логистики в условиях цифровизации / Е.И. Павлова, Т. Эсанов // Инновационная экономика и современный менеджмент. 2022. № 5(41). С. 23-25. EDN: OLYDAA.
7. Современные тенденции развития агропромышленного комплекса в условиях технологической модернизации и цифровой трансформации / Д. Е.

Морковкин, В. В. Остроумов, О. А. Зозуля, Т. В. Петрусевич // Вестник евразийской науки. – 2025. – Т. 17, № S2. – EDN ILHDOA.

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

9. Халтурин, Р. А. Управление состоянием эффективности в сложных транспортных системах / Р. А. Халтурин, А. А. Акулов, В. Д. Кутков // Транспортное дело России. – 2025. – № 3. – С. 107-111. – EDN HYMDNI.

10. Смыслова, О. Ю. Особенности развития аграрного производства в России в современных условиях / О. Ю. Смыслова, П. Н. Юрова, А. А. Иванова // Фундаментальные исследования. – 2022. – № 10-1. – С. 96-104. – DOI 10.17513/fr.43350. – EDN OKLGJN.

11. Косторной, А. А. Особенности материальных потоков в предприятиях агропромышленного комплекса / А. А. Косторной, В. Ф. Лукиных // Логистика - евразийский мост : материалы XI международной научно-практической конференции, Красноярск, 28–30 апреля 2016 года. Том Часть 1. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2016. – С. 420-423. – EDN VSNCQT.

12. Сапун О.Л., Евлаш О.С. Логистический подход на предприятиях агропромышленного комплекса // Экономика: теория и практика. 2022. № 1 (11). С. 27-31.

13. Миронюк С.К. Использование транспорта в сельском хозяйстве. - М.: Колос, 1982. - 287 с.

14. Перцев, С. Н. Логистический подход в технической эксплуатации сельскохозяйственного транспорта / С. Н. Перцев, К. Е. Муравьев // АгроЭкоИнженерия. – 2025. – № 4(125). – С. 86-99. – DOI 10.24412/2713-2641-2025-4125-86-99. – EDN TRSEKM.

15. Апажев А. К., Шекихачев Ю. А., Ашабоков Х. Х., Шекихачева Л. З. Исследование влияния природно-климатических и дорожных условий на

эксплуатационные показатели автомобиля / Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2024. № 4(46). С. 96-104. EDN: WJIFTA.

16. Тутаришева, Ф. С. Методы совершенствования управления развитием логистической системы регионального АПК / Ф. С. Тутаришева, А. У. Ушхо // Вестник Майкопского государственного технологического университета. – 2009. – № 2. – С. 61-64. – EDN LRITBN.

17. Особенности применения современного тракторного транспорта в технологических процессах по возделыванию сельскохозяйственных культур / Н. В. Бышов, С. Н. Бoryчев, И. А. Успенский [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 126. – С. 180-198. – DOI 10.21515/1990-4665-126-013. – EDN XXXBKT.

18. Сухоставец П.Г., Калашников С.А. Логистические основы организации обеспечения АПК материально-техническими ресурсами. М.: АгриПресс, 2011. 382 с.

19. Шумская, Т.Д. Цифровизация логистической деятельности на предприятиях АПК / Т.Д. Шумская, О.Л. Сапун // Развитие логистики и управления цепями поставок: материалы I Респ. науч.-практ. студ. конф. / редкол. Д.В. Капский, Р.Б. Ивуть – Минск: БНТУ, 2020. – С. 318–322.

20. Оценка материально-технической базы и уровня механизации сельского хозяйства / И. В. Шарикова, Т. А. Лысова, В. В. Кондак, Е. В. Шаронова // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 1. – С. 207-217. – EDN IFVSHJ.

21. Минаков И.А. Укрепление материально-технической базы аграрного производства как одно из условий обеспечения продовольственной безопасности// Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. - 2021. - № 3 (66). - С. 131-136. EDN: NHDGXO.

22. Макаревич, О.Д. Развитие логистического подхода на предприятиях АПК / О.Д. Макаревич // Проблемы экономики. – 2018. – № 1 (26). – С. 108–118.

23. 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.

24. R. R. Vazetdinov, M. M. Gilmanov, I. M. Gilmanov, "Economic assessment of competition between Russian KAMAZ trucks and Chinese trucks in the market of vehicles", Actual problems and prospects of implementation of national projects in the Russian Federation: Proceedings of the All-Russian Scientific and practical conference with international participation, Pavlovo, December 21, 2023 of the year. Pavlovo: N.I. Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University, 2024, pp. 243-247.

25. Абдюшева, Д. Р. Анализ современного состояния транспортного комплекса России/ / Д.Р. Абдюшева, //Вестник университета. 2018. № 8. С. 56–61.

26. ОК 034-2014 (КПЕС 2008). Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности : утвержден Приказом Росстандарта от 31 января 2014 г. № 14-ст : редакция от 23 января 2026 г. // СПС «КонсультантПлюс». - URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_163703/ (дата обращения: 20.02.2026). - Текст : электронный.

27. 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.

28. Полунина, Н. Ю. Основные тенденции развития логистики АПК в условиях геополитической трансформации / Н. Ю. Полунина // Наука и образование: актуальные вопросы теории и практики : Материалы IV Международной научно-методической конференции, Оренбург, 26–27 марта 2024 года. – Самара-Оренбург: Самарский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 191-194.

29. Повышение тягово-цепных свойств мобильных энергетических средств в транспортно-технологическом обеспечении АПК Дальневосточного федерального округа / С. В. Щитов, З. Ф. Кривуца, Н. Н. Сенникова, Н. Ф. Двойнова. – Южно-Сахалинск : Сахалинский государственный университет, 2017. – 176 с. – (Монографии ученых Сахалинского государственного университета). – ISBN 978-5-88811-556-5. – EDN XSWJXV.

30. 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.

31. Переход к роботизированным технологиям в сельских территориях на примере создания опытного района для разработки и внедрения беспилотных интеллектуальных робототехнических систем / О. З. Загазежева, К. Ч. Бжихатлов, Х. А. Бароков, З. Ю. Кантиев // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2022. – № 6(110). – С. 186-193. – DOI 10.35330/1991-6639-2022-6-110-186-193. – EDN KVDFFL.

32. Зюкин Д. А., Вакуленко Р. Я., Болычева Е. А., Яковлев Н.А., Ронжина М.А. Роль транспортной логистики в развитии российского агропромышленного комплекса / Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 5(395). С. 471-474. EDN: RBDPFT

33. Волкова, Л. В. Особенности логистических процессов в сельскохозяйственных организациях / Л. В. Волкова // Материалы Региональной научно-практической конференции КФ РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева с международным участием, Калуга, 24 апреля 2019 года. Том Выпуск №13. – Калуга: ИП Якунин А.В., 2019. – С. 135-139. – EDN WAAIV.

34. 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.

35. Рублева, А. А. Цифровизация систем управления транспортными перевозками / А. А. Рублева, П. А. Рублева // Вопросы устойчивого развития

общества. – 2020. – № 8. – С. 261-264. – DOI 10.34755/IROK.2020.55.76.056. – EDN ZWTMNX.

36. Панфилова, Е. Е. Предиктивное обслуживание технологического оборудования как стратегия повышения доходности инновационно-активных организаций / Е. Е. Панфилова, К. С. Соколов // Актуальные направления повышения доходности бизнеса: проблемы, методы, решения - 2019 : Сборник научных трудов по материалам 1-й Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 20 апреля 2019 года. – Москва: Государственный университет управления, 2019. – С. 64-68. – EDN LANQKY.

37. Якушин, Д. И. имитационная модель оценки эффективности внедрения системы предиктивного обслуживания оборудования / Д. И. Якушин, В. Н. Денисов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2025. – № 8(158). – DOI 10.60797/IRJ.2025.158.42. – EDN CEEIIG.

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

39. Перцев, С. Н., Муравьев К.Е. Логистический подход к сельскохозяйственным перевозкам. / Приоритеты развития АПК в условиях цифровизации и структурных изменений национальной экономики: Матер. межд. науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава. (Санкт-Петербург - Пушкин, 15 марта 2024 г.). СПб: СПбГАУ. 2024. С. 27-32. EDN: HEQCIW

40. Кузнецова, Л. В. Нормативная база и анализ обеспеченности тракторами аграрного сектора экономики АПК (на примере Калужской области) / Л. В. Кузнецова, В. Н. Мазуров // АПК: экономика, управление. – 2024. – № 6. – С. 76-82. – DOI 10.33305/246-76. – EDN DDJSPX.

41. Лукиных, В. Ф. Логистика : Учебное пособие / В. Ф. Лукиных, Н. А. Тод. – Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2018. – 352 с. – EDN PBZZLX.

42. Гусев, А. Ю. Оценка эффективности работы перерабатывающей промышленности регионального АПК в условиях растущей конкуренции / А. Ю. Гусев, А. Л. Маркова, Д. А. Чепик // Управление инновационным развитием агропродовольственных систем на национальном и региональном уровнях : Материалы III Международной научно-практической конференции, Воронеж, 27–28 октября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. – С. 117-121. – EDN QQIJAS.

43. Иовлев, Г. А. Экономика сельскохозяйственного транспорта / Г. А. Иовлев // Аграрный вестник Урала. – 2022. – № S13. – С. 18-30. – DOI 10.32417/1997-4868-2022-228-13-18-30. – EDN LSRHZO.

44. 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.

45. Терентьев А.В., Прудовский Б.Д. Методы принятия решений в условиях неопределённого состояния "внешней среды" // Транспортное планирование и моделирование: сб. трудов Международной научнопрактической конференции. СПб: СПбГАСУ, 2016. С. 145-149. EDN: XXZYIV

46. Петровский А.Б. Теория принятия решений. /А.Б. Петровский. - М.: Изд. центр «Академия», 2009, - 400 с.

47. Терентьев, А. В. Методы районирования как методы оптимизации автотранспортных процессов / А. В. Терентьев, Д. Б. Ефименко, М. Ю. Карелина // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 6(65). – С. 291-294. – DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-291-294. – EDN YPNFZF.

48. 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, 01 декабря 2023 года. - Курск: ЗАО "Университетская книга", 2024. - С. 407-410. EDN: LHOZEX

49. Макарова, Н. Н. Концепты деятельности цифровых экосистем транспортно-логистического обслуживания предпринимательских структур АПК: территориальный аспект / Н. Н. Макарова, Г. В. Тимофеева, В. В. Суркова // Развитие территорий. – 2022. – № 3(29). – С. 8-13. – DOI 10.32324/2412-8945-2022-3-08-13. – EDN SQIAUO.

50. Савченко О.Ф., Елкин О.В. Энергетический мониторинг машинно-тракторного парка сельхозпредприятия на основе информационной модели // Агротехника и энергообеспечение. - 2021. - № 1 (30). - С. 124-131. EDN: OBQQUE

51. Терентьев, А. В. Модель определения весовых коэффициентов при оценке эффективности транспортного логистического производства, основанная на декомпозиции информационного пространства / А. В. Терентьев, Р. О. Судоргин // 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.

52. Хованов, Н.В. Модели учета неопределенности при построении сводных показателей эффективности деятельности сложных производственных систем. /Н.В. Хованов, Ю.В. Федотов / Научные доклады № 28(R) - 2006, Изд-во СПб.: НИИ менеджмента СПбГУ, 2006. - 37 с.

53. Вентцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению "Математика. Компьютер. науки" / Е. С. Вентцель ; Е. С. Вентцель. – 4-е изд., стер.. – Москва: Дрофа, 2006. – (Высшее образование). – ISBN 5-358-00340-1. – EDN OTVHAP.

54. Терентьев А.В. Развитие методов районирования / А.В. Терентьев. Материалы 4-ой международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» - СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. - С. 127-130.

55. Карелина, М. Ю. Аналитическое определение весовых коэффициентов при многокритериальной оценке эффективности автотранспортных средств / М. Ю. Карелина, И. В. Арифиллин, А. В. Терентьев

// Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2018. – № 1(52). – С. 3-9. – EDN YTOMQN.

56. Certificate of state registration of the computer program No. 2025616031 Russian Federation. Software "Mathematical model for assessing risk expectations in logistics transportation": application 12.03.2025: published 12.03.2025 / N. V. Solovyov, A.V. Terentyev, M. Y. Karelina, R. O. Sudorgin, applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "State University of Management".

57. 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.

58. V. F. Kushlyayev, A. T. Guryev, E. A., Demenkova, I. S. Vasendina, "Structural modeling of life cycle processes of transport and technological machines for emergency situations", Reliability and durability of machines and mechanisms: collection of materials of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference, Ivanovo, April 16, 2020. Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020. 473 p. pp. 222-229. ISBN: 978-5-6042853-4-3

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

60. Сергеев В. И., Сергеев И. В. Цифровой фреймворк: к методологии цифровой трансформации цепей поставок // Логистика и управление цепями поставок. 2020. № 1 (96). С. 3-12. EDN: OPLPCL

61. Халтурин, Р. А. Методы снятия неопределенности в сложных логистических системах при распределении ресурсов по объектам инфраструктуры / Р. А. Халтурин, А. В. Терентьев // Мир транспорта и

технологических машин. - 2025. - № 3-1(90). - С. 116-123. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-3-1(90)-116-123 EDN: TFPOLY

62. Тиханычев О.В. Теория и практика автоматизации поддержки принятия решений. М.: Эдитус, 2018. 76 с. EDN: URWWFD.

63. Чечнев В. Б. Использование систем поддержки принятия решений в автоматизации процессов принятия решений // Электронные библиотеки (Russian Digital Libraries Journal). - 2025. - Т. 28, № 1. - С. 163–183.

64. Makarova, I. Improvement of the Transport System Environmental Safety of the Arctic Region / I. Makarova, G. Mavlyautdinova, L. Gabsalikhova, V. Mavrin, P. Buyvol // Frontiers of Energy and Environmental Engineering. CFEEE 2023 / ed. by F. Wen, J. Zhu. – Singapore : Springer, 2024. – P. 649–658. – (Environmental Science and Engineering). – DOI 10.1007/978-981-97-0372-2_53.

65. V. A. Vasin, V. A. Nevelev, "System analysis of the economic efficiency of managing the life cycle of Russian unmanned vehicles", Modern problems of managing competitiveness and innovative development of Russia based on digital technologies 12/2018: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference, In memory of Honored Scientist of the Russian Federation V.I. Kravtsova, Moscow, December 11, 2018. Moscow: Moskovsky Polytech, 2019, pp. 163-167.

66. Торопов, Н. Ю. Развитие нормативной базы в области интеллектуальных транспортных систем / Н. Ю. Торопов, Е. С. Федосеев // Дороги и мосты. – 2023. – № 2(50). – С. 13-40. – EDN PQYNTM.

67. Гашкова, Л. В. Понятие и сущность цифровизации в транспортно-логистических процессах / Л. В. Гашкова, О. Ю. Морозова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2022. – № 4-1. – С. 44-51. – DOI 10.17513/vaael.2134. – EDN SXPOHN.

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

69. Weller O., Boratko M., Naim I., Lee J. On the Theoretical Limitations of Embedding-Based Retrieval // arXiv preprint arXiv:2508.21038v1. - 2025. - 24 p.

70. 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. - М.: Государственный университет управления, 2025. - С. 3–6.

71. Мехдиева, И. И. Применения информационных технологий в логистическом секторе / И. И. Мехдиева, А. А. Степанов // Транспорт и логистика: актуальные вопросы, проектные решения и инновационные достижения : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 22 октября 2021 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2021. – С. 65-67. – EDN RZKWMG.

72. Многоуровневая классификация информационных систем для транспортной отрасли / А. В. Терентьев, В. Д. Кутков, Н. С. Акиншин, М. Г. Плетнев // Транспортное дело России. – 2025. – № 7. – С. 119-123. – EDN LFKOUN.

73. Савзиханова, С. Э. Применение методов машинного обучения на языке Python: теория, практика и перспективы / С. Э. Савзиханова // Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики в современной науке: теория и практика актуальных исследований : Материалы III Всероссийской научно-технической конференции, Махачкала, 02–03 апреля 2025 года. – Махачкала: Дагестанский государственный технический университет, 2025. – С. 286-291. – EDN XCHSUV.

74. So, B. Enhanced Gradient Boosting for Zero-Inflated Insurance Claims and Comparative Analysis of CatBoost, XGBoost, and LightGBM / B. So // arXiv preprint arXiv:2307.07771. – 2023. – 26 p. – DOI 10.48550/arXiv.2307.07771.

75. Averkin A., Yarushev S. Hybrid Neural Networks and Time Series Forecasting // Artificial Intelligence.Communication in Computer and Information Sciences, 2018. V. 934. P. 230-239. EDN: TPLXDJ

76. Борисов В. В., Федулов А. С., Зернов М. М. Основы гибридизации нечетких моделей. Серия "Основы нечеткой математики". Книга 9. - М.: Горячая линия - Телеком, 2017. - 100 с.

77. Masnadi-Shirazi H, Vasconcelos N (2009) On the design of loss functions for classification: theory, robustness to outliers, and savageboost. In: Advances in Neural Information Processing Systems, pp. 1049-1056.

78. A comprehensive survey of loss functions and metrics in deep learning / Ju. Terven, D. M. Cordova-Esparza, Ju. A. Romero-González [et al.] // Artificial Intelligence Review. – 2025. – Vol. 58, No. 7. – P. 195. – DOI 10.1007/s10462-025-11198-7. – EDN MWHNRZ.

79. Dwivedi, P. Smooth gradient loss: a loss function for gradient regularization in deep learning optimization / P. Dwivedi, B. Islam, M. Kajal // The Journal of Supercomputing. – 2025. – Vol. 81, No. 15. – P. 1457. – DOI 10.1007/s11227-025-07954-9. – EDN YBPXZS.

80. Chen Z, Badrinarayanan V, Lee C-Y, Rabinovich A (2018) GRADNORM: Gradient normalization for adaptive loss balancing in deep multitask networks. In: International Conference on Machine Learning, PMLR. pp 794-803.

81. Dessain, J. Improving the Prediction of Asset Returns With Machine Learning by Using a Custom Loss Function / J. Dessain // Advances in Artificial Intelligence and Machine Learning. – 2023. – Vol. 03, No. 04. – P. 1640-1653. – DOI 10.54364/aaiml.2023.1193. – EDN BDIJWJ.

82. Panchal M, Sharan B, Dwivedi P (2023) Comprehensive Analysis of Machine Learning Approaches for Breast Cancer Detection and Classification. In:

2023 10th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), pp. 867-872.

83. Гушинский, А. Г. Основные подходы и методы оценки надежности технических систем / А. Г. Гушинский, Р. И. Липатов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2010. – № 21. – С. 242-246. – EDN PEMJXV.

84. Спицина И. А., Аксенов К. А. Метод поддержки принятия решений при разработке информационных систем на основе мультиагентного подхода: монография. - М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2023. - 180 с.

85. 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.

86. Zagorulko, Yu. A. Features of Development of Internet Resource for Supporting Developers of Intelligent Decision Support Systems / Yu. A. Zagorulko, G. B. Zagorulko // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2018. – No. 8. – P. 63-67. – EDN YUCRXC.

87. 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.

88. Linardatos, P. Explainable ai: A review of machine learning interpretability methods / P. Linardatos, V. Papastefanopoulos, S. Kotsiantis // Entropy. – 2021. – Vol. 23, No. 1. – P. 1-45. – DOI 10.3390/e23010018. – EDN XYDDDZ.

89. Gilpin, L.H.; Bau, D.; Yuan, B.Z.; Bajwa, A.; Specter, M.; Kagal, L. Explaining explanations: An overview of interpretability of machine learning. In Proceedings of the 2018 IEEE 5th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), Turin, Italy, 1–3 October 2018; pp. 80–89.

90. Аверкин, А. Н. Объяснимый искусственный интеллект как часть искусственного интеллекта третьего поколения / А. Н. Аверкин // Речевые технологии. – 2023. – № 1. – С. 4-10. – EDN ONAIEY.

91. Gao Y, Xiong Y, Gao X, Jia K, Pan J, Bi Y, Dai Y, Sun J, Wang H (2023) Retrieval-augmented generation for large language models: a survey. Preprint at arXiv:2312.10997.

92. Дернов, Н. С. Применение искусственного интеллекта и машинного обучения в логистике / Н. С. Дернов, Г. А. Дербенев, Д. Е. Шаронов // Научные исследования 2025: Сборник статей XVI Международной научно-практической конференции, Пенза, 23 апреля 2025 года. - Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. - С. 58-61. EDN: OBUGDK

93. Хорошилова, Т. Н. Роль искусственного интеллекта в логистике: эффективность, вызовы и решения / Т. Н. Хорошилова // Universum: технические науки. – 2024. – № 11-5(128). – С. 41-45. – DOI 10.32743/UniTech.2024.128.11.18548. – EDN FMYONH.

94. Кутков, В. Д. Интеллектуализация транспорта: синтез международного опыта и цифровых стратегий в Российской Федерации / В. Д. Кутков, Н. А. Колотушкин, Ю. Р. Поляков // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов X Международной научно-практической конференции, приуроченной к 95-летию основания ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, 04 декабря 2025 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2026. – С. 680-686. – EDN NBXFXU.

95. 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.

96. Модель структуры системы распределения ресурсов, основанной на функционально-сетевом принципе представления показателей / Р. А. Халтурин, И. Ю. Каштанов, В. Д. Кутков, Н. С. Акиншин // International Journal of Advanced

Studies. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 234-251. – DOI 10.12731/2227-930X-2025-15-1-357. – EDN STTJXT.

97. 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.

98. Agarwal R, Schwarzer M, Castro PS, Courville AC, Bellemare M (2021) Deep reinforcement learning at the edge of the statistical precipice. *Adv Neural Inf Process Syst* 34:29304–29320.

99. Juang Chia Feng, Lin Chin Teng. An Online Self Constructing Neural Fuzzy Inference Network and its Applications // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1998. V. 6. No1. P. 12-32.

100. DARPA's explainableAI(XAI) program: A retrospective / D. Gunning, E. Vorm, J. Yu. Wang, M. Turek // *Applied AI Letters*. – 2021. – Vol. 2, No. 4. – DOI 10.1002/ail2.61. – EDN QNCYTN.

101. Слейман, А. Внедрение ERP-системы "Агропромышленный комплекс" в деятельность сельскохозяйственного предприятия / А. Слейман, Р. Г. Гучетль // *Исследование социально-экономического развития территорий в условиях санкций и угроз глобальных вызовов : Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Тамбов, 14–16 мая 2024 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2024. – С. 164-171. – EDN RHBSMR.*

102. Мухаметзянов, Р. Р. Внедрение ERP систем в организациях агропромышленного комплекса / Р. Р. Мухаметзянов // *Профессиональные коммуникации в научной среде - фактор обеспечения качества исследований : сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции, Альметьевск, 25 декабря 2024 года. – Альметьевск: Специализированный фонд управления целевым капиталом для развития Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ, 2024. – С. 110-114. – EDN SKGZPK.*

Структурно-параметрическая модель парка техники и матрица технологической допустимости

В данном приложении представлена обобщенная модель, формализующая состав и характеристики парка техники агропромышленного предприятия. Модель объединяет классификацию технических средств (подраздел 1.2), их ключевые эксплуатационные параметры и их функциональное соответствие основным логистическим операциям (подраздел 1.1).

Таблица А.1 - Интегрированная матрица характеристик и технологической допустимости парка техники

Класс	Тип / Пример модели	Вектор ключевых эксплуатационных характеристик (параметров)		
		Типовой класс (т.с.)	Мощность $Ne_{\text{л.с.}}$ (л.с.)	Экспл. масса $m_{\text{т.т.}}$ (т)
ТЭС	Трактор энергонасыщенный (RSM 2375)	5.0	380	14.5
ТЭС	Трактор универс.-пропашной (МТЗ-1221)	2.0	130	5.7
СТК	Комбайн зерноуборочный (Толл 785)	-	520	18.0
СТК	Опрыскиватель самоходный (Туман-3)	-	140	3.5
АМО	Плут оборотный (ПЛН-8-40)	-	-	2.5
АМО	Посевной комплекс (Amazone Citan 12001)	-	-	8.0
АМО	Опрыскиватель прицепной (ОП-2500)	-	-	1.8
М1	Грузовой автомобиль (КАМАЗ-65115)	-	280	10.5
РБС*	БПЛА-опрыскиватель (DJI Agas)	-	-	0.08
РБС*	БПЛА-мониторинг (Геоскан)	-	-	0.01

				Матрица технологической допустимости (Коэффициент эффективности $K_{effK_{eff}}$)			
Ширина захвата ВрВр (м)	Пропускная сп. МСУ (кг/с)	Емкость бункера/бака Vb/Vb (м³)	Грузоподъ- емность (т)	Источник данных	Основная обработка почвы	Предпосевная обработка	Посев / Посадка
-	-	-	-	CAN, GNSS	1.0	1.0	0.9
-	-	-	-	GNSS	0.4	0.8	0.7
9.0	12.0	12	-	CAN, GNSS, YieldMap	-	-	-
28.0	-	2.5	-	GNSS	-	-	-
3.2	-	-	-	-	Req(ТЭС > 5.0)	-	-
12.0	-	8	-	ISOBUS	-	-	Req(ТЭС > 4.0)
24.0	-	2.5	-	ISOBUS	-	-	-
-	-	-	15	GNSS	-	-	-
9.0	-	0.04	-	GNSS	-	-	-
-	-	-	-	GNSS, Multi- spec	-	-	-

Уход (Опрыски- вание)	Уборка зерновых	Транспортир- овка (Поле- Ток)	Транспортировка (Снабжение)	Мониторинг / Сбор данных
0.2	-	0.3	0.3	-
0.8	-	1.0	1.0	-
-	1.0	-	-	0.7
1.0	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
Req(ТЭС > 1.4)	-	-	-	-
-	-	1.0	1.0	-
0.6*	-	-	-	1.0*
-	-	-	-	1.0*

Условные обозначения:

- **1.0:** оптимальное применение (техника спроектирована для данной операции).
- **0.9 – 0.5:** допустимое применение (возможно, но с пониженной производительностью или повышенными затратами).
- **0.4 – 0.1:** применение возможно, но экономически нецелесообразно (over-engineering).
- - (прочерк): технологически невозможно или функционально не предусмотрено.
- **Req(ТЭС > X):** операция выполняется только в агрегате с ТЭС тягового класса не ниже X.
- *****: применение носит опциональный характер или ограничено специфическими условиями (например, малая площадь обработки, сложный рельеф).

Развёрнутый расчёт денежных потоков проекта

Таблица Б.1 - Исходные данные для расчёта

Параметр	Обозначение	Значение
Капитальные (единовременные) вложения, тыс. руб.	K	1460
Годовые эксплуатационные затраты, тыс. руб.	C	450
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	E	901,9
Ставка дисконтирования, %	r	18
Горизонт планирования, лет	n	7

Таблица Б.2 - Денежные потоки по видам деятельности, тыс. руб.

Вид деятельности	Год 0	Ежегодно, годы 1–7
Операционная: приток (экономический эффект E)	0	+901,9
Операционная: отток (эксплуатационные затраты C)	0	–450,0
Операционная деятельность, чистый поток	0	+451,9
Инвестиционная деятельность (капитальные вложения K)	–1460,0	0
Финансовая деятельность	0	0
Чистый денежный поток	–1460,0	+451,9

Таблица Б.3 - Денежные потоки проекта по годам, тыс. руб.

Год	Приток	Отток	Чистый поток	Коэффициент дисконтирования	Дисконтированный поток	Накопленный ЧДД
0	0	–1460,0	–1460,0	1,0000	–1460,0	–1460,0

1	901,9	–450,0	+451,9	0,8475	+383,0	–1077,0
2	901,9	–450,0	+451,9	0,7182	+324,5	–752,5
3	901,9	–450,0	+451,9	0,6086	+275,0	–477,4
4	901,9	–450,0	+451,9	0,5158	+233,1	–244,4
5	901,9	–450,0	+451,9	0,4371	+197,5	–46,8
6	901,9	–450,0	+451,9	0,3704	+167,4	+120,6
7	901,9	–450,0	+451,9	0,3139	+141,9	+262,4

Итоговые показатели, вычисленные по данным таблицы Б.3. Чистый дисконтированный доход 262,4 тыс. руб., дисконтированный срок окупаемости 5,3 года, внутренняя норма доходности 24 процента, индекс доходности 1,18.

Апробация работы





Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УПРАВЛЕНИЯ»

СЕРТИФИКАТ

настоящий сертификат удостоверяет, что

Акиншин Никита Сергеевич

принял/а участие:

в I Международной научно-практической конференции
«Обеспечение продовольственной безопасности страны на основе создания программно-аппаратных
комплексов и интеллектуальных платформенных цифровых решений в АПК»

с публикацией на тему:

ОНТОЛОГИЧЕСКИ-ОБОСНОВАННЫЕ БОЛЬШИЕ ЯЗЫКОВЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
РИСКАМИ И АДАПТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКЕ

Проректор



М.Ю. Карелина



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УПРАВЛЕНИЯ»

СЕРТИФИКАТ

настоящий сертификат удостоверяет, что

Акиншин Никита Сергеевич

принял/а участие:

в I Международной научно-практической конференции
«Обеспечение продовольственной безопасности страны на основе создания программно-аппаратных
комплексов и интеллектуальных платформенных цифровых решений в АПК»

с публикацией на тему:

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПЛАТФОРМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ В АПК: ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ BIG DATA АНАЛИТИКИ
И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ И МИНИМИЗАЦИЮ РИСКОВ

Проректор



М.Ю. Карелина

Документы, подтверждающие практическую значимость исследования

АКТ внедрения

результатов диссертационного исследования

Акиньшина Никиты Сергеевича

на тему: «Методы многокритериальной оценки эффективности алгоритмов взаимодействия наземной техники агропромышленного комплекса», 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 Акиньшина Никиты Сергеевича внедрены в практическую деятельность транспортной компании ООО «Координационный совет по логистике», оптимизирующий для крупных эксплуатантов разнородный парк подвижного состава и специальной техники при обслуживании грузовладельцев в условиях выраженной сезонной неравномерности перевозок.

Предметом внедрения выступил разработанный автором научно-методический аппарат оперативного управления транспортно-логистической системой, объединяющий теоретико-игровой метод выбора стратегий в условиях неполной информации, предиктивные модели машинного обучения с экономически обусловленной функцией потерь и модуль интерпретации формируемых решений. Ниже приведены результаты, принятые Обществом к практическому применению, и достигнутый по каждому из них производственный эффект.

В части формализации ресурсов парка. Структурно-параметрическая модель разнородного парка техники и построенная на ее основе матрица технологической допустимости использованы при описании эксплуатационных возможностей единиц подвижного состава применительно к видам выполняемой транспортной работы. Функционально-ориентированный принцип классификации, в отличие от применявшегося ранее инвентарного учета, позволил связать технические характеристики каждой единицы с требованиями конкретной перевозки и автоматически исключать заведомо неисполнимые варианты назначения при формировании сменно-суточного плана. Практическим следствием стало сокращение числа переназначений, вызванных несоответствием техники характеру рейса.

В части оценки устойчивости планов. Аналитический метод выбора стратегий на основе районирования пространства вероятностей состояний внешней среды и введенная автором метрика робастности внедрены как инструмент проверки качества плановых решений. Возможность количественно измерить, насколько близок текущий план к границе смены оптимальной стратегии, дала диспетчерской службе Общества формальный признак для своевременного перехода к резервному варианту распределения ресурсов. Существенным для эксплуатации является предусмотренное автором автоматическое переключение между режимом максимизации выработки и режимом минимизации рисков: при высокой неопределенности прогноза система переходит к осторожным решениям, не дожидаясь фактического наступления сбоя.

В части прогнозирования технического состояния и доступности техники. Предиктивный модуль, обрабатывающий потоки бортовой телеметрии совместно со статическим контекстом эксплуатации, и предложенная гибридная функция потерь,

включающая штраф за экономические последствия ошибочных решений, применены при прогнозировании доступности единиц парка на предстоящий период планирования. Интегральный показатель операционной доступности используется Обществом как поправочный коэффициент при распределении заданий, что обеспечило переход от устранения последствий отказов к их упреждению и позволило снизить долю сходов техники с линии, а также непроизводительные затраты, связанные с внеплановыми простоями и срывом согласованных сроков подачи транспортного средства.

В части взаимодействия с диспетчерским персоналом. Реализованный автором принцип функционального разделения, при котором расчет решения выполняет детерминированное математическое ядро, а языковая модель отвечает исключительно за изложение уже принятого решения, признан методически обоснованным и принят Обществом при организации работы диспетчеров с рекомендациями системы. Сопровождение каждой директивы указанием на степень устойчивости плана и на возможные последствия отклонения от него устранило характерное недоверие персонала к рекомендациям, формируемым автоматически, и сократило сроки освоения системы.

В части организации внедрения. Практическое значение для Общества имела предложенная автором двухфазная схема развертывания, допускающая начало эксплуатации на экспертно-нормативных оценках при отсутствии накопленных данных с последующим переходом к обученным моделям, а также предусмотренный обратный переход к нормативному режиму при отказе телеметрического оборудования. Указанная схема позволила ввести систему в работу без предварительного периода накопления статистики и обеспечила непрерывность управления при частичной потере данных. Сервис-ориентированная программная архитектура с асинхронным обменом сообщениями и хранением временных рядов дала возможность развернуть решение как аналитическую надстройку над действующими учетной и телематической платформами Общества, не затрагивая их работу.

Совокупное применение перечисленных результатов способствовало повышению обоснованности сменно-суточного планирования, снижению непроизводительного расхода горюче-смазочных материалов, сокращению простоев подвижного состава по техническим причинам и повышению надежности исполнения обязательств перед грузовладельцами в периоды пиковой нагрузки на транспортную систему.

Изложенное дает основание констатировать, что результаты диссертационного исследования Акиньшина Никиты Сергеевича обладают научной и практической ценностью, направлены на совершенствование оперативного управления транспортно-логистическими процессами и внедрены в деятельность ООО «Координационный совет по логистике», обеспечив переход от реактивной диспетчеризации к предиктивному управлению парком с количественной оценкой устойчивости принимаемых решений.

Доктор технических наук, доцент,

Исполнительный директор, ООО «Координационный совет по логистике»

 / Демин В.А.
«14» сентября 2026 г.



АКТ внедрения

результатов диссертационного исследования

Акиньшина Никиты Сергеевича

на тему: «Методы многокритериальной оценки эффективности алгоритмов взаимодействия наземной техники агропромышленного комплекса», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.9.9.

«Логистические транспортные системы»

Настоящим удостоверяется, что результаты диссертационного исследования Акиньшина Никиты Сергеевича использованы ООО «КНОДЛЬ» при разработке и внедрении систем искусственного интеллекта для предприятий реального сектора экономики, в части проектов управления парком транспортных средств и планирования транспортной работы. Использование результатов охватило полный цикл создания прикладного решения - от постановки задачи до передачи системы в промышленную эксплуатацию, в связи с чем ниже они изложены применительно к соответствующим стадиям работ.

На стадии постановки задачи и обследования заказчика применена предложенная автором функционально-ориентированная модель описания разнородного парка с построением матрицы технологической допустимости. Указанный подход заменил использовавшуюся ранее практику инвентарного перечисления единиц техники формализованным сопоставлением их эксплуатационных характеристик с требованиями выполняемых транспортных операций. Матрица допустимости включена Компанией в состав типовых артефактов предпроектного обследования транспортных предприятий, поскольку позволяет уже на этапе анализа выявить ограничения исполнимости назначений и заранее определить объем данных, необходимый для последующего обучения моделей.

На стадии проектирования аналитического ядра принят разработанный автором метод районирования пространства вероятностей состояний внешней среды с вычислением метрики устойчивости решения. Существенным для инженерной практики Компании обстоятельством является получаемая при этом возможность сопровождать каждое машинное решение числовой характеристикой его надежности - расстоянием до границы, за которой оптимальной становится иная стратегия. Такая характеристика используется в разрабатываемых системах как штатный признак для эскалации решения оператору и как критерий автоматического перехода от режима максимизации выработки к осторожному режиму управления, что ранее приходилось задавать эвристическими порогами без формального обоснования.

На стадии разработки и обучения предиктивных моделей применена архитектура математически-информированного машинного обучения с гибридной функцией потерь, объединяющей статистическую ошибку прогноза с дифференцируемым штрафом за экономические последствия ошибочного выбора. Предложенный автором прием дифференцируемой аппроксимации дискретной операции выбора стратегии позволил включить прикладной критерий непосредственно в процедуру обучения. Практическая ценность решения для Компании состоит в устранении характерного расхождения между метриками качества модели и хозяйственным результатом ее применения: модель, обученная указанным способом, избегает ошибок вблизи границ смены стратегии, где цена неверного прогноза для транспортного предприятия максимальна, даже ценой

незначительного ухудшения формальной точности классификации. Двухпоточная топология сети, разделяющая статический контекст эксплуатации и временные ряды бортовой телеметрии, использована как референсная при построении модулей прогнозирования технической готовности подвижного состава.

На стадии проектирования пользовательской части применена предложенная автором методология построения модуля объяснимого искусственного интеллекта с функциональным разделением ролей, при котором генеративная модель не участвует в выработке решения, а выполняет исключительно трансляцию результата расчета, полученного детерминированным ядром, в директиву на естественном языке с изложением обоснования и оценки рисков. Требования к передаче структурированного контекста между ядром и модулем интерпретации, а также к параметрической стабилизации генерации, исключающей искажение расчетного результата, включены Компанией во внутренний стандарт проектирования подобных модулей. Внедрение этого разделения снизило трудоемкость последующей верификации решений и упростило их приемку эксплуатирующими подразделениями заказчиков.

На стадии ввода в эксплуатацию использована разработанная автором двухфазная стратегия развертывания, обеспечивающая работоспособность системы при отсутствии накопленной статистики за счет нормативно-экспертного режима с последующим переходом к обученным моделям, а также обратную деградацию к нормативному режиму при отказе источников телеметрии. Предложенное решение задачи «холодного старта» устранило основное возражение заказчиков против внедрения предиктивных систем - необходимость длительного периода наблюдения до получения полезного результата - и применяется Компанией при планировании этапов проектов. Реализация ядра в сервис-ориентированной архитектуре с асинхронным обменом сообщениями и специализированным хранением временных рядов учтена при формировании требований к развертыванию решений в виде аналитической надстройки над действующими учетными и телематическими платформами транспортных предприятий без вмешательства в их работу.

Использование указанных результатов позволило Компании сократить сроки проектирования интеллектуальных модулей транспортного назначения за счет применения готовых архитектурных и методических решений, повысить обоснованность предлагаемых заказчикам моделей путем перехода к экономически интерпретируемым критериям обучения и обеспечить объяснимость выдаваемых рекомендаций как обязательное свойство поставляемых систем.

Результаты диссертационного исследования Акиньшина Никиты Сергеевича признаются обладающими научной новизной и практической применимостью, соответствующими профилю деятельности ООО «КНОДЛЬ» и внедренными в процессы разработки программных продуктов интеллектуального управления транспортными системами.

Советник по технологическому развитию

ООО «КНОДЛЬ»

Поспелов Д.Ю./



УТВЕРЖДАЮ

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 Акиньшина Никиты Сергеевича на тему «Методы многокритериальной оценки эффективности алгоритмов взаимодействия наземной техники агропромышленного комплекса», 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